CHARLES C. COCKELL

ASTROBİYOLOJİ

Evrendeki Yaşamı Anlamak



ALFA | BİLİM

ASTROBİYOLOJİ
Evrendeki Yaşamı Anlamak

CHARLES C. COCKELL (1967)

Edinburgh Üniversitesi Fizik ve Astronomi Okulunda astrobiyoloji profesörü ve Birleşik Krallık Astrobiyoloji Merkezinin eş direktörüdür. Cockell, 1995'ten 1998'e kadar Moffett Field'daki NASA Ames Araştırma Merkezinde Ulusal Araştırma Konseyi üyesi ve ardından Stanford Üniversitesinde misafir akademisyendi. Daha sonra 1999'dan 2005'e kadar Cambridge'te Britanya Antarktika Araştırma Merkezinde mikrobiyolog olarak çalıştı ve ardından astrobiyoloji profesörü olarak Edinburgh Üniversitesine geçti. Bilimsel ilgi alanları astrobiyoloji, jeomikrobiyoloji ve ekstrem ortamlardaki yaşam üzerine odaklanmıştır. Bu alanlarda 300'ün üzerinde bilimsel makale ve kitap yayımladı. Cockell ayrıca uzayın keşfi üzerine kapsamlı yayınlar yapmıştır. 2003'ten 2006'ya kadar Mars Kuzey Coğrafi Kutbu için bir araştırma istasyonu planlayan ve tasarlayan Boreas Projesine liderlik etmiş, İngiltere Astrobiyoloji Derneğinin ilk başkanı olmuştur ve çok sayıda ESA ve NASA çalışma grubu ve panelinde yer almıştır.

ÇAĞATAY TARHAN (1977)

Hacettepe Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümünden mezun olmuştur. İstanbul Üniversitesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümünde yüksek lisans ve doktorasını tamamlamıştır ve halen aynı bölümde çalışmalarını sürdürmektedir. Bugüne dek kendi alanıyla ilgili çeşitli akademik eserlerin Türkçeleştirilmesine katkı sağlamıştır. Alfa Bilim Dizisinden çıkan *Hayvanlar Ne İster?* (Marian S. Dawkins), *Üçüncü Şempanze* (Jared Diamond), *Özgürlüğün Evrimi* (Daniel Dennett), *Genişletilmiş Fenotip* (R. Dawkins) ve *Virüs Gezegeni* (C. Zimmer) kitaplarının çevirmenidir.

CEREN ŞEYLAN

İstanbul Üniversitesi Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimlerini tamamladı. Yüksek lisans eğitimi sırasında akademik çalışmaların yanı sıra çeviriyle de ilgilenmeye başladı. Profesyonel anlamda ilk çevirisi, Charles S. Cockell'in *Astrobiyoloji; Evrendeki Yaşamı Anlamak* kitabıdır.

Astrobiyoloji: Evrendeki Yaşamı Anlamak
© 2019, ALFA Basım Yayını Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

Astrobiology: Understanding Life in the Universe
© 2015, John Wiley & Sons Ltd.

Kitabın Türkçe yayın hakları John Wiley & Sons Limited ile yapılan anlaşma aracılığıyla Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Şti.'ne aittir. Tanıtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılacak kısa alıntılar dışında, yayıncının yazılı izni olmaksızın hiçbir elektronik veya mekanik araçla çoğaltılamaz. Eser sahiplerinin manevi ve mali hakları saklıdır.

Yayıncı ve Genel Yayın Yönetmeni M. Faruk Bayrak
Genel Müdür Vedat Bayrak
Yayın Yönetmeni Mustafa Küpüşoğlu
Dizi Editörü Kerem Cankoçak
Çeviren Ceren Şeylan, Çağatay Tarhan
Kapak Tasarımı Adnan Elmasoğlu
Sayfa Tasarımı Mürüvet Durna

ISBN 978-625-449-749-0

1. Basım: Mart 2023

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Çiftehavuzlar Yolu Acar Sanayi Sitesi No: 8 Bayrampaşa-İstanbul
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 45099

Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.
Alemdar Mahallesi Ticarethane Sokak No: 15 34110 Cağaloğlu-İstanbul
Tel: 0(212) 511 53 03 (pbx) Faks: 0(212) 519 33 00
www.alfakitap.com - info@alfakitap.com
Sertifika no: 43949

CHARLES C. COCKELL

ASTROBİYOLOJİ

Evrendeki Yaşamı Anlamak



ALFA

İÇİNDEKİLER

Teşekkür, 7

1	ASTROBİYOLOJİ VE YAŞAM	9
2	MADDE, YAŞAMIN ÖZÜ	27
3	YAŞAMIN YAPISI: MOLEKÜLLERİ İNŞA ETMEK	54
4	YAŞAMIN YAPISI: MOLEKÜLLERDEN HÜCRELER OLUŞTURMAK	78
5	YAŞAM İÇİN ENERJİ	110
6	YAŞAM AĞACI	148
7	BİYO-UZAYIN SINIRLARI	172
8	YAŞAM ELEMENTLERİNİN OLUŞUMU	201
9	ASTROKİMYA-UZAYDA KARBON	234
10	ERKEN DÜNYA (İLK BİR MİLYAR YIL)	256
11	YAŞAMIN KÖKENİ	275
12	DÜNYANIN ERKEN DÖNEMİNDE YAŞAM	303
13	YERYÜZÜNÜN TARİHİ	326
14	OKSİJENİN ARTIŞI	364
15	KİTLESEL YOK OLUŞLAR	385
16	GEZEGENLERİN YAŞANABİLİRLİĞİ	407
17	MARS'IN ASTROBİYOLOJİSİ	429
18	DEV GEZEGENLERİN UYDULARI	475

19 ÖTEGEZEGENLER: BAŞKA YAŞANABİLİR DÜNYALAR ARAYIŞI 505
20 DÜNYA DIŞI ZEKÂ ARAYIŞI 535
21 UYGARLIĞIMIZ 554

Ekler, 578
Sözlük, 585
Dizin, 613

TEŞEKKÜR

Bu kitap küçük çaplı bir girişim sayılmaz. Yazması çok eğlenceliydi ama pek çok kişinin yardımı olmadan yapılamazdı. Bölümleri baştan sona okuyup içerik, okunabilirlik ve üslup hakkında genel ve özel geri bildirimde bulunan meslektaşlarıma minnettarım. Bunlar arasında Michael Benton, Martin Brasier, John Brucato, Alastair Bruce, Casey Bryce, Mark Claire, Claire Cousins, Dave Deamer, Duncan Forgan, Mark Fox-Powell, Jesse Harrison, Harriet Jones, Sun Kwok, Hanna Landenmark, Andy Lawrence, Nicola yer alıyor. McLoughlin, Sami Mikhail, Christine Moissl-Eichinger, Sam Payler, John Raven, Ken Rice, Alan Schwartz, Eddie Schwieterman, Rebecca Siddall, Max Van Wyk de Vries var. Sözlüğe yardım ettikleri için Sam Payler ve Mark Fox-Powell'a teşekkür etmek istiyorum.

Edinburgh Üniversitesindeki 2014/2015 Astrobiyoloji dersinin (PHYS08051) tüm öğrencilerine, ders çalışmalarının bir parçası olarak tamamlanan bölümleri gözden geçiren ve eleştiren tüm öğrencilere özellikle teşekkür etmek istiyorum. Sonuç olarak, bu kitabın hakemleri, dünyanın her yerinden onu kullanan meslektaşlarımdır. Bu nedenle sınıfın, son taslağı eleştirel bir şekilde gözden geçirmesini sağlamak, materyalin erişilebilir olmasını ve tutarlı bir şekilde sunulmasını sağlamak için önemli bir adımdı. Bu süreçte umarım bilimsel yazıları eleştirme konusunda faydalı bir deneyime sahip olurlar. Belirli bir sırayla olmamak üzere Gordon Amour, Danica Ariyadasa Saez, Ewen Borland, Adam Brown, Craig Brownhill, Andrew Campbell, Joanna Cassidy, Tom Cheong-Macleod, Olivia Chingara, Lily Chubb, Joseph Ciccone, Scott Cocker, Charlotte Davie, Anna de Graaff, Katie Garrett, Aidan Gibbs, Megan Gouw, Lachlan Greig, Darren Hall, Alistair Hudson, Tom Hughes, Claudia Hulmes, Daniel Innes, Isobel Irvine, Munro Kellock, Yoon-Joo Kim, Kyle Laing, Fiona Lavroff, Cara Lynch, Cameron MacFarlane, Thomas McAulay, Patrick McKenna, Connor Minnis, Shivam Mishra, Andrew Mobberley, Andrew Moffat, Edward Morgan, Gillies Munro, Kathryn Murie, Valdemar Nordstrom, Elena Papachristou, Hamish Strachan, Emily Payne, Agniete Pocyte, John Pritchard, Andrew Reilly, Gary Robertson, Francesco Sarandrea, Luciana Sinpetru, Neringa Siugzdinyte, Tomas Soltinsky, Calum Strain, Amy Teasdale, Best Thitasiri, Max Van Wyk de Vries, Anthony Wang, Andrew Williams, Craig Young, Hannah Adamson, Emma Andrews, Corrigan elma, Cameron Atkinson, Taylor Baird, James Bell, David Bradley, Chris Brash, David Brown, Duncan Bruce Holly Bryce, Rhiannon Cajipe-Stansfield, Steph Campbell,

Georgia Clark, Josh Clark, Alex Clements, Rachel Conway, David Currie, Jessica Davis, Zak Dean-Stone, Alberta Edwardes, Idenildo Ferreira, Craig Gilbertson, Tom Hardy, Connor Hay, Eilidh Hunter, Ryan Jamieson, Madi Kuhn, Samuel Lees, Summer Lewis, Alex Lyster, Sofie MacDonald, Torquil MacLeod, James Maroulis, Jonny Maxey, Dorothea Meath Baker, Anna Oprandi, Amar Parmar, Ben Pryce, Madeleine Reader, Callum Reid, Josh Reid, Aidan Rocke, Sahl Rowther, Nicolas Rooms, Enn Rusi, Cian Ryan, Agne Semenaite, Oliver Sharpe, Chris Smith, Emma Stam, James Steel, Brinley Terrell, Will Thwaites, Tu thong Tran, Morris Trestman, Laura Turnbull, Manos Tzivakis, Gordon Walker, James Weatherill, Andrew Whittington, Alex Williams'a teşekkür ederim.

Astrobiyoloji öğretme fırsatı sağladığı için Edinburgh Üniversitesine ve Fizik ve Astronomi Okuluna da teşekkür etmek istiyorum. Bu kitap üniversitede verdiğim Astrobiyoloji dersi etrafında yapılandırılmıştır. Dersler ve eğitimlerden sonra öğrencilerin geri bildirimleri ve onlarla yapılan tartışmalar, disiplinlerarası bilimlerle ilgili bilgilerini geliştirmede lisans öğrencilerinin öğrenmeleri için neyin yararlı olduğu konusundaki görüşümü bilemek bakımıdan büyük katkı sağlamıştır. "Astrobiyoloji ve Dünya Dışı Yaşam Arayışı" Devasa Açık Çevrimiçi Kursumuza (MOOC) katılan 50.000'den fazla öğrencinin geri bildirimlerine ve görüşlerine dayalı olarak içerik ve seviye açısından daha fazla iyileştirme yapılmıştır.

Kitaptaki bazı görseller dostlarım, meslektaşlarım ve iletişim kurduğum Lynn Rothschild, Ralf Kaiser, Jonathan Clarke ve Victor Tejfel gibi kişiler tarafından sağlanmıştır. Görüntüleri çoğaltma izni için *Astrobiology* dergisine teşekkür etmek istiyorum. Kitapta herhangi bir hata varsa tamamen benim sorumluluğumdadır.

Rachael Ballard, Audrie Tan ve Fiona Seymour da dâhil olmak üzere Wiley'deki ekibe bu kitabı hayata geçirdikleri için teşekkür etmek istiyorum. Sue Bowler ve Kai Finster'a, yayımlanmadan önce kitabı kapsamlı bir şekilde gözden geçirdikleri için teşekkürler.

Charles S. Cockell

Tamamlayıcı Web Sitesi Hakkında

Bu kitaba eşlik eden bir web sitesi eşlik etmektedir:
www.wiley.com/go/cockell/astrobiology
Web sitesi şunları içerir:

- Bölümlerin her biri için slayt setlerinden oluşan eksiksiz bir astrobiyoloji ders kursu.
- Bölümlerle ilgili sınav soruları.
- Astrobiyoloji Periyodik Tablosu
- Diğer materyaller.

1

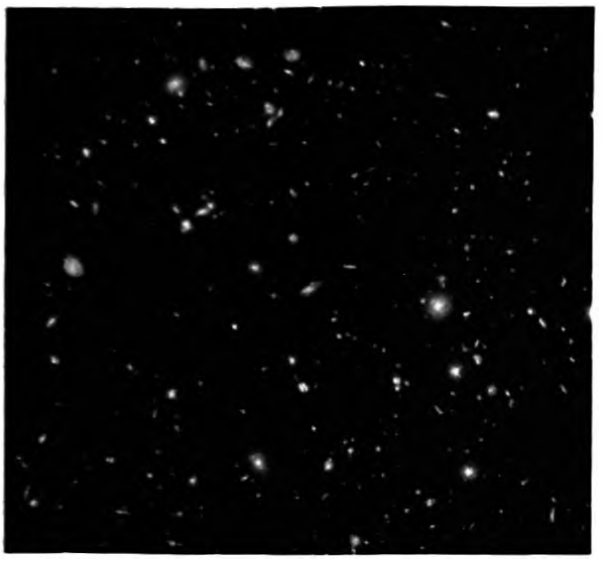
ASTROBİYOLOJİ VE YAŞAM

Öğrenme Çıktıları

- Yaşamı kozmik bağlamında inceleyen astrobiyolojinin; yaşamın evrendeki kökeni, evrimi ve dağılımıyla ilgilendiğini anlamak.
- Astrobiyoloji tarihinin bazı yönlerini ve astrobiyolojinin bir bilim dalı olarak nasıl ortaya çıktığını bilmek.
- Astrobiyolojinin temel sorgulamalarını oluşturan birtakım ayrıntılı bilimsel soruları anlamak.
- Yaşam tanımındaki bazı karmaşıklıkları ve işlevsel tanımlarını nasıl oluşturabileceğimizi anlamak.

1.1 Kitap Hakkında

Amacı kozmik ortamı içerisinde yaşamı –astrobiyolojiyi– anlatmak olan bir kitabı nasıl şekillendireceğine karar vermek pek kolay bir iş değil. Bu, başlangıç seviyesinde bile olsa konuyu hakkını vererek anlatmak için astronomi, biyoloji, kimya, jeoloji, gezegen bilimi, fizik, sosyal bilimler gibi bilim dallarının iyice anlaşılmasını gerektiren zorlu bir iş. Başkalarının bu soruna nasıl yaklaştığını görmek için çok sayıda kitap okudum ve işe en baştan başlamanın mantıklı yollardan biri olduğunu gördüm. Büyük patlamayla birlikte, birinci nesil yıldızlar ortaya çıkar ve daha sonra bu yıldızların ölüp patlamasıyla yaşam için gerekli olan elementler evrene saçılır (Şekil 1.1). Gezegenler yeni yıldızların etrafında oluşmaya başlar. Bu gezegenlerden bazıları yaşamaya elverişlidir ve en az birinde yaşam ortaya çıkar. Yaşam, tek hücreli organizmalardan hayvanlara geçiş yaparak büyür ve tüm bu süre boyunca yok oluşlarla zarar görür. Nihayetinde, uzak yıldızları çevreleyen gezegenleri bulmaya kararlı bir zekâ gelişmeye başlar ve diğer uygarlıkları bulmak üzere işe koyulur.



Şekil 1.1 Astrobiyoloji, yaşam olgusunu kozmik bağlamında anlamaya çalışır. Hubble Uzay Teleskobu tarafından görüntülenen bu 'ultra derin alan', hem görünür hem de kızıl-altı ışıkta gözlemlenebilir evren boyunca yaklaşık 10.000 gökada içerir. En küçük, en kırmızı gökadalar, evrenin sadece 800 milyon yıllık olduğu dönemdeki en genç olanlar arasındadır. [Kaynak: NASA, ESA, H. Teplitz ve M. Rafelski (IPAC / Caltech), A. Koekemoer (STScI), R.Windhorst (Arizona Eyalet Üniversitesi) ve Z. Levay (STScI)].

Bu güzel hikâye, bir kitabın bölümlerini oluşturmak için mantıklı bir temel sağlar. Kronolojik hikâyenin belli bir ritmi ve bundan dolayı ortaya çıkan bir karmaşıklığı vardır. Birçok astrobiyoloji metninin benimsediği yaklaşım da budur.

Ancak, ben bu yolu izlememeye karar verdim. Bu kitap yaşama dair bildiğimiz tek verinin, Dünyadaki yaşamın, incelenmesiyle başlıyor. Yaşam için gerekli olan elementlerin büyük patlamadan sonra nasıl üretildiğini ya da yaşanabilir bir ortamın neden bazı özelliklere ihtiyaç duyduğunu veya yaşamın ortaya çıkması için neden belirli moleküllerin gerekli olabileceğini araştırmak istiyorsak, önce biyoloji hakkında bilgi edinmemiz gerekiyor. Bu özelliklerin nasıl mümkün kılındığını sorgulamak için yapılarını, gereksinimlerini ve hangi koşullar altında varlıklarını sürdürebileceklerini anlamamız gerekli.

Maddenin temel özelliklerine ve bu özelliklerin yaşam moleküllerinin yapısını nasıl desteklediğine göz atarak işe başlıyoruz. Daha sonra bu moleküllerin canlı hücrelerin ana bileşenlerinde nasıl bir araya getirildiğini göz önüne alıyoruz. Yaşamın yapısı hakkındaki sağlam bir bilgi birikimiyle, yeryüzündeki yaşama özgü olabilecek ya da herhangi bir yerdeki yaşam hakkında bir şeyler öğrenebileceğimiz faktörlere her zaman dikkat ederek hücrelerin büyümek ve çoğalmak için ihtiyaç duydukları enerjiyi nasıl elde edebildiklerini düşünerek ilerliyoruz.

Daha sonra canlılar hakkındaki bilgilerimize dayanarak, Dünya üzerindeki tüm canlıların yaşam ağacıyla nasıl ilişkili ya da bağlantılı olduğunu keşfediyoruz. Bu ağacın gezegenlerdeki yaşanabilirliğin sınırlarındaki zorlu ortamlarda ne kadar çeşitli ya da geniş olabileceğini tanımlayan fiziksel ve kimyasal sınırlamaların neler olduğunu araştırıyoruz.

Bu noktada Dünya üzerindeki bildiğimiz yaşamın yapısı, ilişkileri ve yetenekleri hakkında sağlam bir anlayışla donatılmış durumdayız. Sıra bunu kozmik bağlam içerisinde incelemeye geliyor.

İlk olarak yaşamın nasıl ortaya çıkmış olabileceğine bakacağız. Bunun için evrenin başlangıcına dönerek, yıldızların ve gezegenlerin nasıl oluştuğunu incelemeye başlıyoruz. Yaşam için gerekli olan elementlerin nasıl ve nerede oluştuğuna dair bir cevap bulabilmek için, kitapta bahsedilen belirgin astronomik değişimler önemlidir. Özellikle, evrendeki karbon bileşiklerinin oluşum koşullarını inceleyeceğiz.

Yaşama ait elementlerin, özellikle de karbonun oluşumunun yaşamın başlangıcına nasıl yol açtığını anlamaya başlamak için, Dünyanın erken dönemindeki koşullar hakkında bir şeyler bilmemiz gerekiyor (bu kitapta, daha sonra tartışılacak nedenlerden dolayı, yaşamın Dünyada ortaya çıktığını varsayıyoruz). O dönemde Dünyada ne tür ortamların ve habitatların olabileceğini anlamak için ilk bir milyar yıl boyunca gezegenimizin sahip olduğu çevresel özellikleri inceleyeceğiz.

Yaşamın bu erken çevrede nasıl ortaya çıkmış olabileceği bir sonraki sorumuz olacak. Yaşamı doğurabilecek kimyasal reaksiyonları ve ortamları göz önünde bulunduracağız. Kimyasal reaksiyonların kendi kendilerini kopyalayan ilk hücrenin oluşumuna nasıl yol açtığı gibi, basit öncüllerin biyolojinin makromoleküllerini oluşturmak için bir araya gelmelerine izin veren reaksiyonlarla ilgili bazı fikirleri tartışacağız.

Bunu, kayaç kayıtlarında korunmuş yaşam kanıtlarına ilişkin karmaşıklıkların ve tartışmaların bazılarını gözden geçirerek ve Dünya üzerinde ilk organizmaların ortaya çıktığı, ilk yaşama ilişkin kanıtları değerlendirerek yapacağız. Bu problemler, yaşamın devamlılığının sağlanabileceği yapı, enerji kaynakları ve ortamlar hakkında edindiğimiz bilgilerden tamamen faydalanır.

Şimdi geriye doğru başka bir adım daha atmanın ve ilk bir milyar yılın gezegenimizin tüm tarihinin içine nasıl sızdığını düşünmenin zamanı geldi. Jeologların kayaları nasıl tarihlendirdiğini, Dünyanın tarihini nasıl bir düzen içerisinde anlamlandırdıklarını, hayvanların ortaya çıkışı da dâhil olmak üzere ilk bir milyar yıldan sonra meydana gelen önemli geçişlerin bazılarını tartışacağımız bir bölüme başlayacağız.

Gezegenin tarihine ilişkin kapsamlı bir görüşle, tüm bu sürecin oldukça düzgün ve yapılandırılmış olduğunu düşünmek oldukça cezbedici olabilir. Tek hücreli organizmalar önce hayvanlara daha sonra da zekâ sahibi canlılara evrildiler. Ancak, sonraki iki bölüm bu durumun neden böyle olmadığını ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Gezegenimizin geçmişinde meydana gelen atmosferdeki oksijenin yükselişlerini ve kitlesel yok oluşları araştırarak, bir gezegende yaşamın ortaya çıkmasının ve bir milyar yıllık zaman ölçeğindeki başarısının asteroit etkileri de dâhil olmak üzere bir çok zorlukla dolu olduğunu görebiliriz (Şekil 1.2). Bu değişimlerin bazılarından yaşamın kendisinin sorumlu olduğunu göreceğiz. Bu zorluklar ve gezegen ile yaşamın ortak evrimi sırasında ortaya çıkan fırsatlar evrensel midir? Bu soru ilerledikçe tartışılacak, ancak Dünya üzerindeki yaşamın tarihi hakkında düşündüğünüz herhangi bir zamanda bunu aklınızda tutmak isteyebilirsiniz.



Şekil 1.2 *Büyük bir asteroitin Dünyaya çarpması sonucu oluşan etkilerin, dinozorların -bu uçan sürüngenlerin (pterosaurlar)- ve Kretase'nin sonundaki diğer birçok yaşam formunun neslinin tükenmesine yol açtığı düşünülmektedir. Bu nedenle, Dünyadaki yaşamın geçmişini anlamak için, astrobiyolojinin temel hedeflerinden biri olan gezegenimizin astronomik ortamını araştırmamız gerekir*
(Kaynak: NASA).

Bu aşamada Dünya gezegeninin, tarihi, yaşamı, jeolojisi hakkında neredeyse eksiksiz bir anlayışa sahibiz. Özünde yaşamı, özelliklerini, yaşamın nasıl şekillendiğini ve çevresini nasıl şekillendirdiğini bildiğimiz bir gezegeni ayrıntılı bir şekilde anladığımızdan bahsettik. Bu noktada bu bilgiyi alıyoruz ve kozmik bağlamı daha da genişletiyoruz.

İlerleyen bölümlerde, Dünya hakkında bildiklerimizi ele alıyoruz ve yaşanabilir bir gezegeni neyin tanımlayabileceğini ve evrende bu tür ortamların nerede bulunabileceğini değerlendiriyoruz. Eve -kendi Güneş Sistemimize- yakından bakarak, Mars ve buzul ayların Dünyayla nasıl karşılaştırıldığını araştırıyoruz. Güneş sistemimizdeki diğer gezegenler yaşanılabilir mi? Buradan hareketle Güneş Sistemi dışındaki gezegenleri araştırmak için kullanılan yöntemleri inceleyerek, farklı özelliklerini (Şekil 1.3) ve bu gezegenler üzerinde yaşamı nasıl araştırabileceğimizi belirleyerek kendi evrenimizdeki milyarlarca diğer gezegenin durumlarını değerlendiriyoruz.



Şekil 1.3 *Bu yapıtın açıkça ortaya koyduğu gibi, diğer yıldızların etrafındaki kayalık dünyaların tespiti bize Dünya benzeri gezegenlerin kozmosta ne kadar yaygın olduğu konusunda istatistiksel bir değerlendirme imkanı, çeşitliliklerinin bir analizi ve tespit edilebilir yaşamın bolluğunu belirleme imkanı sunuyor.*
[Kaynak: NASA / JPL Caltech / R. Zarar (SSC-Caltech)].

Kitabın son bölümlerinde Dünya dışı zekâyı ve evrende iletişim kurabileceğimiz başka zekâ sahibi canlılar olup olmadığını ele alıyoruz. Kendi medeniyetimizin geleceğini ve kaderini düşünüyoruz.

Her bölüm, yaşam ve kozmos arasındaki bağlantının belirli bir yönü hakkında bir metin sunar. Astrobiyolojinin bazı ilkelerini her bölümün kendi konusu kapsamında özenle detaylandırmaya çalıştım.

Ayrıca kitapta kullandığım birimlerin en başından itibaren tutarlı olmadığını fark edeceksiniz. Örneğin, mikroorganizmaların büyüme sıcaklıkları genellikle santigrat dereceyle ifade edilirken, gezegen yüzeylerinin sıcaklığı genellikle Kelvin cinsinden ifade edilir. Farklı bilimsel alanlar, farklı birimleri kullanma eğilimindedir ve ben tam bir tutarlılık yaratmak yerine, normalde kullanılmadıkları olgular için görünüşte garip birimlerin kullanılmasıyla sonuçlanacak olan bu eğilimi sürdürmeye devam ettim. Bu farklılıklar astrobiyolojinin disiplinler-arası olduğunu vurgulamaktadır.

Aynı zamanda bölümler faydalı olabileceğini düşündüğüm bilgi kutuları içeriyor. Bu kutular sizlere, astrobiyoloji kapsamında başkalarıyla tartışmaya veya kendi kendinize düşünmeye değer bazı tartışma konuları sunuyor. Bunlar hiçbir şekilde teferruatlı konular olmamakla birlikte başka tartışmaları teşvik etmek veya yeni sorular sormanızı sağlamak için kullanmanız gereken bilgilerdir. Kitabın çeşitli yerlerinde astrobiyologların kullandığı bazı önemli araçlar hakkında kutular yazdım. Astrobiyologların laboratuvarda kullandıkları çok sayıda teknik vardır, ancak uzay teleskopları gibi uluslararası koordinasyona sahip bazı büyük araçlar bilimin erişimini önemli ölçüde genişletmektedir. Ayrıca size uluslararası bilimin modern doğasının lezzetini sunmaktadırlar.

Bana öğrenciler tarafından, "Astrobiyoloji konusunda çalışmak için hangi lisans eğitimine ihtiyacım var?" sorusu sık sık soruluyor. Herhangi bir lisans eğitimi, bir kişinin astrobiyolojiyi farklı açılardan keşfetmesini sağlar. Bilim, dar disiplin tanımları nedeniyle meraklı zihinlere asla kapatılmamalıdır. Bu yüzden kitap boyunca astrobiyologlar hakkında bazı kişisel bilgiler, uzmanlık alanları ve onları nelerin motive ettiğini içeren bilgi kutuları var. Astrobiyoloji alanında birçok başarılı insan var ve bu kitaba hangilerinin dâhil edildiğinin veya edilmediğinin bir önemi olmadığını vurgulamak istiyorum. Seçimlerimi yaparken, astrobiyologların geldiği disiplinlerin çeşitliliğini örneklendirmeye dikkat ettim.

Bölüm sonlarına, bölümün konusuyla alakalı bazı kitap ve yayınlar ilave ettim. Bu belki de bu süreçteki en zor işti. Tüm temel katkıları listelese de astrobiyolojiyi içeren her alanda var olan tüm literatüre hâkim olmak imkânsızdır. Bunun yerine, her bölümle ilgili bazı İleri Okumalar sağlayabilecek iki veya üç popüler kitap önerdim. Ayrıca bir dizi yayın da listeledim. Bunlar, ilgili okuyuculara her bölümde ele alınan ana temalar ve konularla ilgili yol gösterebileceğini düşündüğüm yayınlar. Yine, birçok önemli makalenin buraya dâhil edilmemesine hiçbir önem verilmemelidir.

1.2 Astrobiyoloji ve Yaşam

Bir bilim kitabına tarih boyunca tartışılan bir konuyla başlamak garip gelebilir, ancak astrobiyolojiye doğru bu yolculuğa başlarken, ne hakkında konuştuğumuz konusunda hemfikir olmamız gerekiyor.

İlk olarak, "astrobiyoloji" terimiyle neyi kastediyoruz ve bu terim nereden geliyor? İkincisi, bu kitapta "yaşam" kelimesinden düzenli olarak bahsedilecek; "Evrende Yaşam", "Zorlu Koşullarda Yaşam", "Marsta Yaşam", "Dünya Dışı Yaşam", "Dünyada Yaşam"... Bütün bu yaşamla ilgili söylemlerle, belki de "yaşam" kelimesiyle tam olarak neyi kastettiğimizi kabul etmeye çalışmalıyız. "Çalışmalıyız" diyorum çünkü yüzyıllardan beri süre gelen, "yaşamı" tanımlamaya yönelik çabaların bu kitapta çözülmeyeceğini belirtmek isterim (ve kısa bir süre sonra tartışacağımız gibi bir çözüm bile olmayabilir). Bununla birlikte, astrobiyolojiye yapacağımız bu yolculuk sırasında bize yardımcı olacak işe yarar bir tanımda hemfikir olmak için en azından yaşam derken neyi kastettiğimizle ilgili yararlı bir tartışmaya girebiliriz. İlerleyen bölümlerde, modern astrobiyolojinin ne olduğunu keşfedip, tarihini gözden geçirelim ve kitabın geri kalanı için işlevsel bir yaşam tanımı yapıp yapamayacağımızı görelim.

1.3 Astrobiyoloji Nedir?

Öyleyse, bu kitabın ana konusu olan "astrobiyolojiyle" başlayalım. Bu nasıl bir bilim alanıdır?

Astrobiyolojiyi, geniş evrensel ortamda yaşam olgusunu anlamaya çalışan soruları inceleyerek biyolojik bilimler, yer bilimleri ve uzay bilimleri arasında kendine yer bulan, disiplinlerarası bir bilim dalı olarak özetleyebiliriz. Astrobiyoloji terimi 1950'lerde ortaya çıkmasına rağmen, bu bilim dalı mikrobiyoloji, kimya, yer bilimleri, gezegen bilimleri ve astronomi alanlarındaki çabalarla birlikte yeni bir ivme kazandı.

Hiçbir bilim dalının sabit, kısıtlanmış ve önceden belirlenmiş soruları yoktur, ancak çoğu bilim dalı kendi çalışma alanlarının ne olduğunu başarılı bir şekilde sınırlandıracak genel sorulara sahiptir ve bu sorular astrobiyoloji için de tanımlanabilir. Astrobiyolojinin en az dört büyük soruya cevap aradığı söylenebilir: Yaşam nasıl ortaya çıktı ve çeşitlendi? Yaşam bir gezegenle birlikte nasıl gelişir? Dünyanın ötesinde yaşam var mı? Dünyadaki yaşamın geleceği nedir?

Kuşkusuz, astrobiyolojideki en etkili sorulardan biri 'Evrende yalnız mıyız?' sorusu veya evrendeki tek yaşam türü olup olmadığımızla alakalı benzer sorulardır. Bu, yaşamın kozmik bağlamına nasıl uyum sağladığını düşünürken sorulacak en belirgin sorulardan biri. Bu soru her ne kadar halkın hayal gücünü ele alsa da astrobiyoloji tarafından sorulan çok büyük sorulardan sadece bir tanesi. Bununla birlikte, önemli bir soru olması gayet makul. En az 150 milyar gökadanın ve her gökadada yaklaşık 200 milyar yıldızın bulunduğu bir evren-

de, evrimi deneyimleyen tek gezegenin Dünya olup olmadığını keşfetmek mantıklı bir sorgulama gibi görünüyor. Büyüklüğe bağlı hata payını da göz önünde bulundurursak, bu sayılar bize evrende keşfedebileceğimiz yaklaşık 10^{22} yaşanabilir gezegen olduğunu gösteriyor. Görüldüğü gibi evrende, astrobiyologların ilgisini çekecek gezegenimsiler konusunda hiçbir kıtlık bulunmamaktadır.

Astrobiyoloji, kozmik çevreyle olan bağlantılarını anlamadan Dünyadaki yaşamı tamamen anlamanın zor olduğunu kabul eder. Dünya sakin bir yere benziyor (Şekil 1.4). Ancak, astronomik ortamının aşırılıklarına maruz kalmakta. Örneğin yaklaşık 65 milyon yıl önce bir asteroit veya kuyruklu yıldızın Dünya üzerindeki etkisi, dinozorların neslinin tükenmesiyle ilgili önde gelen bir hipotezdir. Bu hipotez, yeryüzündeki geçmiş yaşamı anlamak için astronomik çevrenin yaşamı nasıl etkilediğini anlamamız gerektiğini vurgulamaktadır. Sonunda, Güneşin parlaklığı yeterince yüksek bir değere ulaştığında, Dünya okyanusları buharlaşacak ve gezegen kaçak bir sera etkisine maruz kalacaktır. En nihayetinde Dünya, Venüs benzeri bir gezegene dönüşecektir (Şekil 1.5). Bu nedenle, Dünyadaki yaşamın geleceğini anlamak için astronomik çevremizi de anlamamız gerekir. Yıldızların nasıl doğduğunu ve öldüğünü bilmeliyiz. Dünyadaki yaşamın geçmişini ve geleceğini araştırmak, cevaplara ulaşmak için Dünyanın ötesine bakmamız gerektiği anlamına gelir.

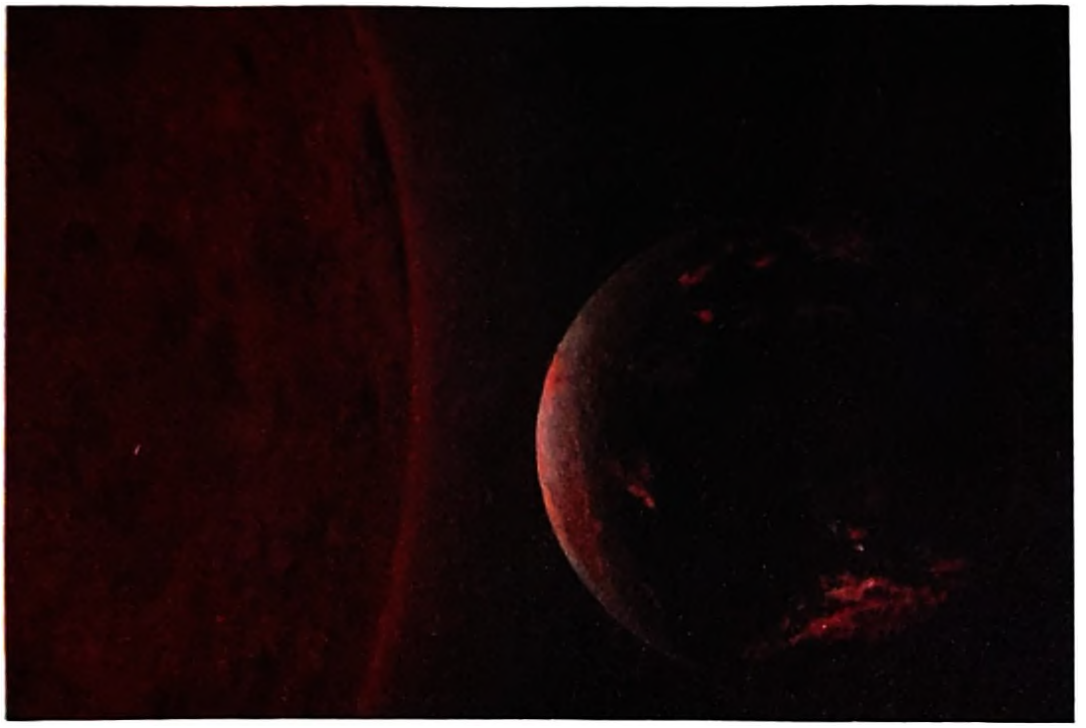
Astrobiyolojideki bazı önemli soruların neler olduğunu belirledik. Bu geniş kapsamlı sorgulamaların yer aldığı diğer bazı soruları inceleyelim.

İlk önce yaşamın nasıl başladığıyla yola çıkıyoruz. Astrobiyoloji yaşamın kökeniyle ilgilenir. Yaşam nasıl ve nerede ortaya çıktı? Bu ortaya çıkış kaçınılmaz mıydı? Ne zaman gerçekleşti? İlk yaşamın kanıtı nedir? gibi soruların hepsi bu araştırma alanının kapsamı içerisindedir.

Yaşam bir kez Dünyaya yayıldığında sınırlarının ne olduğunu merak ediyoruz. Yaşamın fiziksel ve kimyasal sınırlarının –dayanabileceği en zor koşulların– neler olduğunu bulabilirsek diğer gezegenleri yaşam alanları olarak değerlendirmeye başlayabiliriz. Bu bilgi aynı zamanda insan faaliyetlerinin



Şekil 1.4 Yaşamı barındıran bir gezegene dair sahip olduğumuz tek veri, Dünya. Astrobiyoloji, yaşam olgusunun nasıl ortaya çıktığını ve bunun evrende benzersiz olup olmadığını anlamaya çalışır. Burada, 1968'de Apollo 8 tarafından çekilen bu ikonik görüntüde, Dünya Ay manzarasının üzerinde yükseliyor. Bu görüntüye bazen 'Dünyanın Doğuşu' da deniyor (Kaynak: NASA).



Şekil 1.5 Güneş, bundan birkaç milyar yıl sonra Kızıl Dev bir yıldıza döndüğünde, Dünyadaki tüm yaşamlar çoktan sönmüş ve okyanuslar kaynayarak buharlaşmış olacak. Bu nedenle gezegenimizdeki yaşamın geleceğini anlamak için yıldızların evrimi hakkında bilgi sahibi olmamız gerekir. Biyoloji ve astronomi astrobiyolojide ayrılmaz bir şekilde birbirine bağlıdır
(Kaynak: Fsgregs aracılığıyla wikicommons).

ve endüstrinin biyosfer üzerindeki etkisinin ne olduğunu değerlendirmemize yardımcı olmaktadır. Astrobiyologları büyüleyen sorular arasında şunlar bulunmakta: Yaşamın sınırları nedir? Yaşam, fiziksel ve kimyasal uçlarda nasıl yaşamda kalır? Bu sınırlar evrensel midir? Bu sınırlar, yaşanabilir koşullar veya başka bir yerde yaşamın olası varlığı hakkında bize ne söylüyor? Bu düşünceler, bizi derin okyanuslardan Antarktika'nın donmuş bölgelerine kadar, zorlu ortamlardaki yaşamı incelemeye itiyor.

Yaşamın nasıl ortaya çıktığını ve zorlu gezegen koşullarında yaşama yeteneklerinin ne olabileceğini bilmek bir şey, fakat Dünyadaki tüm organizmalar nasıl birbiriyle ilişkili? Dünyadaki yaşamın çeşitliliği olağanüstü. Organizmaları birleştiren şey ve aralarındaki ilişki nedir? Astrobiyologlar, çeşitli organizmalar arasındaki evrimsel bağlantıyı şu sorularla daha iyi anlamak istiyor: Yaşam nasıl birleşti? Çok hücreli yaşamın ortaya çıkışını ne tetikledi? Yaşam için ana felaketler ve kitlesel yok oluşların etkileri nelerdi?

Daha sonra bu engin evrimsel deneyin benzersiz olup olmadığı ve evrendeki diğer gezegenlerin yaşamı barındırıp barındıramayacağıyla ilgili derin bir soruyla karşı karşıya kalıyoruz. Astrobiyolojideki bu merkezi soru şu alt sorularla özetlenebilir: Başka bir yerde yaşam var mı? Varsa, nasıl bir şey? Başka bir

yerde yaşam yoksa Dünyada mevcut olan yaşam başka bir yerde neden olmasın ve eksik olan nedir? Daha özel, ancak yine de çok ilginç, bir dizi soru da tanımlanabilir: Zeki canlıların ortaya çıkması kaçınılmaz mı ve ilk olarak başka bir yerde mi ortaya çıktı? Başka bir yerde evrildilerse, onlarla iletişim kurabilir miyiz? İletişim kurarsak ne olur?

Son olarak, elbette, kendi medeniyetimizi de unutmamalıyız. Geleceğimiz, diğer tüm organizmalar gibi, yaşamın evriminin bir parçası ve bu gelecek bizden birçok soru sormamızı ister: İnsanlar Dünyayı kalıcı olarak terk edecek mi? Diğer gezegenlere nasıl yerleşiriz? Uzaya yerleşirken Dünyayı nasıl koruruz? Yeni gezegenlere nasıl adapte olacağız? Toplum bu çevrede başarıyla genişletilebilir mi? Bunlar bilimsel sorulardan ziyade daha teknik sorular, ancak astrobiyolojinin insan toplumu üzerindeki uygulamaları için de bir o kadar önemliler. Bu sorular bizi kozmostaki yerimizle ve yaşam hikayesiyle yüzleşmeye zorlayarak, astrobiyoloji ile beşerî bilimler ve sosyal bilimler arasında doğrudan bağlantılar oluşturuyor.

1.4 Astrobiyolojinin Tarihi

Astrobiyolojideki ana soruları araştırıp bunları özetledikten sonra, bu sorgulamanın ne zaman başladığını kendimize sorabiliriz. Astrobiyoloji, felsefi açıdan, çok eski bir bilimdir. Maddenin atom teorisini öneren ilk kişilerden biri olan Demokritos'un (MÖ 460–370) öğrencisi Yunan filozofu Sakızlı Metrodoros (MÖ 4. yüzyıl; Şekil 1.6), "Büyük bir ovada tek bir buğday başağının çıkması veya sonsuzlukta tek bir Dünyanın olması şaşılası olurdu." demiştir. Yunanlar, evrenle ilgili bizim bugün sahip olduğumuzdan çok daha farklı bir görüşe sahipti. Gezegenlerin kayalık yapıya sahip olmaları veya yıldızlara olan uzaklıklarıyla alakalı doğru dürüst bir fikirleri yoktu. Açıkçası, tüm yıldızların büyük bir kürenin yüzeyinde tutulduğunu düşünüyorlardı. Metrodoros'un beyanı, yine de Dünya benzeri gezegenlerin potansiyel çokluğu üzerine kayda değer bir bakış açısıydı. Metrodoros'un Dünyaya dair görüşü, Dünyanın evrendeki benzersizliğini ortaya koyan Platon'un (MÖ 428–348) ve Aristoteles'in (MÖ 384–322) gö-



Şekil 1.6 Yunan filozofu Sakızlı Metrodoros (Kaynak: wikicommons, Keith Schengili-Roberts).

rüşlerinden çok farklıydı. Aslında Dünyanın evrenin merkezi olduğu fikri, yıldızlarla aramızdaki büyük mesafeden dolayı değil, Yunanlar tarafından yanlış yorumlanan, Dünyanın sabit konumundan dolayı yıldızların yerlerini korudukları gözlemine dayanmaktaydı. Aristoteles'in görüşü yüzyıllar boyunca egemen oldu. Aydınlanma çağına kadar, Dünyanın kozmosta yaşanabilir tek gezegen olduğu fikri, dini öğreti tarafından da desteklenerek halk arasında yaygınlığını sürdürdü.

On altıncı yüzyılda, Dünyayı kesin olarak her şeyin merkezine yerleştiren evrenin yermerkezli görüşü, Nikolas Kopernik (1473–1543) tarafından altüst edildi. Kopernik'in bakış açısı, yeni ortaya çıkan, yıldızların diğer güneşler olabileceği fikrinin öncüsü olmuştur. On yedinci yüzyılda, daha sorgulayıcı ve meraklı beyinler ortaya çıktı ve onlarla birlikte, Dünyanın daha büyük bir düzendeki yeri hakkında yeni spekülasyonlar gün yüzüne çıktı. Dünyanın ötesindeki alemler hakkındaki en şaşırtıcı spekülasyonlardan biri, İtalyan astronom ve filozof Giordano Bruno (1548–1600; Şekil 1.7) tarafından *Sonsuz Evren ve Dünyalar Üzerine* adlı kitabında yapılmıştır: "Uzayda sayısız takımyıldızları, güneşler ve gezegenler var; bizler sadece güneşleri görüyoruz çünkü ışık saçıyorlar; gezegenler görünmez kalıyorlar, çünkü küçük ve karanlıklar. Güneşlerinin etrafında dolanan sayısız dünya da vardır, yaşadığımız dünyadan daha kötü ve daha az değil. Makul bir akıl, bizimkinden çok daha muhteşem olabilecek semavi varlıkların, Dünyamızdakilere benzer ve hatta üstün canlılar olmadıklarını varsayamaz". Bu, Güneş Sistemi dışında gezegenlerin var olma olasılığıyla ilgili ileri sürülen bir ifadeydi ve bir insan bugün Dünya benzeri gezegenleri bulmanın neden bu kadar zor olduğunu açık bir şekilde özetlerken daha iyisini yapamadı. Bruno nihayetinde, Teslis ve İsa'yla alakalı Katolik Kilisesine aykırı inançları ve kilise papazları hakkındaki görüşleriyle ilgili çeşitli suçlamalar nedeniyle yakılarak öldürüldü. Bununla birlikte, bu suçlamalardan biri açıkça birden fazla 'dünya olabileceğini dile getirmesiyle alakalıydı. O zamanlarda, Güneş Sistemi dışındaki gezegenlerin varlığını tartışmanın infaz edilmek için bir gerekçe olduğunu hatırlamak üzücü.



Şekil 1.7 Diğer dünyalar hakkındaki spekülasyonları ('dünyaların çokluğu') ölümüne neden olan Giordano Bruno (Kaynak: wikicommons).

Aydınlanma sırasında teleskopun icadı, bilim insanlarının yeni ayları ve gezegenleri görmelerini sağladı. Bu gözlemlere, spekülasyonları azaltacağına inanıldığı için göz yu-

mulmuş olsa da daha fazla veri elde edildiği için bunun tam tersi bir etki oldu. Başka dünyalar için yeni kanıtlarla donanmış spekülasyonlar kontrolden çıktı.

Satürn'ün uydusu Titan'ı keşfeden ve sarkaçlı saati icat eden Christiaan Huygens (1629–1695), 1698'de ölümünden sonra yayınlanan *Cosmotheoros* [Kozmoteoriler] adlı kitabında Dünya dışı yaşam ve diğer gezegenlerin yaşanabilirliği üzerine yazdı. Venüs'teki gökbilimciler hakkındaki spekülasyonların yanı sıra, Dünya dışı zekâların geometriyi anlayabileceklerini öne sürdü. Müzik hakkında ise şunları söyledi: "Bu çok cesur bir iddia, ancak bildiğimiz kadarıyla doğru olabilir ve başka gezegenlerin sakinleri muhtemelen bizim keşfettiğimizden daha büyük bir müzik teorisi hakkında fikir sahibi olabilirler".

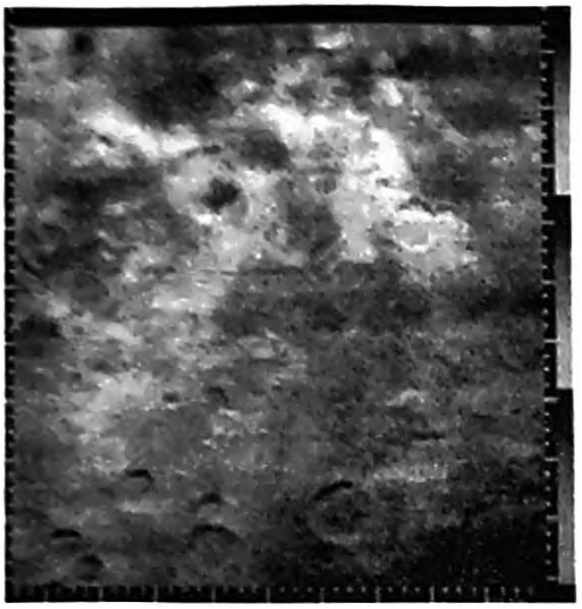
Uranüs'ü ve kızıl-altı radyasyonu keşfeden William Herschel (1738–1822), ayın tuhaf biçimde dairesel kraterlerini gözlemledikten sonra, bu kraterleri meydana getiren çarpışmaların kökeninin henüz bilinmediği bir dönemde kaleme aldığı el yazmalarında, "Bu konu üzerine biraz ışık tutarak, ayda gördüğümüz sayısız küçük dairesel şeklin ayın sakinlerinin eseri olduğu ve bu şekillerin onların 'Şehirleri' olarak adlandırılabileceği konusunda neredeyse ikna oldum." demiştir.

1909 yılında, kötü şöhretli Mars 'kanalları'nın gözlemcisi olan Percival Lowell (1855–1916) *Mars as the Abode of Life* [Yaşamın Mekânı Mars] adlı kitabında Mars'la ilgili "Her itiraz hem bu kanallardaki tuhaflıkları daha da fazla açığa çıkararak hem de bu gezegenin yaşanabilir olduğuna ilişkin genel kuşkuları ortadan kaldırarak kanalların yapıntı olduğu düşüncesinin güvenilirliğini artırmıştır." demiştir.

Bu tür alıntılarla devam edebiliriz (birçok ünlü bilim insanı ve filozof Dünya dışı yaşama ikna olmuşlardı), ancak bu üç alıntı iki noktaya değinmek için yeterli. Birincisi, uzay çağı ve gezegenlerin doğrudan ve yakından gözlemlenmesi amacıyla astrobiyolojiyi deneysel bir döneme zorlamak için beklemek zorunda kalacaktık; ikincisi, bu alıntılar geçmişten gelen birer uyarı. Dünya dışı yaşama inanma isteği, deneysel gözlemden mahrum olmamalıdır. Biyolojik olmayan bütün açıklamaların tükenmesinden sonra yaşam daima son açıklama olmalıdır.

Gezegen yüzeylerinin fotografik incelemelerinin diğer gezegen yüzeylerine ait yeni ve deneysel olarak kısıtlı görüşler sunması, uzay çağının başlangıcındaydı (Şekil 1.8). Genel olarak, diğer gezegenlerin yaşamdan yoksun olduğunu gösterdiler ve bu, önceki iyimserlikten daha güçlü bir geri çekilmeye yol açtı. Bununla birlikte, astrobiyoloji, bir dizi öncü deney ve keşifle birlikte deneysel alemlere girdi ve bu durum onu daha önceki felsefi dayanaklarından bir bilim dalı olarak bugünkü konumuna getirdi.

1950'ler ve sonrasındaki laboratuvar deneyleri, Dünya üzerindeki koşulları taklit ederek amino asitlerin ve yaşamın diğer yapı taşlarının üretimini gösteren, yaşamın kökeni çalışmalarını laboratuvara taşıdı. 1980'lerde ve sonrasında Dünyadaki fosil yaşamın üç milyar yıldan fazla bir süredir korunan kanıtlarının yayınlanması, Dünya üzerindeki ilk yaşam arayışını ve yaşamın ortaya çıkış zamanını bilimsel bir arayışa dönüştürdü.



Şekil 1.8 15 Temmuz 1965'te Mariner 4 gemisi tarafından çekilen Mars'ın ilk yörünge fotoğraflarından biri, yaşam için uygun olmayan ölü ve kurumaya maruz kalan bir ortam ortaya koydu. Gösterilen alan 262 × 310 km'dir ve Amazonis Planitia'ın güneyinde bulunan yoğun kraterli bir bölgedir (Kaynak: NASA).

Diğer gezegenlerdeki yaşam arayışı için ilk deneysel araştırma, 1976'da Mars'a iniş yapan Viking adlı uzay aracında robotik olarak gerçekleştirilen biyoloji deneyleriydi ve bu deneyler belirsiz sonuçlar verdi, ancak yine de bu arayışta bilimsel yöntemlerin uygulanabilirliğini gösterdi. 1970'lerde, sosyal ve etik çıkarımların tümüyle mesajların diğer medeniyetlere aktarılması için girişimlerde bulunuldu. Tepki olmamasına rağmen, Dünya dışı zekâ arayışı ve iletişim kurma çabaları astrobiyolojinin sosyal bilimlerle kesişmesi konusunda güçlü bir tartışma başlattı.

Jüpiter'in uyduları Europa ve Ganymede ile Satürn'ün uydusu Enceladus gibi, Mars'ın ötesindeki soğuk bölgelerde konumlanan gezegenlerdeki sıvı su okyanuslarının ve Satürn'ün bir diğer uydusu Titan'daki karmaşık organik karbon kimyasının keşfi, diğer gezegenlerdeki yaşanabilirliği ve organik kimyayı şaşırtıcı yerlerden öğrenebileceğimizi gösterdi (Şekil 1.9). Son yıllarda, gezegenlerin, özellikle de kayalık gezegenlerin, Güneş Sistemi dışındaki yıldızların etrafında keşfedilmesi (ötegezegenler), astrobiyolojinin gelişmesini ve evrenin başka yerlerinde yaşanabilir dünyaların var olma ihtimalini istatistiksel olarak değerlendirmemizi sağlamıştır.

Bu deneyler ve keşifler, yirminci yüzyılın ortasından itibaren, bugün bildiğimiz gerçek deneysel bilim olarak astrobiyolojinin oluşmasını sağladı.

Tarih boyunca, bilimi tanımlamak için farklı terimler kullanılmıştır; bu, eğer ilgilenmezseniz, çok fazla kafa karışıklığına neden olabilir. Yirminci yüzyılın ortalarında, ilk defa kullanılmasa da 'astrobiyoloji' Gavriil Tikhov'un 1953 tarihli kitabının adıydı (1875–1960; Şekil 1.10). Bu kitap diğer gezegenlerdeki yaşam olasılığını araştırıyordu. Tikhov, diğer gezegenlerde bitki örtüsü aramak için bitki örtüsünün spektroskopisini kullanma ve hatta Kazakistan Bilim Akademisine bağlı bir Astrobotanik Sektörü kurma fikriyle büyülenmişti. Me-

todları ve fikirleri, ötegezegenlerdeki biyokimyaları aramak için spektroskopi kullanımının öncüleriydi.



Şekil 1.9 Satürn'ün uydusu Enceladus'un güney kutup bölgesinden çıkan su buharı dumanları, yaşanabilir koşulların Dünyanın ötesinde var olduğu hipotezini test etmek için deneysel bir temel oluşturan birçok keşiflerden sadece bir tanesidir (Kaynak: NASA).

1960 yılında, bakteriyoloji ve moleküler biyolojide öncü olan ve bakteriyel genetik üzerine çalışmasıyla Nobel Ödülünü kazanan Joshua Lederberg (1925–2008; Şekil 1.11), Dünya dışı yaşam arayışını tanımlamak için **ekzobiyoloji** terimini kullandı. Daha sonraları, kozmobiyoloji, ksenobiyoloji ve biyoastronomi gibi terimler de gökbilimciler tarafından kullanıldı.

Günümüzde astrobiyoloji kelimesi yalnızca Dünyanın ötesindeki yaşam arayışı değil, aynı zamanda Dünya üzerindeki yaşamın geçmişini de araştıran, genel olarak kozmik bağlamı içerisinde yaşam araştırması anlamına gelen geniş bir kullanıma sahiptir.



Şekil 1.10 Astrobiyoloji *adlı bir kitap yazan ve Dünya dışı yaşamın göstergelerini aramanın bir aracı olarak spektroskopiye büyük ilgi gösteren Gavriil Tikhov, burada bitki örtüsünün spektroskopik belirteçlerini gözlemliyor.*



Şekil 1.11 20. yüzyılda Amerika Birleşik Devletleri'nde ekzobiyoloji çalışmalarında öncü olan Nobel Ödüllü Joshua Lederberg, Ekim 1958'de Wisconsin Üniversitesindeki laboratuvarında.

1.5 Yaşam Nedir?

Yaşamı tanımlama girişimlerine ilişkin arayış oldukça eskidir. Bir astrobiyoloğun bakış açısından yaşamın ne olduğu oldukça önemli bir tartışma konusudur. Eğer yaşamı başka gezegenlerde aramak veya Dünyadaki eski kayalıklarda bulmak istiyorsak, öncelikle neyi aradığımızı iyi bilmemiz gerekir.

Öncelikle, çalışmalarımızda ilerlemek için muhtemelen yaşamı doğru bir şekilde tanımlamamız gerekmediğini söyleyerek başlayalım. Yaşamın bazı özelliklerini veya temel süreçlerini kapsayan işlevsel bir tanım bulabiliriz. Örneğin, NASA bilim insanı Gerald Joyce tarafından yapılan oldukça kısa ve öz bir tanıma göre yaşam "Darwinci evrim geçirebilen, kendi kendine yeten kimyasal bir sistemdir."

Bu tanımların çoğu, evrim fikrinin yaşamın temel bir özelliği olmasıyla desteklenir. Evrim, bir organizma popülasyonunda çevresel koşullar sonucu ortaya çıkan varyasyonu, bu popülasyon içerisinde yaşamda kalarak sonraki nesillere aktaran organizmaların seçildiği ('doğal seçilim') bir süreçtir.

Yaşamın sayabileceğimiz başka belirgin özellikleri de vardır. Örneğin, yaşam karmaşık davranışlar ve genellikle öngörülemeyen etkileşimler sergiler. Yaşam, aynı zamanda, Joyce'un tanımındaki gibi 'kendi kendine yeten kimyasal bir sistem' olarak büyür ve çoğalır. Yaşam ayrıca, enerji üretmek ve hammadde elde etmek için bileşiklerin parçalanmasını veya formlarının değiştirilmesini içeren metabolik bir süreçtir.

Ancak, tüm bu özelliklerle ilgili sorun, biyolojik olmayan çoğu varlığın da bu davranışları göstermesidir. Tuz kristalleri, doymuş bir tuz çözeltisi gibi uygun koşullara maruz kaldığında büyüyebilir (Şekil 1.12).

Bilgisayar programları, kendilerini çoğaltabilmeleri anlamında, 'üremek' üzere yazılabilir ve bazı durumlarda biyolojik evrimdekine benzer hatalar bile ortaya koyabilirler. Yangınlar, ilkel bir şekilde, organik materyali 'metabolize' eder. Karbondioksit ve su gibi atık ürünleri üretmek için organik karbonu oksi-



Şekil 1.12 Yaşam büyür, ancak kristaller de büyür. Bu tuz (NaCl) kristalleri, doymuş bir tuz çözeltisine yerleştirilirse büyüyebilirler (Kaynak: wikicommons, Mark Schellhase).

jenle yakarlar. Bu süreçte yer alan kimyasal reaksiyon, hayvanlarda enerji üretmek için kullanılan solunumla aynıdır, tek fark reaksiyonun yaşamda biyokimyasal olarak kontrol edilmesi ve yangınlarda kontrolsüz olmasıdır (Şekil 1.13).



Şekil 1.13 Bir orman yangını, solunum yapan hayvanlar tarafından gerçekleştirilen kimyasal reaksiyondaki gibi karbondioksit ve su üretmek için organik karbonu oksijenle yakar.

Bu yüzden, eğer yeterince sıkı çalışırsak, biyolojik davranışlara benzeyen **abiyotik** koşulları bulabiliriz. Buna karşılık, canlı olduğunu düşündüğümüz ancak yaşamla ilişkilendirdiğimiz çoğu özelliği sergilemeyen biyolojik varlıklar da vardır. İnfluenza virüsleri gibi virüsler, kendilerini çoğaltmak için bir konağın hücresel sistemine ihtiyaç duyan partiküllerdir. Kendi başlarına çoğalamadıkları için virüsler canlı sayılırlar mı? Yaşamın bazı tanımlarında virüsleri canlı olarak nitelendirebiliyorken, bazılarında bunu yapamıyoruz. Bu



Şekil 1.14 Erwin Schrödinger yaşamı fiziksel bir bakış açısıyla tanımlamaya çalıştı.

tartışmayı uçlara götürebiliriz. Peki ya tavşan? Bir virüs gibi, bir tavşan da kendi başına çoğalamaz. Başka bir tavşana ihtiyacı vardır. Bir tavşan kendi başına ölü, eşiyle birlikte olduğunda yaşayan bir şey midir? Çok hızlı bir şekilde bir *reductio ad absurdum*'a varıyoruz ve tartışma hiçbir yere gitmiyor.

Fizikçi Erwin Schrödinger (1887–1961; Şekil 1.14), 1943'te Dublin'deki Trinity Kolejde verilen bir dizi dersi takiben 1944'te yayınlanan ufuk açıcı *What is Life?* [Yaşam Nedir?] adlı kitabında yaşamı tanımlama girişiminde bulundu. Genetik materyalin doğası hakkında, bunun uzun mesafeli düzenden yoksun bir 'aperiyodik' kristal olduğu gibi, bazı etkileyici tahminlerin dışında yaşamın doğasını da anlamaya çalıştı.

Schrödinger yaşamın 'düzensizlikten doğan düzen' olduğunu fark etti ve enerji atomlara ya da moleküllere dağıldıkça entropinin (enerjinin eşit biçimde dağılım göstermesine ilişkin bir ölçüt) arttığını ifade eden termodinamiğin ikinci yasasından hareketle yaşamın, kendisinin 'negatif entropi' dediği şeyi sürdürerek, örneğin enerji biriktirerek, yok olmadan termodinamik dengeye ulaştığını açıkladı. 'Negatif entropi' ifadesi oldukça kullanışsız ve mantığa aykırıdır. Gerçek bir fiziksel süreci tanımlamaya çalışmaktan ziyade yaşama dair görüşleri hakkında popüler bir ifade olarak görülmelidir. Bununla birlikte, negatif entropi kavramı, yaşamla sınırlı değildir. Endotermik reaksiyonlar (enerji alan reaksiyonlar) gibi kimyasal reaksiyonlar düzeni arttırmak için bir anlamda etraftaki ortamdan enerji çekmektedir.

Schrödinger'in yorumunun, yaşamın fizik yasalarıyla 'mücadele ettiği' izlenimini verme eğilimi vardır; yaşam, düzensizliğin içinde dağılma eğiliminde olan evrenin kaçınılmaz güçlerine karşı düzen sağlamaya çalışır. Bu görüşle ilgili sorun, yaşamın neden bu kadar başarılı olduğunu açıklayamamasıdır. Eğer böyle bir mücadele olsaydı, Dünyada ortaya çıktıktan sonra yaşam neden bu kadar azimli ve yaygın görünüyor?

Yaşama bakmanın başka bir yolu da organizmaların kendilerine odaklanmak yerine yaşamın dâhil olduğu sürece odaklanmaktır. Yaşamı, evreni biyolojik olmayan süreçlerden düzensizliğe doğru daha verimli bir biçimde yönlendiren bir süreç olarak düşünebiliriz.

Bu fikri anlamak için öğle yemeği sandviçlerimi düşünün. Onları bir masaya koyarsam ve mantarlar tarafından bozulmayacaklarını varsayarsam (ki bozulacaklardır, ancak bu bir düşünce deneyi), şeker ve yağ moleküllerindeki

* Saçma olana indirgeme; bir iddayı akıl yürütmeyle absürd sonuçlara bağlayarak çürütme, reddetme, yanlışlama –çn.

enerjinin salınması çok uzun zaman alır. Gerçekten de sandviçteki enerji, yer kabuğunda tektonik levhaların hareketleri bitinceye, şeker ve yağların karbondioksite dönüştürüleceği uzak gelecekte büyük sıcaklıklara ulaşana kadar salınamayabilir. Ancak sandviçleri yersem, yaklaşık bir veya iki saat içinde içerdikleri enerjiler vücudumda ısı enerjisi olarak salınır ve bir kısmı yeni moleküller oluşturmak için kullanılır. Temelde, sandviçin enerjiye dönüşümünü çok büyük ölçüde hızlandırdım. Bu dönüşümü termodinamiğin ikinci yasasının sandviçi dönüştüreceği hızda yapmış oldum. Canlılar olağanüstü yerel karmaşıklığı ve organizasyonu temsil eder, ancak dâhil oldukları süreç, enerjinin dağılmasını ve evrenin tükenmesini hızlandırır. Organizmalardaki yerel karmaşıklık, bu etkinin gerçekleşmesi için gerekli olan biyolojik makineleri inşa etmek için kaçınılmaz bir gerekliliktir. Fiziksel evren, enerjiyi daha hızlı dağıtan süreçleri destekleme eğiliminde olduğu için, yaşam termodinamiğin ikinci yasasından kaynaklanan süreçlere katkıda bulunur, onunla savaşmaz. Bu açıdan bakıldığında yaşamın neden başarılı olduğunu anlamak daha kolaydır. Organik kimyanın buna izin verdiği yerlerde kaçınılmaz bile olabilir.

Fakat hala yaşamı *tanımlamış* değiliz. 'Yaşam'ın bizim tarafımızdan yaratılmış yapay bir insan kelimesi olması, bunu tanımlarken yaşadığımız probleme bir cevaptır. Filozofların 'doğal olmayan tür' olarak adlandırdıkları, 'doğal tür'ün karşıtı olan şey budur. İkinci terim, özellikleri fiziksel nitelikleri bakımından tam olarak tanımlanabilen altın gibi bir madde için kullanılır. Altının ne olduğunu anlatan kesin bir tanım yapabilmek için molekül kütlesini, erime noktasını ve tanımlayıcı diğer fiziksel özelliklerini belirtebilmeliyiz. 'Doğal olmayan tür' için 'sandalye' iyi bir örnektir. Bunu 'oturabileceğimiz bir şey' olarak tanımlarsak, o zaman bu sehpamı bir sandalye yapar mı? Ve böylece sandalyenin ne olduğu hakkında sonsuz bir tartışmaya giriyoruz. Bu tartışma oldukça anlamsız, çünkü sonuçta sandalyenin ne olduğunu bizim onu nasıl tanımladığımız belirler. Eğer bu tanım sehpaları da içeriyorsa, o zaman öyle olsun. Benzer şekilde, belki de yaşam, üreme ve büyüme gibi bazı şeyleri yapan tüm organik kimyanın ilginç bir bölümünü kapsayan bir tanımdır. Eğer virüsleri dâhil etmek istiyorsak, edelim; eğer istemiyorsak, etmeyelim. Belki de önemli olan nokta, hepimizin kullanacağı bir tanım üzerinde hemfikir olmamızdır. Günümüzde astrobiyologlar, daha önce alıntı yaptığımız Joyce'un tanımındaki gibi, başka yerlerde yaşam arayışında işimize yarayacak işlevsel tanımlar yaratabileceğimizi düşünme eğilimindedir.

İşlevsel bir yaşam tanımı, yaşamı tanımlama konusundaki tartışmaya devam etmemizi engellememelidir. Biyoloji anlayışımızı daraltmanın yanı sıra, başka bir tür varlığı (eğer bulursak) inşa ettiğimiz dar bir yaşam tanımına uymadığı için yok etmek gülünç olurdu.

1.6 Sonuç

Bu giriş bölümünde astrobiyolojinin ne olduğunu tartıştık. Hayatı kozmik bağlamı içerisinde değerlendirmenin önemli bir araç olduğunu gördük. Astrobiyolojinin, aralarında en etkilisi 'Dünyanın ötesinde yaşam var mı?' olan, kendine ait bilimsel soruları vardır. Astrobiyoloji felsefi açıdan eski bir bilimdir, ancak son yıllarda özellikle uzay görevlerindeki teknolojik gelişmelerin etkisiyle, evrendeki yaşamla ilgili soruları ele almaya başlamak için deneysel bilgiler elde edilmiştir. Astrobiyolojinin ana konusu olan yaşamın tanımının yapılmasının son derece zor olduğu kanıtlanmıştır, ancak yaşamın evrendeki kökeni, evrimi ve dağılımını anlama arayışında ilerlememize izin veren, işlevsel yaşam tanımları üretebiliriz.

İleri Okumalar

Kitaplar

Catling, D.C. (2014) *A Very Short Introduction to Astrobiology.* Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford.

Crowe, M.J. (2003) *The Extraterrestrial Life Debate 1750–1900.* Dover Yayınları, New York.

Dick, S.J. (1996) *The Biological Universe.* Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge.

Schrödinger, E. (2012) *What is Life?* Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge (ilk olarak 1944 yılında yayınlandı).

Yayınlar

Bains, W. (2014) What do we think life is? A simple illustration and its consequences. *International Journal of Astrobiology* 13, 101–111.

Benner, S.A. (2010) Defining life. *Astrobiology* 10, 1021–1030.

Chao, L. (2000) The meaning of life. *BioScience* 50, 245–250.

Chela-Flores, J. (2013) From systems chemistry to systems astrobiology: life in the universe as an emergent phenomenon. *International Journal of Astrobiology* 12, 8–16.

Cleland, C.E., Chyba, C.F. (2002) Defining 'life'. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 32, 387–393.

Des Marais, D.J., Walter, M.R. (1999) Astrobiology: exploring the origins, evolution and distribution of life in the universe. *Annual Reviews of Ecology and Systematics* 30, 397–420.

Machery, E. (2012) Why I stopped worrying about the definition of life ... and why you should as well. *Synthese* 185, 145–164.

McKay, C.P. (2004) What is life and how do we search for it on other worlds? *PLoS Biology* 2, e302.doi: 10.1371/journal.pbio.0020302.

Nealson, K.H., Tsapin, A., Storrie-Lombardi, M. (2002) Search for life in the Universe: unconventional methods for an unconventional problem. *International Microbiology* 5, 223–230.

Lafleur, L.J. (1941) Astrobiology. *Leaflets of the Astronomical Society of the Pacific* 143, 333–340.

Lederberg, J. (1960) Exobiology: approaches to life beyond the Earth. *Science* 132, 393–400.

2

MADDE, YAŞAMIN ÖZÜ

Öğrenme Çıktıları

- Atom, iyon, molekül kavramlarını ve bunların temel yapılarını anlamak.
- İyonik bağ, kovalent bağ, metalik bağ, van der Waals etkileşimleri ve hidrojen bağı gibi farklı kimyasal bağ türlerini tanımlayabilmek ve açıklayabilmek.
- Kimyasal bağların biyolojik sistemlerdeki rolünü anlamak ve örnekler vermek.
- Faz diyagramlarını ve suyun faz diyagramının sıradışı özelliklerini anlamak.
- Faz diyagramlarının gezegen ortamlarını ve bu ortamların sıvı suya uygunluğunu anlamak için nasıl kullanılabileceğini kavramak.
- Plazma ve dejenere madde de dâhil olmak üzere maddenin aşırı hallerini açıklamak.
- Astrobiyoloji için önemli olan madde ve ışık arasındaki etkileşimlerin bir kısmını anlamak.
- Atomlardaki elektronların verilen enerji seviyesi değişimlerinde soğurdukları veya yaydıkları ışığın enerjisini, frekansını, dalga boyunu hesaplayabilmek ve böylece yıldızlar ile ötegezegenlerin soğurma ve yayınım spektroskopisi sonuçları hakkında çıkarımlar yapabilmek.

2.1 Madde ve Yaşam

Evrendeki fiziksel süreçleri anlayışımızın merkezinde, yaşamın düzenini yöneten fiziksel ilkeler de dâhil olmak üzere, maddenin yapısı yer alır. Maddenin yapısı ve atomlar ile moleküllerin etkileşimleri astrobiyolojiyle doğrudan bağlantılı görünmeyebilir. Bununla birlikte, yaşam moleküllerinin nasıl bir araya getirildiğini anlamak için atomların nasıl bir araya geldiğini ve meydana gelen ilişki tiplerini anlamamız gerekir. Sonuçta, yaşam dediğimiz karmaşık yapıya neden olan şey başlı başına atomlar, iyonlar ve moleküller arasındaki bağdır.

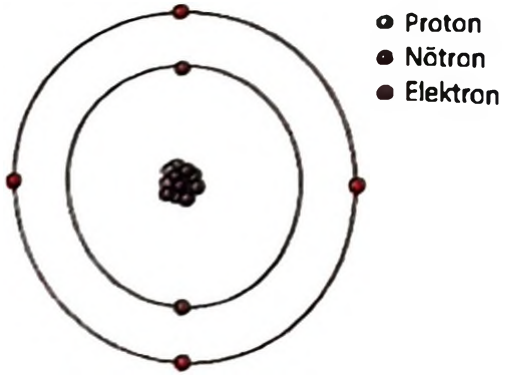
2.2 Hepimiz 'Sıradan' Maddeden Oluştuk

Yıldızların, gezegenlerin ve yaşamın meydana geldiği madde, muhtemelen evrendeki tüm maddenin %5'inden azını oluşturur. Maddenin çoğu, Kara Madde gibi anlaşılması daha zor olan biçimlerde bulunur. Her ne kadar yaşamın var olduğu evrenin özelliklerini etkilediği düşünülse de kara maddenin yaşamla ilgisi olduğu düşünülemez. Bu kitapta bundan daha fazlası üzerinde durmayacağız. Bu bölümde ele alacağımız konu, evrenin küçük bir kısmını oluşturan ve yaşamı meydana getiren sıradan madde veya **baryonik madde**. Kitap boyunca bundan sadece 'madde' olarak bahsedeceğiz.

Madde, atomlarda bir araya gelen temel parçacıklardan meydana gelir. Atomun çekirdeği, pozitif yüklü olan **protonlardan** ve yükü olmayan **nötronlardan** oluşur. Bu parçacıklar çok küçük kütlelere sahiptirler (nötron, $1{,}675 \times 10^{-27}$ kg ve proton, $1{,}672 \times 10^{-27}$ kg). Proton ve nötron, temel parçacıklar olan **kuarklardan** oluşur. Kuarklar parçacık fiziğinin konusu ve bu kitapta detaylı olarak tartışılmayacak. Bu çekirdeğin etrafına negatif yüklü **elektronların** dağılmasıyla eksiksiz bir atom elde edilir (Şekil 2.1).

2.3 Madde: Çekirdeği

Herhangi bir atomun çekirdeğinde, pozitif yüklü toplam Z kadar proton ve yüksüz toplam N kadar nötron vardır, burada protonların sayısı **atom numarasını** verir. Protonların sayısı, atomun element tipini tanımlar. Örneğin biyolojik olarak önemli olan karbon atomunda protonların sayısı 6 (bu nedenle bu sayı onu karbon elementi olarak tanımlar), nötronların sayısı da genellikle 6'dır. Karbonun atom numarası 6'dır. Karbon için genellikle 12 olan toplam proton ve nötron sayısı **atom kütle numarasını** verir. Protonlar, pozitif olarak yüklendiklerinden birbirlerini itme eğilimindedirler. Bu çekirdeğin parçalanmasına neden olur. Bununla birlikte, çekirdek çok küçük mesafelerde etkili olan ve elektrostatik itme kuvvetini zorlayan güçlü nükleer kuvvet tarafından bir arada tutulur. Tüm kararlı elementlerde en az proton sayısına eşit sayıda nötron vardır fakat birçok elementte daha fazla nötron bulunur.



Şekil 2.1 *Çekirdek ve elektronları gösteren tipik bir atomun yapısı. Bunun bir ölçeklendirme olmadığını unutmayın. Elektronlar, çekirdeğin çapından yaklaşık 10.000 kat daha uzakta yörüngelenir. Elektronlar, burada daireler şeklinde gösterilen enerji seviyelerinde yer alırlar* (Kaynak: Charles Cockell).

2.3.1 İzotoplar

Aynı elementin tüm atomları aynı sayıda nötrona sahip değil, N'nin değeri değişebilir. Aynı sayıda protona sahip olan ancak farklı sayıda nötron taşıyan atomlara izotop denir. Daha sonra göreceğimiz gibi, izotoplar kayaların yaşını belirlemek, Dünyanın erken dönemindeki yaşamın kanıtlarını ve başka yerlerde yaşamın izlerini bulmak için çok önemli bir araç olarak karşımıza çıkıyor.

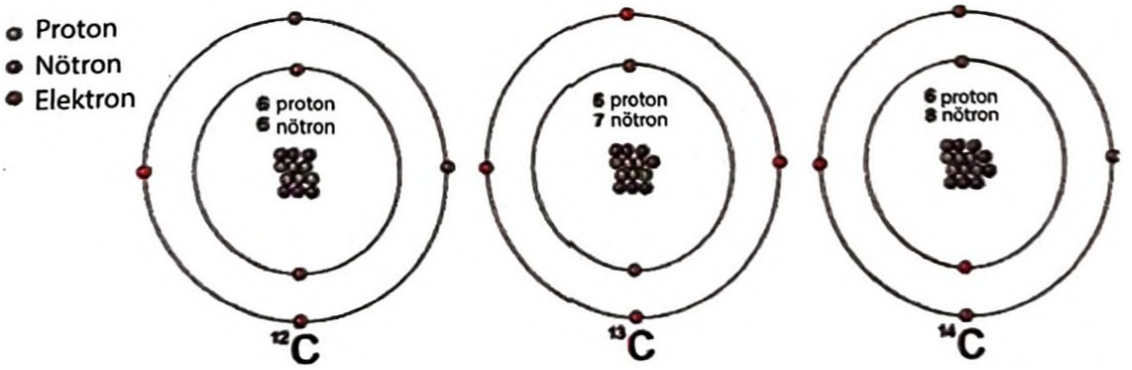
Farklı izotoplara örnek olarak karbon elementinin sahip olduğu üç önemli izotop verilebilir (Şekil 2.2). İzotoplar genellikle atom kütle numarasını, elementin sol tarafında bir üst simge olarak göstererek belirtilir:

Karbon 12 (^{12}C) – 6 nötron, 6 proton (kararlı bir izotop; Dünyadaki karbonun %98,9'unu oluşturur).

Karbon 13 (^{13}C) – 7 nötron, 6 proton (kararlı bir izotop; Dünyadaki karbonun %1,1'i).

Karbon 14 (^{14}C) – 8 nötron, 6 proton (kararsız bir izotop; Dünyadaki karbonun trilyon başına bir kısmı!).

Karbon 12 (^{12}C), karbonun en yaygın görülen izotopudur ve canlılarda karbonun %98'inden fazlasını oluşturur. ^{13}C daha nadir bulunur, fakat ^{12}C gibi uzun ömürlü ve kararlı bir izotoptur. Aksine ^{14}C, fazladan iki nötrona sahip olduğundan kararlı değildir. Buna radyoaktif izotop veya **radyoizotop** denir. Nötronlardan biri, bir elektronun salınmasıyla bir protona dönüşür ve atom azot 14 (^{14}N) olur. Bu bozunma 5730 yıllık bir yarı ömre sahiptir. Başka bir deyişle, 5730 yıl sonra, ^{14}C numunesinin yarısı bozulacaktır. ^{14}C'nin dengesiz doğası, karbon izotoplarının küçük bir kısmını oluşturduğu anlamına gelir, ancak buna rağmen son derece yararlı bir izotoptur. Bilinen bir oranda azaldığından, nesnelerin ne kadar eski olduğunu belirlemek için kullanılabilir ('karbon tarih saptama yöntemi'). Kitapta daha sonra, radyoizotopların Dünyanın fosil ve jeolojik kayıtlarına mutlak tarihler koymak için nasıl kullanılabileceğini göreceğiz.



Şekil 2.2 Karbonun üç izotopu. Nötron sayılarına göre çeşitlilik gösterirler (Kaynak: Charles Cockell).

2.4 Elektronlar, Atomlar ve İyonlar

Atom çekirdeği elektronlarla çevrilidir. Bir atomun Z sayıda elektronu vardır ve çekirdeğin çapına göre çekirdekten çok uzakta yörüngeye yerleşirler. Tipik bir atom çekirdeğinin çapı yaklaşık 10^{-14} m iken bütün bir atomun çapı 2 ila 5 x 10^{-10} m'dir. Daha önce söylediğimiz gibi bir atom Z kadar protona sahiptir ve bu, protonlar üzerindeki pozitif yükün Z kadar elektronun üzerindeki negatif yükü iptal ettiği ve atomu genel olarak nötr hale getirdiği anlamına gelir.

Elektronlar bölünmüş bir kişiliğe sahiptirler. Parçacık benzeri özellikler ve ışık gibi dalgaların davranışlarını sergilerler. Bu nedenle elektronların atom çekirdeğinin yörüngesinde dönmesiyle bir gezegenin bir yıldızın yörüngesinde dönmesini aynı anlamda ele almak teknik olarak doğru değil. Bununla birlikte, bu faydalı bir benzetme ve elektronların çekirdeklerin etrafındaki yörüngeleri işgal ettiğini düşünebiliriz. Her bir yörünge en fazla iki elektron alabilir, böylece periyodik tabloda daha yüksek atom sayısındaki elementlerden ilerlerken elektronların sıralı yörüngelere istiflendiği kabul edilebilir. Orbitaller harflerle (*s, p, d, f, g*) ifade edilmiştir. Elektron yörüngelerinin yapısı bu kitapta ayrıntılı olarak ele alınmayacaktır. Ancak moleküler yapı ve yaşamda yer alan moleküllerin akıbeti açısından anlaşılması gereken en önemli nokta, atomların orbitalleri tam elektron sayısına sahip olana kadar reaksiyona girme eğiliminde olmalarıdır. Elektron orbitalleri dolduğunda, kimyasal reaksiyonlara karışacak 'ilave' veya 'eksik' elektronlar yoktur. Bu, tam elektron kabuklarına sahip olan argon ve neon gibi soy gazların inert [atıl] ve kararlı özelliklerini açıklar.

Örneğin, sodyum atomunu (Na) düşünün. Periyodik Tablonun 1.grubunda (bkz. Ek) bulunur ve $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$ (harfler farklı orbitalleri belirtir; üst simge her orbitaldeki elektron sayısını gösterir) şeklinde yazılmış bir elektron yapısına sahiptir. Sodyum, 3s orbitalinde tek bir elektrona sahiptir. Bu tek elektronu kaybettikten sonra, sodyum atomu daha stabil hale gelir, çünkü bir sonraki kabuk doludur (2p kabuğu, her birinde bir çift elektron bulunan ve toplamda altı elektron taşıyan, *x*, *y* ve *z* kabukları adı verilen üç ayrı kabuktan oluşur). Bununla birlikte sodyum atomu, bir elektronunu kaybederek, elektronlarından bir tane fazla protona sahip olduğu için net bir pozitif yük kazanmaktadır. Bu elektron kaybının ürünü olan Na^+, bir iyon olarak adlandırılır. İyon, elektron kazanmış veya kaybetmiş bir atomdur.

Benzer şekilde, örneğin Periyodik Tablonun 1.grubundaki klor, $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^5$ şeklinde bir elektronik yapıya sahiptir. Bir elektron kazanarak 3p elektron orbitallerini dolduran (her biri en fazla iki elektron içeren üç orbital kümesi) klorür iyonu (Cl^-), daha kararlı hale gelerek soy gaz elektron konfigürasyonuna kavuşur.

Atomların soy gaz elektron konfigürasyonunu elde etmek için elektronları kaybetme veya kazanma eğilimi, bir sonraki bölümde inceleyeceğimiz birçok bağın temel özelliklerini açıklamaktadır.

2.5 Maddede Bulunan Bağ Çeşitleri

Atom ve iyonlarla ilgili bu bilgilerle birlikte, şimdi, molekülleri ve nihayetinde büyük, karmaşık molekülleri veya yaşamı oluşturan genetik materyal **DNA (deoksiribonükleik asit)** gibi makromolekülleri oluşturmak için nasıl bağlandıklarını incelemeye başlıyoruz.

Sıradan maddenin ve yaşamın yapısını ortaya çıkarmak amacıyla atomları ve molekülleri bir arada tutan beş temel bağlanma türü vardır. Bu bağların her birini bu bölümde ele alacağız. Bunlar:

- İyonik bağ
- Kovalent bağ
- Metalik bağ
- van der Waals etkileşimi
- Hidrojen bağı.

Bu tip bağların ilk üçü, temel olarak atomları bir araya getirerek molekülleri oluştursa da hem kovalent hem de iyonik bağlar, birazdan göreceğimiz gibi, biyolojik moleküllerin farklı kısımlarını bir arada tutmakta da rol oynamaktadır. Son iki tip bağ, öncelikle moleküllerin bir arada tutulmasında rol oynar. Bu bağların bazı özelliklerine ve özellikle de yaşamla olan ilişkilerine bir göz atalım.

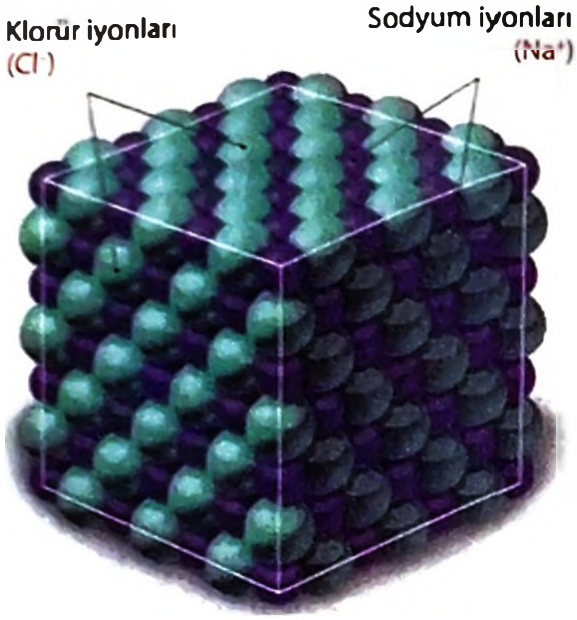
2.6 İyonik Bağ

İyonik bağ, pozitif (+) ve negatif (–) yüklü iyonlar (öncelikle klorür veya florür iyonları gibi metal olmayanlar ve sodyum veya potasyum iyonları gibi metaller) arasındaki elektrostatik çekim kuvvetidir. İyonik bileşiklerin çoğu oda sıcaklığında kristal katı halde bulunur.

Bir iyonik bağın en önemli özelliği, her bir atomun bir elektron kazanması ya da kabul etmesidir; böylece oluşan iyon, en düşük enerji konfigürasyonuna (soy gaz benzeri) sahip olur. Sofra tuzu, NaCl, tipik bir iyonik bağ örneği ve yapısını Şekil 2.3'te görebilirsiniz. Bu tuzda, sodyum bir elektrondan vazgeçer ve klor bu elektronu alır, böylece her iki iyon da Bölüm 2.4'te tarif edildiği gibi soy gaz yapısı kazanır.

NaCl durumunda, Na^+ ve Cl^- iyonları birbirine tutturulur, ancak açıkça klorür iyonları, sodyum iyonları gibi birbirlerinden ayrılır. Bu nedenle aldıkları doğal konfigürasyon alternatif paketlenmiş kübik bir yapıdır. Diğer benzer örnekler, sezyum klorür (CsCl) ve sodyum florürdür (NaF).

Her bir + iyon birkaç – iyon çekebilir (ve bunun tersi de geçerli). İyonik bağlar tipik olarak çok güçlüdür.



Şekil 2.3 Alternatif sodyum ve klorür iyonlarını gösteren NaCl yapısı (Kaynak: wikicommons).

Bu bağların kararlılığını enerjik (termodinamik) bir bakış açısıyla değerlendirebiliriz. Sodyum florürü, NaF, düşünelim. Bu yapıdaki bir iyonik bağı kırmak için gereken enerji yaklaşık 3×10^{-19} joule (J) 'dir. Ayrıca, belirli bir sıcaklıktaki bir bağda tipik termal enerjiyi (hareket enerjisi), k_BT formülüyle yaklaşık olarak hesaplayabiliriz. k_B, $1{,}381 \times 10^{-23}$ JK^{-1} değerine sahip **Boltzmann sabiti** ve T, Kelvin cinsinden ölçülen sıcaklık. Oda sıcaklığında (300 K), k_BT'nin değeri $4{,}1 \times 10^{-21}$ J'dir. İyonik bağ enerjisi bu nedenle bağdaki termal enerjinin yaklaşık 75 katıdır. Başka bir deyişle, oda sıcaklığında NaF içindeki termal enerji, iyonların parçalanmasına neden olmaz. İyonik bağları parçalamak ve bu bileşiğin oda sıcaklığında neden kararlı olduğunu açıklamak için daha fazla enerji harcamalısınız.

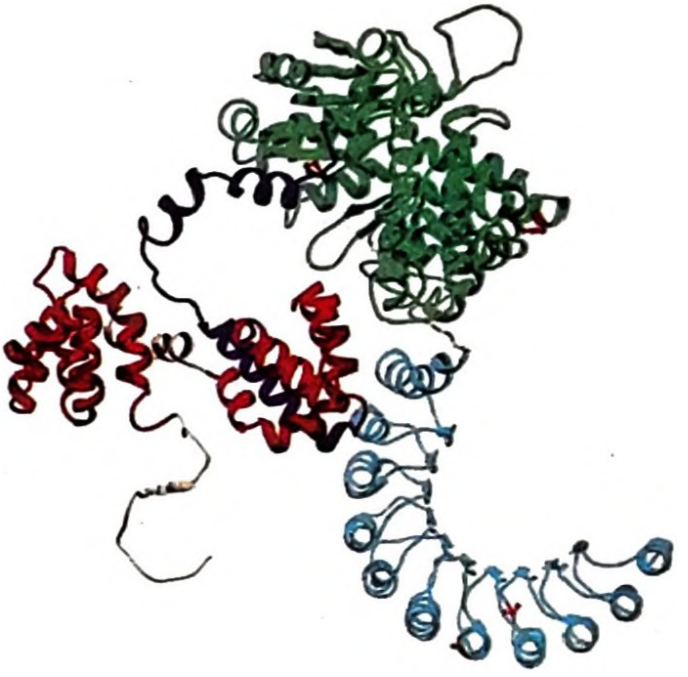
2.6.1 İyonik Bağlar ve Yaşam

İyonik bağlar yaşam için önemlidir, çünkü moleküllerin bir arada tutulmasında da rol oynarlar.

Şekil 2.4'te uzun bir zincir halinde birbirine dizilmiş amino asitlerden oluşan tipik bir protein zincirini görebilirsiniz. Bu amino asitlerin bazıları yüklüdür (Bölüm 3'te amino asitlere geri döneceğiz).

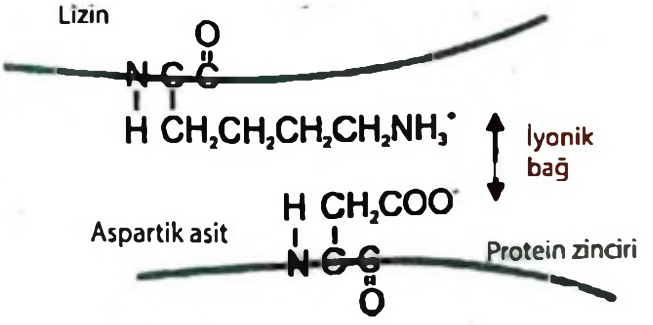
Proteinlerde, negatif yüklü amino asitler pozitif yüklü olanlarla iyonik bir bağ oluşturma eğiliminde olacaktır. Şekil 2.5 bu bağı göstermektedir.

Bir tür amino asit olan aspartik asitteki negatif yük, zincirleri bir arada tutmaya yardımcı olan bir iyonik bağ oluşturmak üzere başka bir amino asit türü olan lizindeki pozitif yükün çekimine kapılır. Bu bağlanma, enzimler veya canlılardaki kimyasal reaksiyonları hızlandırmada rol oynayan biyolojik katalizörler gibi hücresel işlevleri olan proteinler için önemlidir.



Şekil 2.4 Tipik bir protein. Renkli şeritler ve çizgiler, amino asitlerin birbiri ardına dizilmesinden oluşan zincirleri göstermektedir; bu zincirler, karmaşık bir üç boyutlu molekülü oluşturmak üzere katlanırlar. Burada, insan bağışıklık sistemine dâhil olan bir protein (NOD2 olarak adlandırılan) gösterilmektedir
(Kaynak: wikicommons, LP-Kozlowski).

Bu iyonik bağlar proteinlerin işlevlerini doğru bir şekilde gerçekleştirmeleri için gerekli olan yapılarını korumalarına yardımcı olur. Amiyane tabirle, iyonik bağları proteinler gibi biyolojik moleküllerin üç boyutlu yapısını bir arada tutmaya yardımcı olan 'cıvatalar' olarak düşünebilirsiniz.

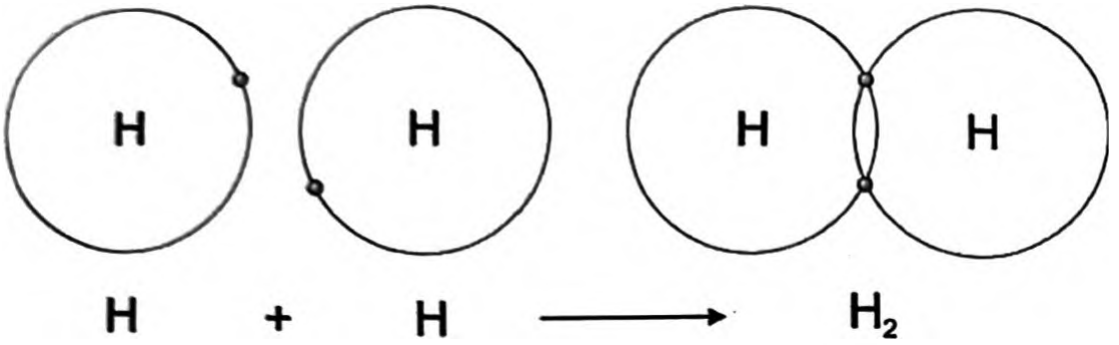


Şekil 2.5 Bir proteinin içindeki iki amino asit, pozitif yüklü amino asit lizin ve negatif yüklü amino asit aspartik asit, arasında oluşan bir iyonik bağ. (Kaynak: Charles Cockell).

2.7 Kovalent Bağ

İyonik bağın temel özelliği, iki iyon üretmek için bir elektronun bir atomdan diğerine transferidir. Kovalent bağlarda ise elektronlar paylaşılır. Kovalent bağlar, Periyodik Tabloda genellikle birbirine yakın olan ve elektronegativiteleri (bir atomun elektronları çekme eğilimi) arasında küçük farklar olan atomlar arasında gerçekleşir. İyonik bağlara benzer şekilde, bir elektronun paylaşımı soy gaz elektron konfigürasyonunun her iki atom tarafından da elde edilmesini sağlar.

● Elektron



Şekil 2.6 Hidrojen molekülündeki kovalent bağ. İki elektron paylaşılır (Kaynak: Charles Cockell).

Kovalent bağın en basit örneği, Şekil 2.6'da gösterilen hidrojen molekülüdür. Burada, her bir hidrojen atomundaki her bir elektron, diğeriyle paylaşılır, öyle ki bir aradayken iki elektronlu tam bir elektron kabuğuna sahip olurlar.

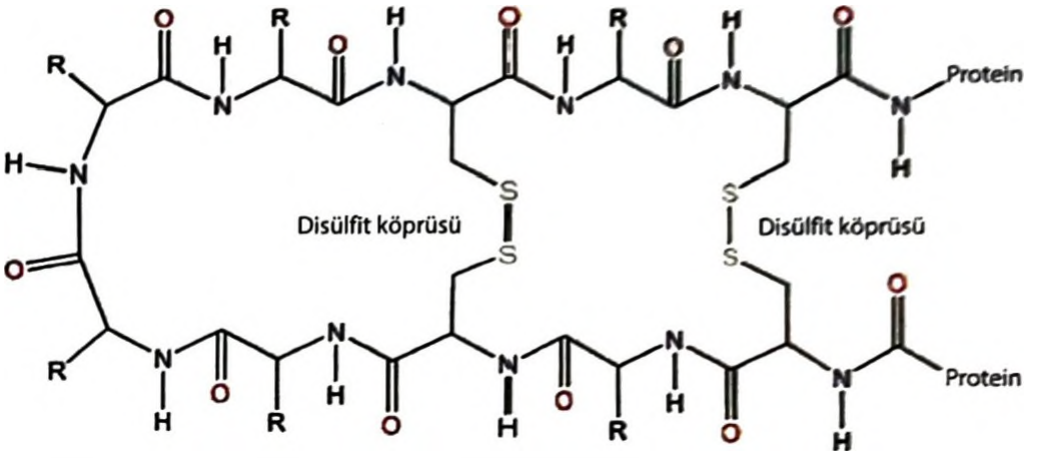
Kovalent bağlar çok güçlüdür. Örneğin elmas, kovalent bir karbon ağıdır. İyonik bağlar için kullandığımız formülle, bağ başına enerjiyi yaklaşık 600 x 10^{-21} J olarak hesaplayabiliriz. Bu, oda sıcaklığında (150 k_BT) termal enerjinin 150 katına eşittir. Başka bir deyişle, elmas bağlarındaki termal enerji, elmastaki karbon–karbon bağlarını kırmak için gereken enerjiden çok daha düşüktür. Elmas oda sıcaklığında çok kararlıdır.

2.7.1 Kovalent Bağlar ve Yaşam

Kovalent bağlar biyolojide çok önemli bir rol oynar, çünkü bu bağlar atomları, yaşamı oluşturan çok çeşitli karbon bileşiklerinde bir arada tutarlar. Bununla birlikte, biyolojik olarak önemli moleküler yapının gerekli olduğu belirli durumlarda da bulunurlar. İyonik bağların yüklü amino asitleri protein zincirlerinde bir arada tutmadaki rolüne benzer olarak, kovalent bağlar kükürt içeren amino asitler (sistein ve metiyonin) arasında oluşabilir. Amino asitler içindeki kükürt atomları bir araya gelir ve bir disülfit köprüsü oluşturur. Bu bağlar, üç boyutlu yapının korunmasını sağlayarak proteinin yapısını sağlamlaştırır.

Şekil 2.7, iki protein zincirini bir halkada bir arada tutan kovalent bağları göstermektedir.

Bu bağlar bazı organizmalarda, zorlu koşullarda proteinleri bir arada tutmak için kullanılır. Çok yüksek sıcaklıklarda yaşayan bazı mikroplar, örneğin Şekil 2.8'de gösterilen Yellowstone Milli Parkındaki gibi, sıcak su kaynaklarında kararlılıklarını korumaya yardımcı olmak için proteinlerde ekstra kovalent bağlara sahiptir.



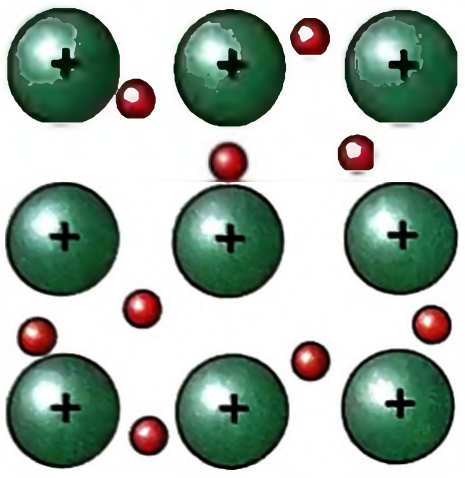
Şekil 2.7 Kovalent bağlar, atomları moleküller içinde bir arada tutmanın yanı sıra yapıyı sağlamlaştırmak için molekülleri birbirine bağlar. Burada iki disülfit köprüsündeki kovalent bağlar, belirli bir biçimde amino asitlerden yapılan bir protein zincirini bir arada tutar. Kovalent bağlar, birçok benzer diyagramda olduğu gibi, düz siyah çizgiler olarak gösterilmiştir (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 2.8 Kovalent bağlar, bazı mikroplarda, proteinleri Yellowstone Milli Parkındakiler gibi volkanik havuzlardaki yüksek sıcaklıklara karşı stabilize etmek için kullanılır. Mikroplar ilkbahardaki kahverengi ve sarı renklerle, mikrobiyal pigmentlerin neden olduğu renkler ve demir gibi minerallerle karıştırılır.

2.8 Metalik Bağ

Metalik bağ, metal elementlerde bulunan bağ türüdür. Pozitif yüklü iyonlar ve bunların serbest dış elektronları arasındaki elektrostatik çekim kuvvetiyle oluşur (Şekil 2.9). Elektronlar atomlardan ayrılır ve metal iyonları arasında bir 'deniz' oluşturur. Bu şekilde atomlar elektronların uzaklaştırılmasıyla (esasen onları kaybederek) kararlı bir soy gaz konfigürasyonu elde eder.



Şekil 2.9 Pozitif yüklü metal iyonlarının etrafında bir serbest elektron 'denizi'ni gösteren metalik bağ (Kaynak: Charles Cockell).

Metaller güçlü bağlar oluşturur. Yine, daha önce tartışılan mantığı kullanarak, potasyumu düşünelim. Potasyumun bağ başına enerjisi yaklaşık 500 x 10^{-21} J'dir. Bu, oda sıcaklığında (~300 K) bağda var olan termal enerjinin yaklaşık 125 katıdır. Bu nedenle demir ve gümüş gibi birçok metal oda sıcaklığında kararlıdır.

Birçok metal iyonu enzimlerde kimyasal reaksiyonları katalize etmek veya bakır, demir ve magnezyum gibi metaller elektron transferini gerçekleştirmek için kullanılsa da metalik bağlar biyolojik sistemler tarafından kullanılmadıkları için yaşamla ilişkili değildir.

2.9 van der Waals Etkileşimleri

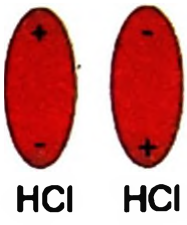
Atomların ve moleküllerin iyonik ve kovalent bağlarla nasıl bir arada tutulduğunu gördük. Maddeyi bir arada tutmada ve yaşamın kendisinde önemli roller oynayan iki tür bağ daha var. Bu iki bağ türü, moleküller arasındaki bağlanmayla ilişkilidir.

Moleküller arasındaki etkileşimlerin bir sınıfı **van der Waals etkileşimleri** veya kuvvetleridir. Bu etkileşimler kovalent ve iyonik bağlardan çok daha zayıftır. Kovalent bir bağın gücünün %1'i düzeyinde olmalarına rağmen biyolojik sistemler için çok önemlidirler.

Van der Waals etkileşimleri üç kategoriye ayrılabilir.

2.9.1 Dipol–Dipol (Keesom) Kuvvetleri

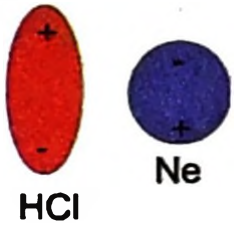
Moleküller, elektronların dengesiz dağılımından ve negatif yüklerinden kaynaklanan eşit olmayan bir yük dağılımına sahiptir (örneğin, yönlülük veya eşyönsüzlük). Bu düzensiz elektron yükü dağılımı molekül uzunluğu boyunca küçük bir kalıcı elektrik *dipolü* sağlar. Şekil 2.10'da hidrojen klorür üzerinden bir örnek gösterilmiştir. Dipoller birbirlerini küçük çubuk mıknatıslar gibi çekerler ve böylece moleküller arasında çekim yaratırlar.



Şekil 2.10 Keesom etkileşimlerine katılan iki HCl molekülünün dipolleri. Birbirlerini minik çubuk mıknatıslar gibi çekerler (Kaynak: Charles Cockell).

2.9.2 Dipol–İndüklenebilir Dipol (Debye) Kuvvetleri

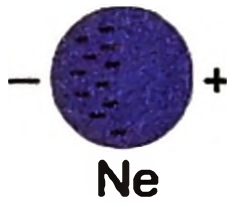
van der Waals etkileşimleri, hiçbir yükü olmayan bir molekülde tetiklenebilir. Bu tür bir etkileşimde, moleküllerden birinin (HCl) yükü vardır, ancak diğeri (örneğin burada neon) yüklü değildir. Bununla birlikte, neondaki bir yük komşu atom veya moleküldeki elektron dağılımını etkileyen HCl'deki yükün varlığıyla indüklenebilir (Şekil 2.11). Sonuç olarak moleküller arasında bir çekim oluşur.



Şekil 2.11 Yüksüz neondaki indüklenmiş dipol, Debye etkileşiminin bir örneğidir (Kaynak: Charles Cockell).

2.9.3 Dağılım Kuvvetleri

Bir diğer van der Waals etkileşimi ise, nötr atomların birbirini çekebileceği türden bir kuvvettir. Yük dağılımı, nötr atom ve moleküllerde bile, hiçbir zaman tam olarak eşit değildir. Atomun etrafındaki yörüngede bulunan elektronlar nedeniyle, bir anda atomun etrafına kısmen eşit olmayan bir şekilde dağıtılacak olan bir yük eşyönsüzlüğü var olacaktır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Burada abartılı bir şekilde gösterilen bir atom etrafındaki yük dengesizliği, atomda küçük bir yük dağılımıyla sonuçlanır ve bir dipol oluşturur (Kaynak: Charles Cockell).

Bu, atomlarda veya moleküllerde küçük bir dipol momentinin oluşmasına neden olur. Bu dağılım kuvvetleri veya London kuvvetleri, inert gazlar (Ne, Ar vb) ve kovalent olarak bağlı moleküller (H_2, N_2, CH_4 vb) arasındaki çekim için önemlidir, ancak tüm atomlar ve moleküller arasında belli bir dereceye kadar mevcuttur.

2.9.4 van der Waals Etkileşimleri ve Yaşam

van der Waals etkileşimleri, biyolojik sistemlerde hücrelerin hem içinde hem de dışında yer alan moleküller arasındaki çekimde rol oynar. Van der Waals kuvvetlerinin biyolojideki dikkat çekici örneklerinden biri, bir kertenkelenin cam duvara tutunması olabilir. Geko kertenkelelerinin ayaklarında *setae* adı verilen onbinlerce minik tüy bulunur. Bu kertenkeleler yüzey ile ayaklarındaki tüylerin üzerindeki minik çıkıntılar arasındaki van der Waals etkileşimini kullanarak bir yüzeye tutunurlar (Şekil 2.13). Bu müşterek kuvvet, kertenkeleyi tutacak kadar büyüktür ve pürüzsüz bir cam yüzeye yapışma yeteneklerini açıklar.



Şekil 2.13 van der Waals kuvveti iş başında. Pencereye tutunan bir geko kertenkelesi. Ayaklarındaki kıllar, van der Waals etkileşimlerini kullanarak yüzeyle etkileşime girer.

2.10 Hidrojen Bağı

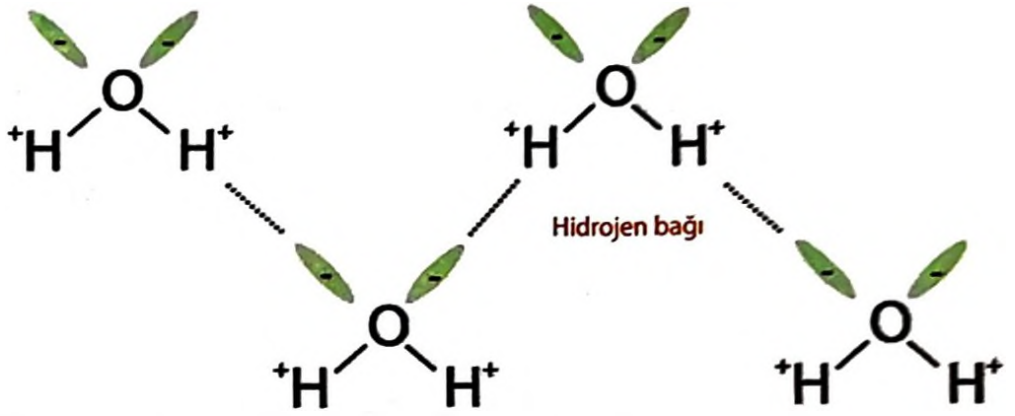
Son olarak, biyolojik süreçlerde son derece önemli bir rol oynayan **hidrojen bağına** geliyoruz. Bu bağ su, etanol, metanol ve diğer birçok organik molekülü içeren bir OH (hidroksil) grubu içeren moleküllerde bulunur.

Tek elektrona sahip olan bir hidrojen atomu, yalnızca bir atoma kovalent olarak bağlanabilir. Bununla birlikte hidrojen atomu, flor veya oksijen gibi yüksek oranda elektronegatif karaktere sahip ikinci bir atomu içeren ek bir elektrostatik bağda bulunabilir. Bu ikinci bağ, iki farklı molekülde iki atom arasındaki hidrojen bağıdır.

Bu bağ nasıl çalışıyor? Su kullanarak temel noktaların üzerinden geçelim:

- Bir OH bağı gibi bir kovalent bağdaki yük yoğunluğu oldukça asimetriktir ve yük merkezi O atomuna çok daha yakındır.
- Bu, H atomunun bir O atomunun yüzeyinde bulunan bir H^+ (proton) gibi davranmasını sağlar.
- O atomundaki diğer elektronlar kendilerini itmeyi en aza indirecek şekilde dağıtırlar. Bu elektronlar, O atomunun OH bağına karşı tarafında elektron yoğunluğu lobları oluşturur.
- Başka bir H_2O molekülü, pozitif yüklü H'sinin bu negatif yüklü elektronlara yakın olması için kendisini yönlendirir.

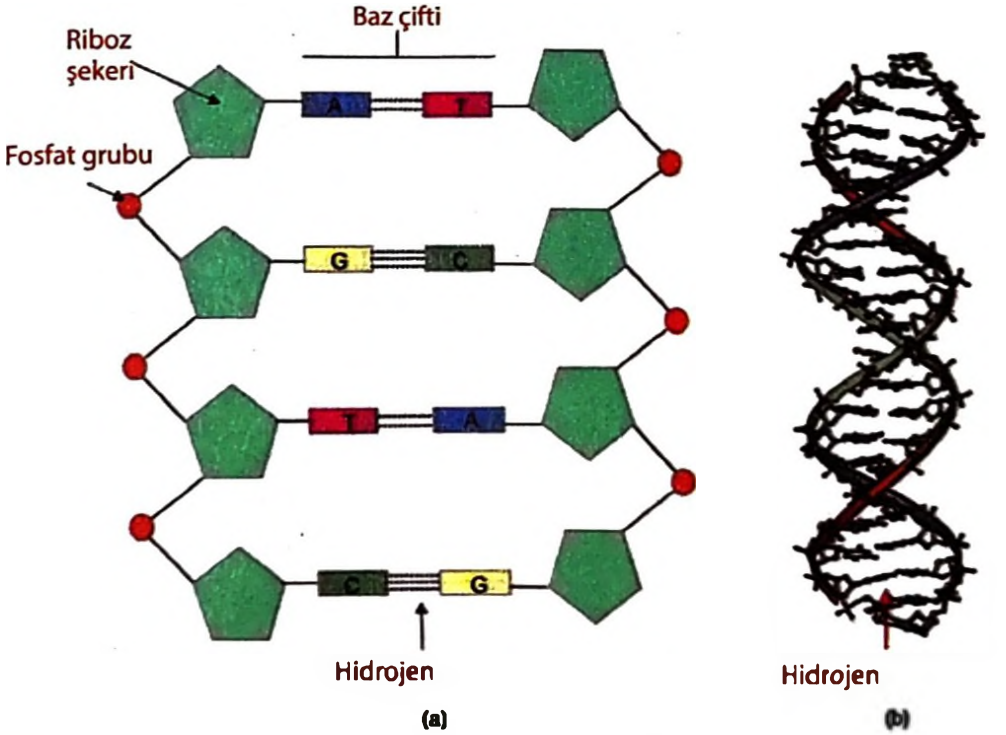
Bu etkileşimlerin sonucunu, iki boyutlu su buzu içindeki hidrojen bağını gösteren, Şekil 2.14'te daha net bir şekilde görebilirsiniz.



Şekil 2.14 Su buzunda hidrojen bağı. Noktalı çizgiler hidrojen bağını göstermektedir. Yeşil loblar, diğer su molekülleri üzerindeki hidrojen atomuyla etkileşime giren oksijen üzerindeki elektronlardır (Kaynak: Charles Cockell).

2.10.1 Hidrojen Bağları ve Yaşam

Hidrojen bağı, yaşamda çok belirgindir. Bir sonraki bölümde, yaşamdaki bilgi depolama molekülünün –**deoksiribonükleik asit**, DNA– yapısını daha ayrıntılı olarak tartışacağız. Şimdilik, DNA'nın karakteristik çift sarmal yapısını oluşturmak üzere birbirine bağlanan iki tamamlayıcı iplikten oluştuğunu anlamak faydalı olacaktır. Bu iki iplik, hidrojen bağlarıyla bir arada tutulur.



Şekil 2.15 DNA molekülündeki hidrojen bağı. (a) Soldaki düzleştirilmiş iki boyutlu molekülün ortasındaki noktalı çizgiler, iki şeridi bir arada tutan hidrojen bağları, sağdaki (b) ise üç boyutlu çift sarmal yapısıdır (Kaynak: wikicommons, Michael Ströck).

Şekil 2.15'teki şemadaki iki boyutlu tasvirinde, normal üç boyutlu sarmal yapısından farklı olarak, düzleştirilmiş bir DNA çift sarmalının yapısını görebilirsiniz. Yapının iki kenarı boyunca, omurgasını oluşturan pentagonal riboz şekerlerini fosfat grupları ile birbirine bağlı olarak görebilirsiniz. Ortada genetik bilgiyi kodlayan dört baz çifti vardır. Hidrojen bağını gösteren noktalı çizgilerle birbirlerini işaret ediyorlar. Adenin (A) ve timin (T) bazları arasında iki, guanin (G) ve sitozin (C) arasındaki üç hidrojen bağı vardır.

Hidrojen bağı, DNA'nın dağılmaması için iplikleri bir arada tutacak kadar güçlüdür, ancak hücreler bölünürken DNA molekülünün replikasyonu için iki ipliğin ayrılması gerektiğinde kopacak kadar da zayıftır. 4. Bölümde, DNA'nın yapısını ve işlevlerini daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz.

2.11 Hal Denklemi, Farklı Madde Türleri Arasındaki İlişkiyi Açıklar

Maddenin nasıl bir arada tutulduğunu araştırdıktan sonra, şimdi maddenin türlerine, aralarındaki ilişkilere ve yaşam için bazı önemli sonuçlara bakıyoruz.

Sıradan maddenin çoğunluğunu oluşturan madde farklı biçimlerde bulunabilir. Ana formlar katı, sıvı, gaz ve plazma. Tüm bu madde halleri bize tanıdık geliyor. Maddenin halleri, etkisi altında oldukları basınç ve sıcaklıkla belirlenir. Bu ilişkiye **hal denklemi** denir.

Tartışma Noktası: Yaşamın yapısı evrensel midir?

Bazı insanlar astrobiyologların dar görüşlü olduğunu ve yabancı yaşam formlarının, eğer varsa, bizim için hayal edilemeyecek ve muhtemelen Dünyadaki yaşamdan çok farklı bir yapıda olduğunu söylüyor. Buna katılıyor musunuz? Bu bölümde ve daha sonraki bölümlerde ilerlerken, bu ifadenin ne seviyede doğru olduğunu veya olmadığını düşünebilirsiniz. Örneğin, hidrojen bağının, evrensel Periyodik Tablodaki atomlar arasındaki etkileşimler tarafından belirlendiği üzere, evrenin herhangi bir yerinde aynı olması beklenir. Bu yüzden, tüm kimyasal bağ türleri bu bölümde incelenmiştir. Kuşkusuz, bu nedenle, eğer başka bir yerde yaşam varsa, atomlarını ve moleküllerini bir arada tutmak için aynı bağ türlerini kullanacağını söylemek için güvenli bir zemindeyiz. Bir sonraki bölümde, karasal yaşamdaki moleküllerin nasıl bir araya getirildiğine bakacağız. Bu moleküller evrensel yapılar mı? Aynı temel molekülleri kullanarak hücrelerin bir araya getirilmesini bekler miyiz? Daha sonra, bütün organizmalar arasındaki evrimsel ilişkilere bakmak için bir sonraki bölüme ilerleyeceğiz. Bu ilişkiler evrensel mi? Atomlardan organizma topluluklarına kadar yaşamın yapısının hangi düzeyinde evrendeki tüm canlıların aynı özellikleri paylaştığını kendinizden emin bir şekilde söyleyebileceğinizi düşünün.

2.12 Faz Diyagramları

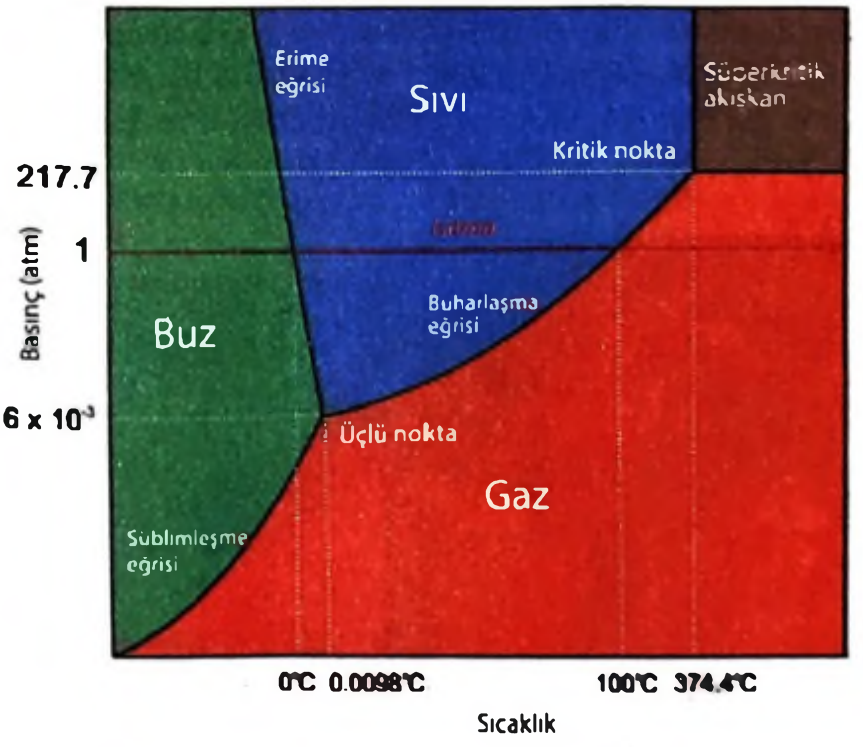
Hal denklemini göstermenin en yaygın yollarından biri, sadece basınç ve sıcaklığa odaklanmaktır (basınç ve hacim veya sıcaklık ve hacim arasındaki ilişki-

lere de bakabilsek de bunlar daha az ilgi çekicidir ve bize daha az bilgi verir). Maddenin halinin basınç ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gösterilmesine **faz diyagramı** denir. Şekil 2.16'da su için bir faz diyagramı görebilirsiniz.

Bu şemanın temel özelliklerinden bazılarını inceleyelim. *x* ekseni üzerinde sıcaklık ve *y* ekseni üzerinde basınç gösterilir. Şekil üzerindeki soldan sağa giden kırmızı yatay çizgi 1 atm basıncı gösterir.

Atmosferik basınçta ve düşük sıcaklıklarda su, katı bir buzdur. Isınarak 0 °C'ye geldiğinde, su erime eğrisine denk geldiği için faz değişimine uğrar ve sıvı olur; buzun erimesini gördüğümüzde aşina olduğumuz bir deneyim. Daha da ısıtırsak, su buharlaşma eğrisine ulaşır. 100 °C'de başka bir faz değişimine uğrar ve gaza dönüşür. Bu noktada, su kaynar. Suyu çok yüksek sıcaklıklara (birkaç yüz K) ısıtmaya devam edersek, elektronlar çekirdekten sürüldüğü için bir plazmaya dönüşür (bu faz şemada gösterilmez).

Diyagramın dikkatinizi çekmek istediğim iki özelliği var. Yüksek sıcaklık ve basınçlarda **kritik nokta** adı verilen, gaz ve sıvının ayırt edilemez hale geldiği bir nokta vardır. Faz diyagramının bu bölümündeki maddeye **süperkritik akışkan** denir. Maddenin davranışının anlaşılmasında genel öneme sahip olmasına rağmen, bu maddenin durumu biyolojik sistemlerde kullanılmamaktadır. Yüksek yüzey basınçları ve sıcaklıkları olan bazı **ötegezegenler**, süper kritik suyla kaplanmış atmosferlere hatta yüzeylere bile sahip olabilirler (Bölüm 19).



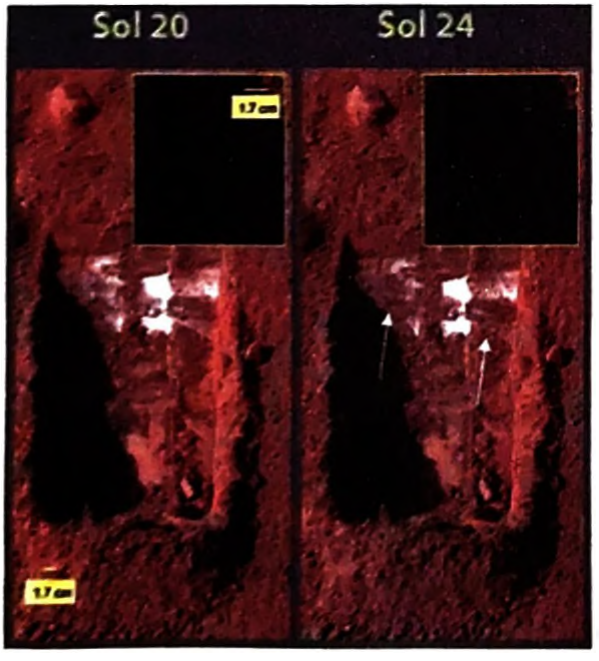
Şekil 2.16 Su için bir faz diyagramı. Eksenler sabit bir ölçeklendirmeye alınmaz, ancak diyagramın önemli özelliklerinin değerlerini abartmak için çizilirler (Kaynak: Charles Cockell).

Ayrıca atmosferik su basıncından düşük basınçlarda 100 °C'den düşük sıcaklıklarda kaynamaya başladığını göreceksiniz. Bu, dağcıların deneyimiyle tutarlıdır. Ne kadar yükseğe çıkılırsa suyun kaynama sıcaklığı da o kadar düşük olur (sebzeleri pişirmeyi zorlaştırır). Everest Dağının zirvesinde (8848 m yükseklik) suyun kaynama noktası 71 °C'dir. Basıncı azaltmaya devam edersek, grafikte **üçlü nokta** adı verilen bir noktaya geliriz. Üç maddenin de bir arada var olabileceği yer burasıdır. Grafiğin bu bölgesinde ve düşük basınçlarda, buzu ısıtırsak doğrudan gaza dönüştüğünü fark edeceksiniz (**süblimleşme**). Faz diyagramının bu bölgesinde sıvı faz yoktur.

2.12.1 Madde ve Mars

Faz diyagramlarını ve astrobiyolojideki önemlerini başka bir gezegene –Mars'a– bakarak daha iyi anlayabiliriz. Şekil 2.17'deki görüntü Phoenix uzay aracının Mars'taki iniş alanının alt yüzeyinden alınmıştır. Phoenix, 2008 yılında Mars'ın kuzey kutup bölgesinin 68,22 °K, 234,25 °D koordinatlarına indi. Su buzu, yüzey tozunun bir kısmını ortaya çıkaran robotik kepçeyle açığa çıkarıldı. Dört günden sonra (veya Mars günü olarak dört 'sol') buz buharlaşarak kaybolmaya başladı. Ancak sıvı su oluşmadı. Bu bize Mars'taki atmosfer basıncının üçlü noktada veya daha düşük olması gerektiğini söylüyor. Aslında, Mars'taki ortalama atmosferik basınç üçlü noktanın yakınında yaklaşık 6 milibar (mb) [0,0059 atm'ye eşdeğer veya standart bilimsel birimlerde, 600 pascal (Pa)].

Ancak, Mars her zaman böyle olmamıştı. Gezegenin ilk zamanlarında (3,5 milyar yıldan daha uzun bir süre önce) yüzeyde sıvı su olduğuna dair çok sayıda kanıt var. Vadi ağları, kurumuş göller ve diğer özellikler yüzeyde kalıcı sıvı su kütlelerinin oluşabileceğini ve daha sonra kitapta bu kanıtlara ulaşacağı-



Şekil 2.17 Mars'ın kuzey kutup bölgesindeki Phoenix iniş sahasında robotik kepçe tarafından açığa çıkan buz. 20. günde ('sol' 20) açığa çıkarılan su buzu, sol 24 itibariyle süblimleşmeye (beyaz oklar) başladı (Kaynak: NASA).

mızı göstermektedir. Bu bize Mars tarihinin başlarında, atmosferik basıncın suyun sıvı halinin var olmasına izin vermek için daha yüksek olması gerektiğini söylüyor. Böylece Mars, çok erken bir zamanda atmosferinin çoğunu kaybetmeye başladı.

Bu nedenle faz diyagramı, maddenin farklı aşamalarının nasıl etkileşime girdiğini anlamak için mükemmel bir yol. Gezegen ölçeklerindeki koşulların zaman içinde nasıl değiştiğini bize anlatabildiği için açıklayıcı bir gücü var. Jeolojik gözlemleri fiziksel ilkelerle ilişkilendirmemizi sağlar.

2.12.2 Faz Diyagramları ve Yaşam

Faz diyagramının yaşam için önemini de düşünebiliriz. Şekil 2.16'daki üçlü noktanın üzerindeki suyun katı ve sıvı bölgeleri arasındaki 'erime eğrisine' bakın.

Çizginin negatif değişimi var –üçlü noktadan gelen basınçta yukarı doğru takip ettikçe sağdan sola gider. Bu sıra dışı. Çoğu materyal pozitif bir değişime sahiptir (Şekil 2.18). Bu, katı suyun (buz) sıvı sudan daha az yoğun olmasından kaynaklanmaktadır. Çoğu madde için, diyagramın sıvı kısmında erime eğrisine yakın bir noktaya değinirseniz ve onu basınçlandırmayı düşünürseniz (yani, *y* ekseninde yukarı doğru hareket ettirirseniz), bir katıya dönüşür. Başka bir deyişle, çoğu maddenin sıvısına basınç verirseniz, yoğunlaşır ve katılaşır.

Bununla birlikte, su ile katı fazına basınç uygularsak, yoğunluk artar ve sıvı suya dönüşür (başka bir deyişle, şimdi Şekil 2.16'daki su fazı şemasında erime eğrisine yakın buz bölgesinde *y* eksenini yukarı doğru hareket ettirin). Sıvıya dönüşecektir.

Biyolojik sonuçlar önemlidir, çünkü su donduğunda gölün yüzeyinde yüzer. Bu durum, büyük çok hücreli organizmaların dış sıcaklıklar suyu dondurmak için gerekli olan sıcaklığın altına düştüğünde aktif ve canlı kalmasını sağlar –yüzen buz, altındaki suyu donmaktan korur (Şekil 2.19).



Şekil 2.18 Pozitif erime eğrisi değişimine sahip 'tipik' bir maddenin faz diyagramı.
(Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 2.19 Balıklar suyun faz diyagramı üzerindeki negatif erime eğrisinden faydalanarak buzun altında hayatta kalır (Kaynak: Marsinfomage / flikr).

2.13 Maddenin Diğer Halleri

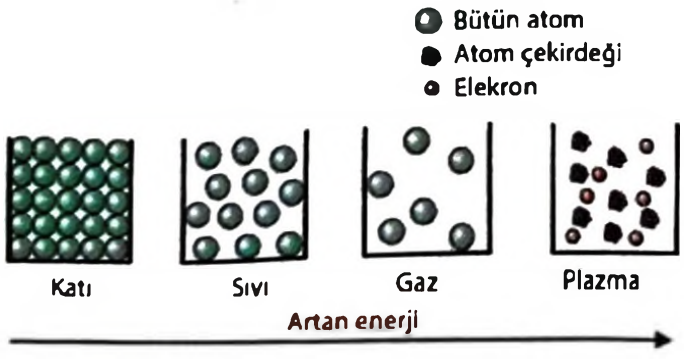
Önceki bölümde gazlara, sıvılara, katılara ve bunların ilişkilerine baktık. Gezegen bilimi ve yaşam için elde edebileceği sonuçların birkaç örneğini inceledik.

Bu bölümde diğer bazı önemli hallere bakacağız. Bu hallerin yaşamın yapısında hiçbir rolü yoktur, ancak evrenin yapısında, özellikle yıldızların, karakteristiklerinin ve gezegenlerin var olabileceği çevrelerindeki potansiyel ortamlarında önemli bir rol oynarlar. Ayrıca, yaşamda var olan konuya bazı faydalı bağlamlar sağlarlar ve biyolojinin evrendeki farklı madde durumlarının sadece bir alt kümesini nasıl kullandığını gösterir.

2.13.1 Plazma

Plazma, evrendeki 'sıradan' maddenin yaklaşık %99'unu oluşturan, maddenin son derece önemli bir aşamadır.

Plazma ilk olarak 1879'da William Crookes (1832–1919) tarafından keşfedildi, ancak Irving Langmuir (1881–1957) terimi kullandığında, 1928 yılına kadar 'plazma' olarak adlandırılmadı. Bazen 'maddenin dördüncü hali' olarak adlandırılır. Gazların, katıların veya sıvıların aksine, plazma çok büyük bir iyon bileşenine sahiptir (Şekil 2.20). Dış orbitallerdeki elektronlar yüksek sıcaklıklarda sıyrılır ve sonuç, artık bağlı olmayan iyon ve elektron topluluğudur. Serbest



Şekil 2.20 Maddenin diğer hallerine göre plazmanın yapısı
(Kaynak: Charles Cockell).

elektronların bir sonucu olarak, plazma elektromanyetik alanlara güçlü bir şekilde tepki verir ve bu tür alanlara maruz kaldığında benimseyebileceği karmaşık kalıpları kısmen açıklar.

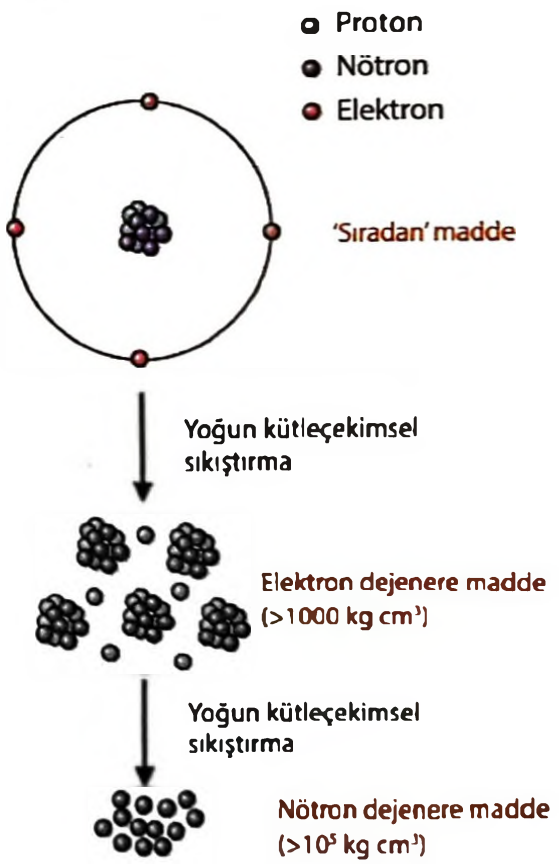
Sıcak plazma tipik olarak binlerce derece Kelvin sıcaklığındadır. Bunun bir örneği, Güneşin atmosferinde yüksek sıcaklıkların onu iyonize ettiği gazdır. Diğer örnekler şimşek ve kuzey ışıkları, Dünyanın atmosferik gazlarının geçici ısınmasının atomları iyonize ettiği Aurora Borealis'tir. Gündelik örnekler arasında, tipik olarak yaklaşık 300-1000 K sıcaklıklarında üretilen daha soğuk plazmalar olan neon aydınlatmada veya flüoresan ampullerde bir plazma gazının parıltılı boşaltılması bulunur.

2.13.2 Dejenere Madde

Dejenere madde, serbest, etkileşmeyen parçacıkların bir topluluğudur ve çok yüksek yoğunlukta ya da düşük sıcaklıkta oluşur (Şekil 2.21). Dejenere maddeye, Fermi gazı veya dejenere gaz da denir, ancak geleneksel gazlardan çok farklı davranır. Dejenere madde ilk olarak 1926'da Ralph Fowler (1889–1944) tarafından iyon ve elektron karışımı için tanımlanmıştır. Elektron dejenere maddesinde elektronlar ana atomlardan ayrışmaya zorlanır, atom çekirdeği ve serbest elektronlar içeren bir materyal üretilir (bir anlamda metallerin elektron 'denizleri' dejenere madde olarak kabul edilebilir). Elektronlardan bu sıyırma işlemi, bir yoğun gazın yoğun basınçlara maruz bırakılmasıyla başarılabilir. Ortaya çıkan malzeme çok yüksek bir yoğunluğa (yaklaşık 1000 kg cm^{-3}) sahiptir.

Bu tür bir konuyu anlamak için, şu ana kadar genel olarak ilgilendiğimiz atomik ve moleküler ölçekten astronomik ölçeğe geçmek yol göstericidir. Bu materyali astronomik nesnelerin içinde bulduk, bu da bize biraz astronomi keşfetmek için bir fırsat verir.

Elektron dejenere madde beyaz cüce yıldızlarda bulunabilir. Beyaz cücelerin gökadadaki yıldızların



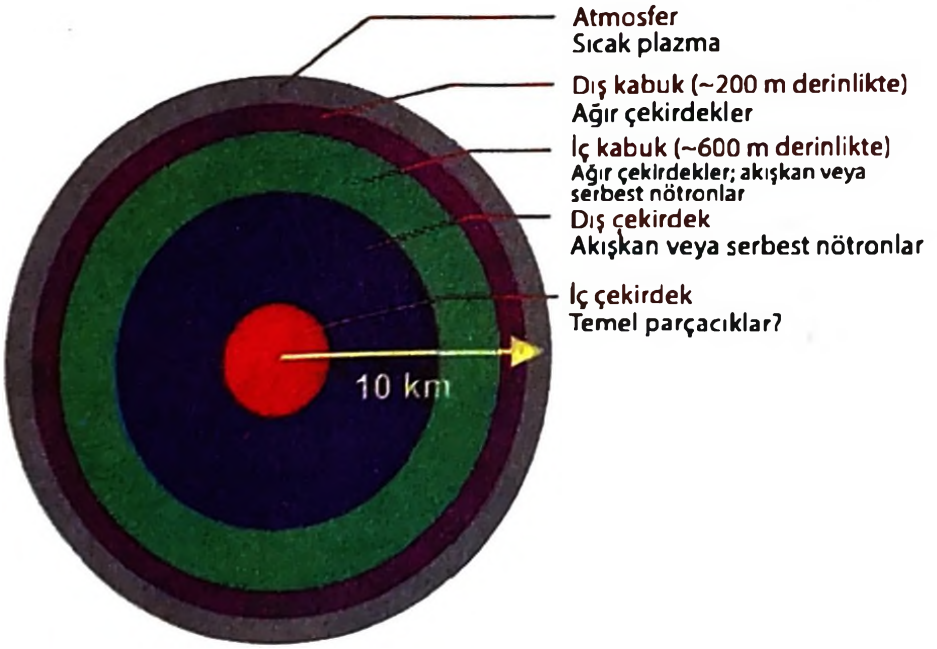
Şekil 2.21 Elektron ve nötron maddeyi dejenere eder. Elektron dejenere maddesinde elektronlar atomların çekirdeğinden serbestleşirler. Nötron dejenere maddesinde elektronlar, nötronları oluşturmak için protonlarla birleşmeye zorlanır
(Kaynak: Charles Cockell).

yaklaşık %97'sinin son hali olduğu düşünülmektedir ve yaşamının sonuna geldiğinde bizim Güneşimiz böyle bir yıldızı oluşturacaktır.

Bir beyaz cücenin içinde, herhangi bir yıldızın içinde olduğu gibi, devam eden bir savaş var. Bir yandan, kütleçekim kuvvetleri yıldızın içine çökmesine neden olacak bir etkiye sahipken, diğer yandan gaz basıncının dışarıya doğru itişi kütleçekimnden kaynaklanan bu çöküşü önleme eğilimindedir. Beyaz cücede, bu denge yıldızın içindeki basınçların atom çekirdeğinden elektronları çıkarması ve elektron dejenere madde oluşturması için yeterlidir. Bununla birlikte, bir elektron dejenere maddesinin kütlesi için, **Chandrasekhar** sınırının ötesinde, elektron dejenerasyon basıncının maddeyi kendi kütleçekimi altında çökmeye karşı destekleyemediği bir üst sınırı vardır. Sınır, Güneşe benzer niteliklere sahip nesneler için Güneşin kütlesinin yaklaşık olarak 1,44 katıdır. Yıldız bundan daha yüksek bir kütleye sahipse, daha da çökecektir.

Maddeyi sıkıştırmaya devam edersek, elektronların enerjisi, nötronlar üretmek için protonlarla bir araya gelmesinin enerjik olarak elverişli olduğu noktaya yükselir (Şekil 2.21) ve nötron dejenere madde oluşur. Bu malzemenin yoğunluğu, elektron dejenere maddeden bile büyüktür (> 105 kg cm^{-3}). **Nötron yıldızlarının** inşa edildiği materyal budur. Bir nötron yıldızı, beyaz cücenin binde biri kadar bir çapa sahiptir. Bu nesnelerin iç yapısı belirsizdir, ancak böyle bir yapının bir modeli Şekil 2.22'de gösterilmektedir.

Nötron yıldızları, Dünyanın yönünü işaret ettiği takdirde **pulsar** olarak algılanabilen ve yaklaşık 5–650 s arasında bir frekansa sahip olan radyo veya ışık enerjisi ışınlarını üreten muazzam manyetik alanlarıyla çok hızlı bir şekilde dönerler.



Şekil 2.22 Bir nötron yıldızının varsayımsal yapısı (Kaynak: Charles Cockell).

Şaşırtıcı bir şekilde, nötron yıldızları bile gökbilimcilerin ve gezegenbilimcilerin dikkatini yaşamın bir parçası olarak kaçırmamıştır. Aralık 1973'te *Astronomy*'de Frank Drake tarafından yayınlanan *Life on a Neutron Star* [Nötron Yıldızında Yaşam] adlı popüler makale, bir klasik haline geldi. Bunu bilim kurgu hikayeleri izledi, örneğin Robert Forward'ın kitapları, *Starquake* ve *The Dragon's Egg*. Bu kitaplar, yoğun kütleçekimi altındaki bir nötron yıldızının yüzeyinde yaşayan küçük varlıkların medeniyeti olan 'cheela'nın tasviridir. Uzay gemilerinde sorun yaşayan bazı talihsiz insanlara yıldızlarının yörüngesinde yardımcı olmak için müdahale ederler. Bu fikirler büyüleyici ve düşündürücüdür. Bununla birlikte, nötron yıldızları yaşam için olası yerler değil. Kitap ilerledikçe, bu açıklamaya katılmanıza veya katılmanıza neden olabilecek bazı faktörleri göz önünde bulundurabilirsiniz.

Nötron dejenere madde, büyük kütleçekim kuvvetiyle ilişkilidir. Bir nötron yıldızının etrafında ona çok yakın bir arkadaşı varsa, ona da bazı materyaller çeker. Bu materyaller yıldızın yüzeyine doğru uçar, yüzeye çarpar ve enerji açığa çıkar. Bu enerji çoğunlukla X-ışınları olarak yayılır ve nötron yıldızının dönüşüyle kontrol edilir.

Bir nötron yıldızının tipik özellikleri, 1,4 Güneş kütlesinden daha büyük bir kütleye, 10-80 km yarıçapına ve yaklaşık 1011 kg cm^{-3} yoğunluğa sahip olmalarıdır.

Nötron dejenere madde kütlesi için, beyaz cücelerdeki Chandrasekhar limitine benzeyen bir üst sınır vardır, Tolman–Oppenheimer–Volkoff limiti. Kesin sınır bilinmemekle birlikte bu sınırın üstündeki bir nötron yıldızı bir kara deliğin içine çökebilir.

Bir kara deliğin iç yapısı gerçekten bilinmiyor. Kara deliklerin iç kısmı, nötronların kendi atom altı kuarklarına ayrıldığı kuark dejenere madde içeriyor mu? Kuark dejenere maddenin de varsayımsal 'kuark yıldızları'nda ortaya çıktığı ileri sürülmüştür.

Bir kara deliğin merkezinde, yoğunluğun sonsuz olduğu bir tekillik veya tekillik halkası olduğu düşünülmektedir. Bu, evrendeki en uç noktalardan biri olarak kabul edilebilir.

2.14 Madde ve Işık Arasındaki Etkileşim

Maddenin radyasyon ve elektromanyetik tayfın farklı bölgeleriyle kızıl-altı ışığa maruz kalan nesnelerin ısıtılmasından, nesnelerin içini görüntülemek için kullanılan X-ışınlarının nüfuz edici doğasına kadar birçok karmaşık etkileşimi vardır. Bununla birlikte, burada sadece bir tane önemli etkileşime bakacağız; astrobiyologlar için özel önem taşıyan elektromanyetik radyasyonun emilimi ve yayınımı. Işığın yayılması bize diğer yıldızların, gökadaların ve yıldızlararası ortamın yapısını anlatır. Işık soğurumu, eskiden ötegezegenlerin atmosferlerindeki gazların varlığını belirlemek için kullanılırken artık yaşamı aramak için kullanılacaktır. Bunu 19. Bölümde daha detaylı olarak tartışacağız.

Işık, dalga boyu 'λ' sembolüyle ifade edilen bir dalga olarak anlaşılabilir (Şekil 2.23). Bu dalgaların tepe noktalarının veya çukurlarının belirli bir noktadan geçme sıklığı ışığın frekansıdır, *f* ve bu iki özellik arasındaki ilişki şöyledir:

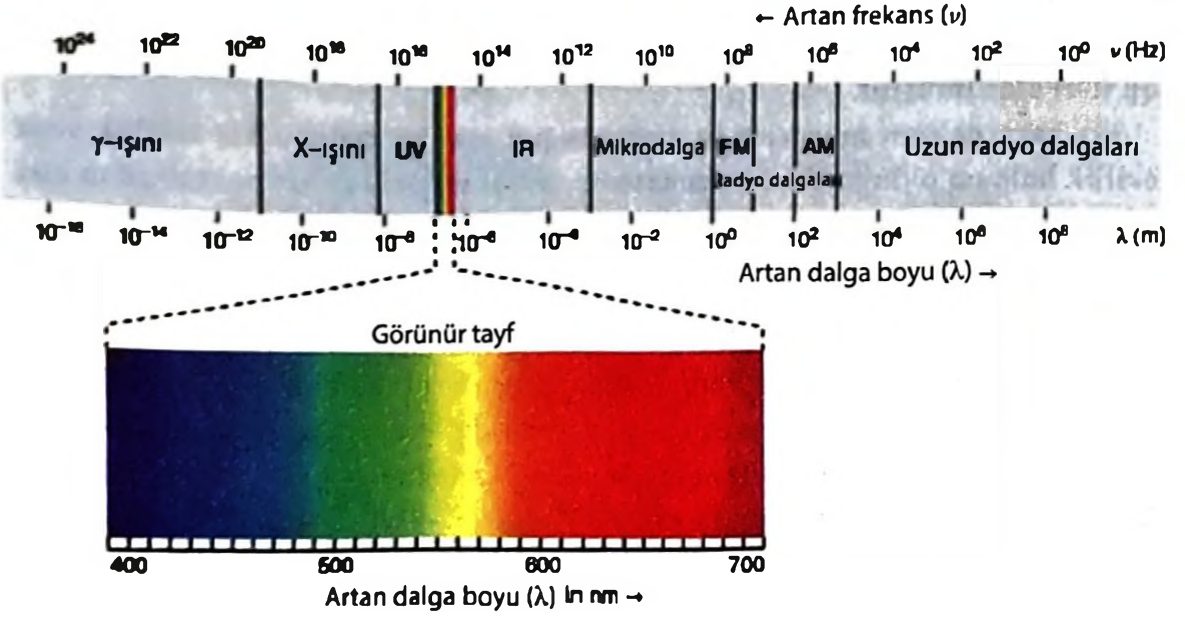
$$\lambda = c/f \tag{2.1}$$

Burada *c*, ışık hızını belirtir.

Işığın dalga açıklaması birçok uygulama için yeterlidir, ancak bazı temel gözlemleri açıklayamamaktadır. Bir yüzeyde ışığı (sadece bir enerji şekli) aydınlatırsak, elektronlara verilen enerji onların enerji seviyelerini atlamasına ya da tamamen kaybedilmesine neden olabilir. Bununla birlikte, atomlardan yalnızca belirli dalga boylarında yayılan elektronları uyarabiliriz. Ayrıca, uygun olmayan bir frekansın ışığının yoğunluğunun arttırılması, elektronların yayılmasına izin vermez. Bu gözlemler ışığın paketler halinde –kuanta– geldiğini, bazı frekansların elektronları serbest bırakmamalarını veya bir atom içindeki enerji seviyelerini değiştirmelerine neden olmaları için yeterli enerjiye sahip olduğunu gösterir. Bu farklı enerji seviyelerine kuantum seviyeleri denir. Bu kuantum seviyeleri arasındaki enerji farkı şu şekilde verilebilir:

$$E=hf \tag{2.2}$$

f, bir elektronun enerji seviyeleri arasında atlamasına izin verecek ışığın frekansı ve *h*, Planck sabitidir (6,626 x 10^{-34} J s^{-1}); ya da bunu ışık dalga boyu cinsinden ifade etmek istiyorsak $E = hc / \lambda$.



Şekil 2.23 Farklı elektromanyetik radyasyon türlerinin dalga boyu ve frekansı (Kaynak: wiki commons).

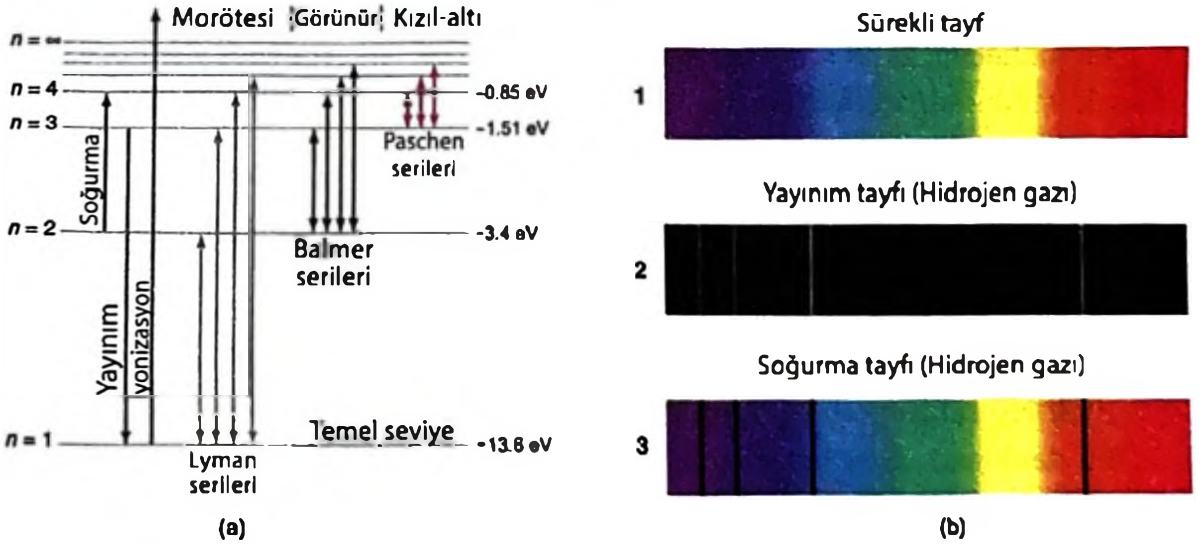
Bir elektronun bir enerji seviyesinden diğerine atlaması için gereken enerji (bu enerjinin emilmesiyle sonuçlanır; Şekil 2.24a), yani n_1 ve n_2 seviyelerindeki enerji arasındaki eşitlik şu şekildedir:

$$E(n_1) = E(n_2) + hf \qquad (2.3)$$

Herhangi bir enerji seviyesindeki enerjinin genellikle negatif bir sayı olarak verildiğine dikkat edin (Şekil 2.24a). Bu nedenle, daha küçük tam sayı enerji seviyesinin enerjisi, aralarındaki enerji farkını elde etmek için daha büyük tam sayı enerji seviyesinden çıkarılır.

Bu denklem ayrıca, bir elektron bir enerji seviyesini düşürdüğünde (n_2'den n_1'e) ve enerjisini bir foton olarak yayarsa, foton frekansının ne olacağını söyler. Bunu, $f = [E(n_1) - E(n_2)]/h$ denklemiyle ifade ederiz. Bu, bir elektron bir enerji seviyesi düştüğünde ortaya çıkan emisyon olarak Şekil 2.24a'da kavramsal olarak gösterilmektedir.

Atomun kendi yapısını göz önünde bulundurarak, belirli bir enerji seviyesinin sahip olduğu enerjiyi belirten E'nin değerini ilk ilkelerden hesaplayabiliriz. Herhangi bir enerji seviyesindeki E'nin elektronvolt (eV) cinsinden değeri, burada türetmeyeceğimiz ancak belirteceğimiz gibi, aşağıdaki denklemle hesaplanabilir. Bir gezegene çok benzeyen atomu yörüngede bir elektron düşünerek elde edilir. Gerçekte, elektronların davranışı bu olmasa da atomların bazı temel özelliklerinin türetilmesi için yeterince iyi bir yaklaşımdır. Elektronları dikkate alma konusundaki bu yaklaşım, bu modeli hazırlayan fizikçiler Ernest Rutherford (1871–1937) ve Niels Bohr'dan (1885–1962) sonra, Rutherford–Bohr atom modeli olarak bilinir.



Şekil 2.24 (a) Hidrojen atomundaki enerji seviyeleri ve bu seviyeler arasındaki elektronların hareketiyle ilişkili geçiş serileri. Aynı zamanda, bir elektronun temel seviyesinin kaybını içeren yayınım çizgilerine, soğurma çizgilerine ve iyonlaşmaya neden olan geçişler gösterilmektedir. (b) Sürekli tayfla (1) karşılaştırıldığında, bir tayftaki yayınım çizgileri (2) ve Fraunhofer (soğurma) çizgileri (3).

Bir elektronun bir atomdaki belirli bir enerji seviyesindeki enerjisi:

$$E(n) = -Z^2 m_e e^4 k_e / 2n^2 h^2 \quad (2.4)$$

Z, atom numarasını (veya atomdaki elektron veya proton sayısı), m_e bir elektronun kütlesini, e, elektronun yükünü, k_e, Coulomb sabitini, n, enerji seviyesini ve h Planck sabitini tanımlayan tam sayılardır.

Bu enerji yaklaşık olarak şöyle de ifade edilebilir:

$$E(n) = -13{,}6Z^2 / n^2 \text{ eV} \quad (2.5)$$

13,6 değeri, Rydberg enerji birimi (Ry) olarak da bilinir.

Az önce gördüğümüz formülü alarak (Denklem 2.5) bir elektronun bir enerji seviyesinden diğerine atlamasını sağlamak için gereken enerjinin (veya bir elektron bir enerji seviyesinden diğerine düştüğünde salınan bir fotonun enerjisinin) ne olduğunu aşağıda verilen formülle de bulabiliriz:

$$E = E(n_1) - E(n_2) = Z^2 Ry(1/n_1^2 - 1/n_2^2) \quad (2.6)$$

Burada n_1 ve n_2 enerji seviyeleridir ve $n_1 < n_2$'dir.

Bu ifade elektron voltta enerjiyi verir. Joule cinsinden değeri vermek için 1,602 x 10^{19}'la çarpılabilir.

2.14.1 Hidrojen Atomunun Özel Durumu

Hidrojen için Z değeri 1'dir; bu bizi bir elektronun enerji seviyelerini değiştirmesi için gereken enerjinin genel formülüne yönlendirir:

$$E = E(n_1) - E(n_2) = Ry\,(1/n_1^2 - 1/n_2^2) \quad (2.7)$$

Bu nedenle, bu iki enerji seviyesi arasındaki bir geçişle yayılacak veya alınacak ışığın dalga boyu, ayrıca:

$$\lambda = Ry\,(1/n_1^2 - 1/n_2^2)/hc \quad (2.8)$$

Bu denklem, Rydberg formülünde (hidrojen için) bilinen farklı bir şekilde de ifade edilebilir:

$$1/\lambda = R\infty\,(1/n_1^2 - 1/n_2^2) \quad (2.9)$$

Rydberg sabiti ($R\infty$), Ry / hc'ye eşittir ve 1,097 x 107 m^{-1} değerine sahiptir.

Bu denklemin özel bir durumu, hidrojen iyonize edildiğindedir. Bu durumda, elektron verilen bir enerji seviyesinden (n) atomdan ($n_2 = \infty$) tamamen çıkarılır. Elektron toprak durumundaysa (yani $n_1 = 1$), iyonlaşma için gereken enerji Ry eV veya 13,6 eV'ye eşittir.

Hidrojende bulunacak farklı enerji seviyeleri, bir emisyon hattına yol açan ve bir emme hattına yol açan bir geçiş örnekleriyle Şekil 2.24a'da gösterilmektedir. Aynı zamanda, bir elektronun bir enerji seviyesinden yükselmek ve ato-

mu tamamen terk etmek için yeterli enerjiye sahip olduğu iyonlaşma prensibi gösterilmektedir.

2.14.2 Astrobiyolojide Kullanımı

Yukarıdaki denklemlerin ve düşüncelerin astrobiyolojiye olan etkileri şimdi açıklanabilir.

Sıcak bir gaz ışığı emdiğinde, farklı gazlardaki elektronlar enerji seviyelerini atlar ve tekrar aşağı düşerek farklı dalga boylarında ışık yayar. Bunlar yayınım tayflarına yol açmaktadır. Her gaz, elektronik orbitallerinin farklı enerji seviyelerine tekabül eden tayf boyunca düzenlenmiş çizgilerle atomik yapısının bir parmak izi olan çok karakteristik bir yayınım tayfına sahiptir (Şekil 2.24b). Bu yayınım tayfı astronomik nesnelerdeki gazları tanımlamak için kullanılabilir. Bu etkiler basınca bağlıdır ve çok yüksek basınçlarda, sıcak gazlar karakteristik emisyon çizgileri olmadan sürekli tayf üretme eğilimindedir.

Uzak yıldızların atmosferinde, on dokuzuncu yüzyılın sonlarında başlayan gazların tespiti, nihayetinde uzak yıldızların diğer güneşler olduğunu doğruladı. Bu gazları farklı renk ve parlaklıktaki yıldızlarda karakterize ederek, yıldızları sistematik olarak farklı spektral tiplerde sınıflandırmak mümkün hale geldi.

Aksine, eğer ışık soğuk bir gazdan geçerse, gaz, elektronların enerji seviyelerini, farklı gazların atom yapısına bağlı olarak atlamalarını sağlamak için gereken enerjilere karşılık gelen belirli dalga boylarında soğurma eğiliminde olacaktır. Bunlar karakteristik bir soğurma tayfı yaratır. Yıldızlardan gelen soğurma tayfları, adını Alman gözlükçü Joseph von Fraunhofer (1787–1826; Şekil 2.24b)'dan alan Fraunhofer çizgileriyle karakterize edilir. Bir yıldızdaki sıcaklık ve yoğunluk, çizgilerin yoğunluğunu etkiler ve böylece belirli bir yıldızın özellikleri hakkında bilgi verebilirler.

Daha sonra göreceğimiz gibi, soğurma spektroskopisi, yalnızca yıldızların gaz bileşimini değil, Güneş Sistemi dışındaki gezegenlerin sahip olduğu gezegen atmosferlerini de incelememize olanak sağlar. Gezegen atmosferinde dolaşan bir yıldızın ışığını kullanarak, atmosferin gaz halindeki bileşimini belirleyebilir ve yaşamın izleri olan gazları arayabiliriz (Bölüm 19).

Bu son bölümün özetini, atomun yapısı anlaşılmadan önce spektroskopinin üç kanunu olarak adlandırılan listeyi oluşturan Alman fizikçi Gustav Kirchhoff'a (1824–1887) bırakıyoruz:

1. Sıcak bir katı nesne sürekli bir tayf ortaya çıkarır (kara cisim olarak adlandırılır; buna Bölüm 8'de döneceğiz).
2. Düşük basınç altında sıcak bir gaz, gazdaki atomların enerji seviyelerine bağlı olan parlak bir çizgi veya yayınım tayfı üretir.
3. Daha soğuk bir gazla çevrili sıcak bir katı cisim (örneğin, bir ötegezegen atmosferinden geçen bir yıldızdan gelen ışık), gazdaki atomların enerji seviyelerine bağlı olarak farklı dalga boylarında boşluklara sahip olan bir tayfla (bir soğurma tayfı) ışık üretir.

2.15 Sonuç

Bu bölümde astrobiyolojiyle ilgili maddenin temel yapısını araştırdık. Konuyla ilgili beş ana bağ türünü tanıdık ve her bir bağ türünün yaşamdaki rolünü bazı örneklerle değerlendirdik. Maddenin farklı durumlarda nasıl tanımlanabileceğini ve basit faz diyagramları kullanarak Dünya dışı ortamların fiziksel özelliklerinin ve canlı davranışının çeşitli özelliklerini açıklayabileceğimizi gördük. Canlıların bir parçası olmasa da kesinlikle evrenin her yanına dağılmış ve yaşamın içinde bulunduğu astronomik çevre için sonuçları olan sıra dışı bazı durumlara baktık. Son olarak, uzak yıldızlarda veya gezegenlerde gazların özelliklerini araştırmak isteyen bilim insanları için ışığın maddeyle nasıl etkileşime girdiğini ve spektroskopinin ilkelerini araştırdık. Bu bilgiler ışığında, artık atomların ve moleküllerin yaşamın temel moleküllerini oluşturmak için nasıl bir araya getirildiğini inceleyebiliriz.

İleri Okumalar

Kitaplar

Pavia, D.L., Lampman, G.M., Kriz, G.S. (2000) *Introduction to Spectroscopy.* Brooks/Cole, Kentucky.

Tabor, D. (1991) *Gases, Liquids and Solids: And Other States of Matter.* Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge.

Yayınlar

Attard, P. 1996. Patterns of hydrogen bonding in water and ice. *Physics A* 233, 742–753.

Auffinger, P., Hays, F.A., Westhof, E., Ho, P.S. (2004) Halogen bonds in biological molecules. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101, 16789–16794.

Autumn, K., Sitti, M., Liang, Y.A., Peattie, A.M., Hansen, W.R., Sponberg, S., Kenny, T.W., Fearing, R., Israelachvili, J.N., Full, R.J. (2002) Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, 12252–12256.

Burrows, A.S. (2014) Spectra as windows into exoplanet atmospheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 12601–12609.

Drake, F.D. (1973) Life on a neutron star. *Astronomy* December, p. 5.

Fidler, A.L., Vanacore, R.M., Chetyrkin, S.V., Pedchenko, V.K., Bhave, G., Yin, V.P., Stothers, C.L., Rose, K.L., McDonald, W.H., Clark, T.A., Borza, D.B., Steele, R.E., Ivy, M.T., Aspirnauts, T., Hudson, J.K., Hudson, B.G. (2014) A unique covalent bond in basement membrane is a primordial innovation for tissue evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 331–336.

Gobre, V.V., Tkatchenko, A. (2013) Scaling laws for van der Waals' interactions in nanostructured materials. *Nature Communications* 4, DOI 10.1038/ncomms3341.

Holm, R.H., Kennepohl, P., Solomon, E.I. (1996) Structural and functional aspects of metal sites in biology. *Chemical Reviews* **96**, 2239–2314.

Horowitz, S., Trievel, R.C. (2012) Carbon–oxygen hydrogen bonding in biological structure and function. *Journal of Biological Chemistry* **287**, 41576–41582.

Jones, E.G., Lineweaver, C.H. (2012) Using the phase diagram of liquid water to search for life. *Australian Journal of Earth Science* **59**, 253–262.

Jones, E.G., Lineweaver, C.H., Clarke, J.D. (2011) An extensive phase space for the potential Martian biosphere. *Astrobiology* **11**, 1017–1033.

Lattimer, J.M., Prakesh, M. (2004) The physics of neutron stars. *Science* **304**, 536–542.

Leckband, D., Israelachvili, J. (2001) Intermolecular forces in biology. *Quarterly Reviews of Biophysics* **34**, 105–267.

Raines, R.T. (1997) Nature's transitory covalent bond. *Nature Structural Biology* **4**, 424–427.

Tadmore, R. (2001) The London–van der Waals inteaction energy between objects of various geometries. *Journal of Physics: Condensed Matter*

3

YAŞAMIN YAPISI: MOLEKÜLLERİ İNŞA ETMEK

Öğrenme Çıktıları

- Karbon, hidrojen, azot, oksijen, fosfor ve kükürtün (CHNOPS) yaşam için gerekli olan temel elementler olduğunu anlamak. Diğer elementler, belirli canlı türlerine özgü çeşitli fonksiyonlar için de kullanılabilir.
- Moleküllerin omurgasını oluşturan en becerikli elementin neden karbon olduğunu anlamak –yaşam 'karbon bazlı'dır.
- Proteinler, karbonhidratlar, lipidler ve nükleik asitler gibi temel biyolojik makromoleküllerin özelliklerini bilmek.
- Protein ve karbonhidrat gibi bazı moleküllerin kiral olduğunu anlamak.
- Suyun neden yaşam için çok yönlü ve en uygun çözücü olduğunu anlamak.
- Silisyum gibi alternatif yapı taşı elementleri ve amonyak gibi alternatif çözücüler için önerilen bazı argümanları ve bazı sınırlamaları anlamak.

3.1 Yaşamı İnşa Etmek

Önceki bölümde, farklı bağ türlerinin atomların, iyonların ve moleküllerin birleşmesine nasıl olanak sağladığını gördük. Yaşam bu birimleri, tıpkı bir inşaat setine benzer şekilde, sizin ve benim gibi çok hücreli organizmalarda, organlarda ve tüm canlılarda hücrelerin yapısını oluşturan makromoleküller (çok büyük moleküller) haline getirir.

Önceki bölümden yola çıkarak çok basit bir soruyla başlayabiliriz: Yaşamın molekülleri bir araya getirmek için ihtiyaç duyduğu minimum element takımı nedir? Yaşamın inşa edildiği madde şaşırtıcı bir şekilde Periyodik Tablodakilerle sınırlıdır ve bu nedenle elindeki seçenekler sınırsız değildir.

Dahası, Periyodik Tablonun evrensel olduğunu varsayabiliriz. Hiçbir astrofizikçi henüz evrende tamamen yabancı kimyaya sahip olan bir yer gözlemle-

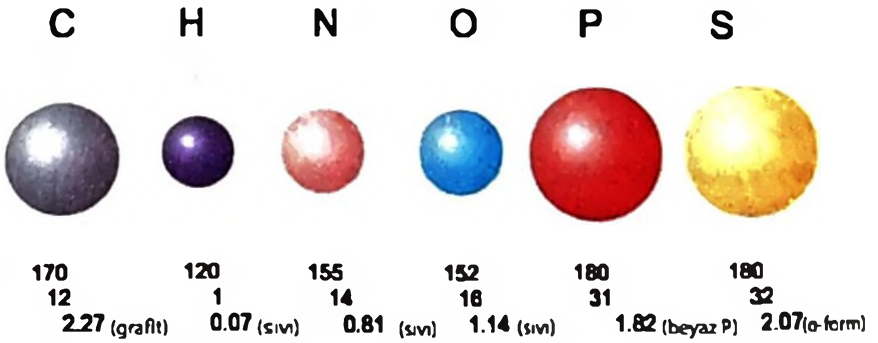
mediklerinden dolayı, bu gayet mantıklı bir varsayım olarak görülebilir. Hatta tam tersine, daha sonraki bölümlerde göreceğimiz üzere, karbon gibi yaşamda büyük öneme sahip olan çoğu elementin evren boyunca şaşırtıcı bir şekilde bol miktarda var olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, Dünyadaki yaşamla alakalı yaptığımız gözlemler evrenin herhangi bir yerindeki yaşamın potansiyel kimyasıyla ilgili önemli görüşler ortaya koymaktadır.

3.2 Temel Elementler: CHNOPS

Yaşamın inşa edildiği molekülleri araştırırsak, tüm canlılarda bulunan ve genellikle yaşamın 'yapı taşı' olarak tanımlanan altı tane element buluruz (Şekil 3.1). Bu elementler C (karbon), H (hidrojen), N (nitrojen), O (oksijen), P (fosfor) ve S (kükürt)'dir; bazen daha kolay akılda tutmak için CHNOPS veya SPONCH şeklinde kısaltılırlar – seçiminizi yapın.

Birazdan göreceğimiz gibi, yaşamdaki çoğu karmaşık molekülün omurgası olarak karbon kullanılmaktadır. Karbon hem inorganik hem de organik formlarda bulunur. İnorganik karbon, C–H bağları olmayan ve kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) gibi minerallerin dâhil olduğu bir formdur. Bizim ilgilendiğimiz form ise, en azından canlılık bakımından, organik karbon veya H, N ve O gibi elementlerle birleştirilmiş karbondur. Adı talihsizdir; başlangıçta bu karbonun yalnızca canlılarda bulunabileceği görüşünden türetilmiş, ancak şimdi organik karbon bileşiklerinin biyolojik olmayan süreçlerle de oluşturulabildiğini biliyoruz.

Peki ya diğer beş element? Hidrojen, birçok atoma –CH, $-NH_2$, –SH gruplarından bağlanır ve yaşamda bulunan tüm organik bileşiklerde yaygın olarak bulunur (oksijene ek olarak, yaşamın çözücüsü olan suyun içinde olduğu gibi). Nitrojen, birçok karbon bazlı halka yapısında ve amino asitte bulunur. Aynı zamanda var olan organik moleküller arasında daha yüksek bir karmaşıklık derecesi sunar. Oksijen birçok organik bileşikte temel atomdur. Halka



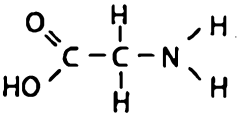
Şekil 3.1 Yaşamın her yerinde bulunan altı element, CHNOPS. Pikometre (pm) cinsinden van der Waals yarıçapı, sert bir küre olarak modellendiğinde atomun etkin yarıçapıdır. Ayrıca, elementlerin belirli formları için atomik kütle ve yoğunluk da gösterilmiştir. Renkli küreler atomların göreceli boyutlarını gösterir (Kaynak: Charles Cockell).

yapılarında, 'OH' gruplarında (örneğin şekerler ve alkollerde) ve diğer bağlarda bulunur; tekrar organik karmaşıklık derecesini arttırır. Fosfor, yaşamın enerji moleküllerinde ve DNA gibi nükleik asitlerde bulunur. Sülfür ise sistein gibi bazı amino asitlerde bulunur.

Elbette yaşam, bazı metaller gibi diğer birçok elementi bir araya getirir. Bu metallere, canlılarda enerji alımına katılan proteinlerin bir parçasını oluşturan demir ve bakır örnek verilebilir (Bölüm 5"te tartışılacak). İnsanlarda demir, kanımızdaki oksijeni taşıyan protein olan hemoglobinin temel bir bileşenidir. Kemiklerde kalsiyum kullanılır. Bu elementler daha özeldir ve farklı durumlarda farklı biyokimyasal amaçlar için canlılar tarafından yönetilebilir. Öyleyse yaşamın, temel yapılarını inşa etmek için CHNOPS kullandığını düşünebilir ve daha sonra özelleşmiş fonksiyonları yerine getiren belirli molekülleri bir araya getirmede yararlı olabilecek diğer elementleri bulmak için Periyodik Tabloda bir gezintiye çıkabiliriz.

3.3 Karbon Çok Beceriklidir

Yaşamın elementleri, moleküller oluşturmak için kombinasyon halinde bir araya gelirler. Bu moleküllerin en yaygın omurgası karbondur. Örneğin Şekil 3.2'deki glisin gibi basit bir amino asitte, iki karbon atomu bu molekülün çekirdeğini oluşturur. Bu atomların çoğu, glisin için gösterildiği gibi, birbirlerine kovalent olarak bağlanır. Biyolojik moleküllerde karbonun bolluğu, Dünyadaki yaşamı 'karbon bazlı' olarak adlandırdığımız anlamına gelir.



Şekil 3.2 Organik molekül, glisin, en basit amino asit (Kaynak: Charles Cockell).

Karbonun yaşamın temel yapı taşı olmasının çeşitli nedenleri vardır. H, N, O, P ve S gibi birçok bileşikle stabil bağlar oluşturur, ancak bu bağlar onları kırmak için büyük miktarlarda enerji kullanılmasını gerektirecek kadar kararlı değildir (eğer öyle olsaydı, bu bağların parçalanması ve gıda maddelerinin metabolize edilmesi zor olurdu). H (413 kJ mol^{-1}), N (308 kJ mol^{-1}), O (360 kJ mol^{-1}), S (272 kJ mol^{-1}), P (264 kJ mol^{-1}) ile diğer karbon atomlarının (347 kJ mol^{-1}) bağ oluşturması veya koparması için gerekli olan enerji oldukça benzerdir; bu, karbonun bu atomlar arasında fazla enerji gerektirmeden veya dışarıya salmadan değiş tokuş edebileceği anlamına gelir. Bu, parçalama ve yeni karmaşık moleküller oluşturmada karbonda çok yönlülük sağlar. Ayrıca, karbon ikili ve üçlü kararlı karbon-karbon bağları oluşturur ve bu da olası bileşiklerin çeşitliliğini arttırır.

İki boyutlu yapıdaki karbon içeren moleküller zincirlerden halkalara kadar çeşitlilik gösterir. En basit karbon molekülleri, alkanlardır [$C_nH_{(2n+2)}$]. N = 1 ise bu molekül, Satürn'ün uydusu Titan'da çok yaygın olan ve metanojenler adı

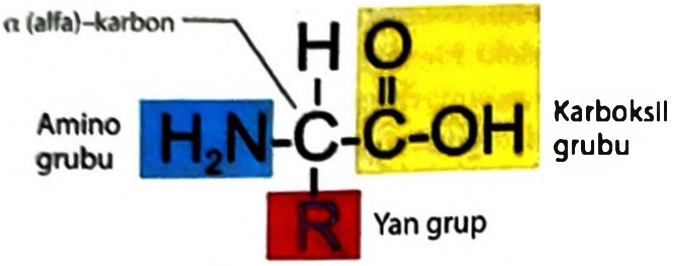
verilen mikroplar tarafından Dünyada yeraltında üretilen CH_4 veya metandır. N = 2 ise molekül, evrendeki bir başka ortak organik molekül olan C_2H_6 yani etandır. Hidrojenin başka atomlarla yer değiştirmesi, farklı biyokimyasal fonksiyonlarda geniş kullanımlı fonksiyonel gruplar oluşmasıyla sonuçlanır. Örneğin, esterler –COO–R genel formülüne sahiptir (burada R, bir alkil grubudur $-C_nH_{(2n+1)}$ genel formülüne sahip) ve hücrelerin zarlarında bulunurlar. Amino ($-NH_2$) ve karboksil (–COOH) grupları proteinlerde amino asitler oluşturmak için karbona bağlanır. Fosfat grubu $-PO_4$, genetik bilgi, DNA ve enerji depolama moleküllerinde ortaya çıkan çok çeşitli fosfat içeren çok çeşitli molekülleri üretir. Alkoller, enerji veren reaksiyonlarda mikroorganizmalar tarafından kullanılan –OH grubu olan karbon bileşikleridir. Ve böylece, karbonun diğer karbon atomları da dâhil olmak üzere CHNOPS elementlerine kovalent olarak bağlanmasıyla oluşan muazzam çeşitlilikteki bileşiklerle liste devam eder.

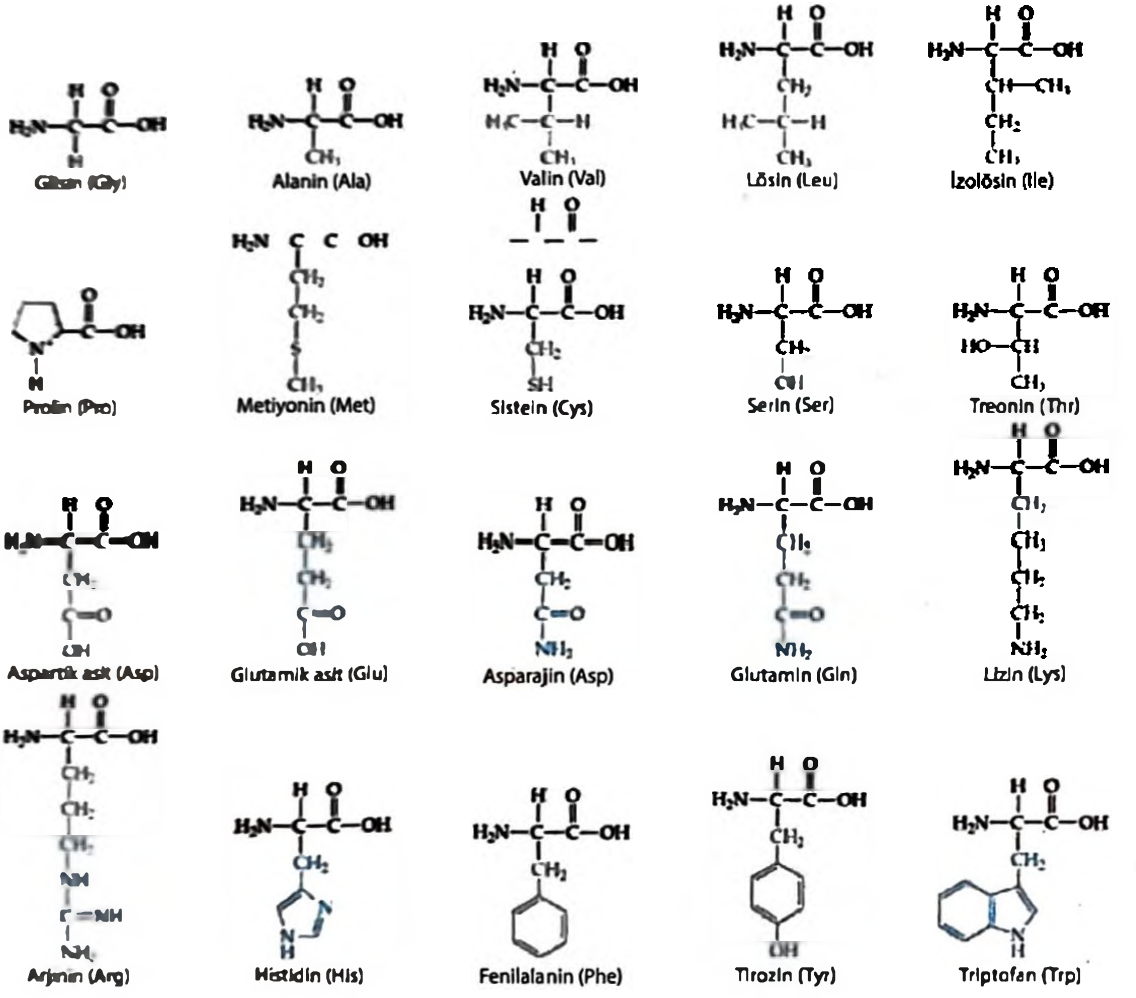
3.4 Yaşamın Halkaları

Moleküllerin oluşumunu tartışırken yaşamın göze çarpan tek bir özelliğini tanımlamak zorunda olsaydık, muhtemelen zincir oluşturma eğiliminde olduğunu söylerdik. Belki de bu o kadar şaşırtıcı değil. Yaşam karmaşıktır ve karmaşık moleküller oluşturmak istiyorsak, bunu yapmanın en iyi yolunun basit molekülleri alıp onları daha karmaşık zincirlere bağlamak olduğunu öngörebiliriz. Yaşamdaki temel molekül sınıflarının tümü, polimerizasyon işlemiyle moleküllerin (monomerler) zincirlerde (polimerler) bir araya getirilmesiyle oluşmaktadır. Burada, canlılardaki dört temel molekül sınıfına bakacağız.

3.5 Proteinler

İlk örneğimiz proteinler. Proteinler, amino asit zincirlerinden oluşur. Bu zincirlere polipeptidler denir. Proteinlerdeki amino asitler, alfa-karbon adı verilen merkezi karbona bağlı bir amin (–NH2) grubundan ve bir karboksilik asitten (–COOH) oluşan karbon molekülleridir. Alfa karbonunun kendisine bağlı bir yan grubu da vardır. Biyolojide bulunan amino asitlerin çeşitliliği bu yan grupların farklılığından kaynaklanır (Şekil 3.3). Doğada bilinen 500'den fazla farklı çeşit amino asit bulunmasına rağmen bu bileşiklerin sadece 20'si canlılarda yaygın olarak kullanılırken, diğer iki tanesi (selenosistein ve pirolizin) (Şekil 3.3) ise daha nadiren kullanılmaktadır. Bundan dolayı yaşam çok seçkin bir sayı kullanır. Bunun neden böyle olduğunu bilmiyoruz. Bu durum, bir ev inşa eden birinin neden yerel bahçe merkezlerinde bulunan harika tuğla çeşitlerinin tümünü kullanmadığını sormak gibi olabilir. Bunların hepsini kullanmanın bir anlamı yoktur, çünkü bu, tuğla tipleri arasında uyumsuzluğa ve işin yapılması için çok fazla karmaşıklığa yol açacaktır. 20 amino asit, bir yaşam formunun oluşmasına ve çoğalmasına izin veriyorsa, ortada daha fazla amino asit kullanmak için evrimsel bir seçim baskısı yoktur.





Şekil 3.3 Yan grupların (mavi renkte) farklı kimyasal yapılarını gösteren yaşamdaki 20 ana amino asidin çeşitliliği. Ayrıca parantez içinde her amino asidin üç harfli gösterimi de verilmiştir (Kaynak: wikicommons).

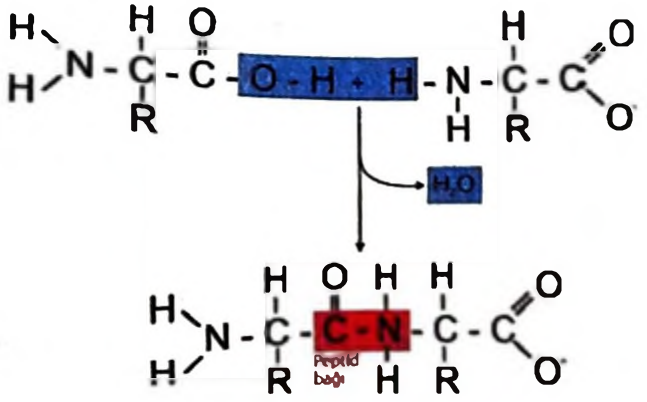
Şekil 3.3'te, yan grubun değişmesiyle oluşturulan çeşitli amino asitleri görebilirsiniz. Amino asitlerin tam isimlerinin belirtilmesinin yanı sıra üç harfli (Şekil 3.3) ve bir harfli kodları (Ek) da verilmiştir. Yan gruplar, amino asitlere farklı özellikler kazandırır. Serin, asparajin ve histidin gibi amino asitler polardır, yani hidrojen bağında yer alma kabiliyetleri nedeniyle suda çözünürler. Alanin, valin ve lösin gibi amino asitler **hidrofobiktir**, sudan uzaklaşırlar.

Lisin, aspartik asit ve arginin gibi bazı amino asitler ise yüklüdür ve iyonik bağlarda önemli bir rol oynarlar. Bu özellikler ve sonucunda diğer moleküllerle farklı etkileşimleri, amino asit zincirlerinin birlikte katlanabileceği çok sayıda yol üretmek için gereklidir.

Amino asitler, peptid bağları vasıtasıyla zincirler halinde toplanır, burada amino asitlerin amino ve karboksil grubu dehidrasyon reaksiyonu sonucu bir su molekülünün salınmasıyla bir bağ oluşturmak üzere reaksiyona girer (Şekil 3.4). Bu polimerizasyon süreci, yüzlerce amino aside sahip proteinler inşa edilene kadar devam edebilir.

Amino asitlerin tam dizisi, proteinin hücrede ne yapacağını belirler. Asıl sorulması gereken soru, bu uzun amino asit zincirinin (**birincil yapı**) faydalı bir şeye nasıl dönüştüğüdür.

Bölüm 2'de gördüğümüz gibi, yüklü amino asitlerin bazıları iyonik bağlar oluşturmak için zincir üzerinde farklı yerlerden birbirlerine bağlanırlar (örneğin pozitif yüklü aspartik asit, negatif yüklü lisine iyonik olarak bağlanır). Bazı amino asitler ise bağ oluşturmak için kovalent olarak bağlanırlar. Örneğin, yine Bölüm 2'de de tartışıldığı gibi, kükürt içeren iki sistein amino asidi bir disülfit köprüsü oluşturur. Böylelikle, birincil yapı saç tokası, sarmal ve ikincil yapı olarak adlandırılan diğer üç boyutlu yapıları oluşturmak için bir araya gelir. Tam bir protein içindeki bütün atomik düzenlemeye üçüncül yapı denir. İşte canlılarda faydalı biyolojik işler yapabilen bu üç boyutlu yapıdır. Proteinlerdeki amino asitlerin üç boyutlu düzenlemesi, şeker gibi faydalı bir şey meydana getiren kimyasal bir reaksiyon gerçekleştirme kabiliyetine sahip olabilir. Bir protein içindeki amino asitlerin yan gruplarının reaktifleri bağlayabileceği ve kimyasal reaksiyonu katalize edebilecek şekilde yapılandırıldığı alan, **aktif bölge** olarak adlandırılır. Bazen proteinler daha da büyük bir protein yapmak için bir araya gelirler. Bu protein alt birimleri **multimerik** bir yapı oluşturur ve bu düzenleme dörtlü yapı olarak adlandırılır.

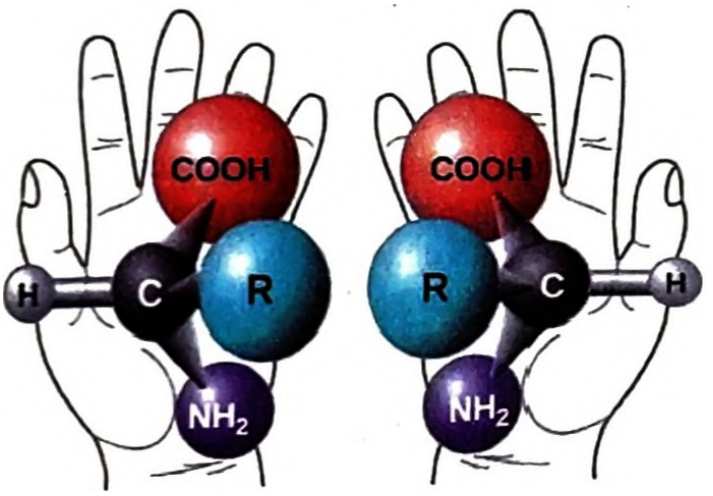


Şekil 3.4 İki amino asit arasında bir peptid bağı oluşumu. Bu dehidrasyon reaksiyonu (bir su molekülünün serbest bırakılmasını içerir), polipeptid protein zincirlerinin birleştirilmesine izin verir
(Kaynak: Charles Cockell).

Proteinler birçok fonksiyonda rol oynar. Önceki paragrafta belirtildiği gibi, kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirerek katalizör görevi görebilirler. Bu proteinlere **enzim** denir. Proteinler ayrıca hücre zarlarında yapısal materyal ve enerji transfer molekülleri olarak molekülleri taşımak için kullanılırlar.

3.6 Kiralite (sol veya sağ-ellilik)

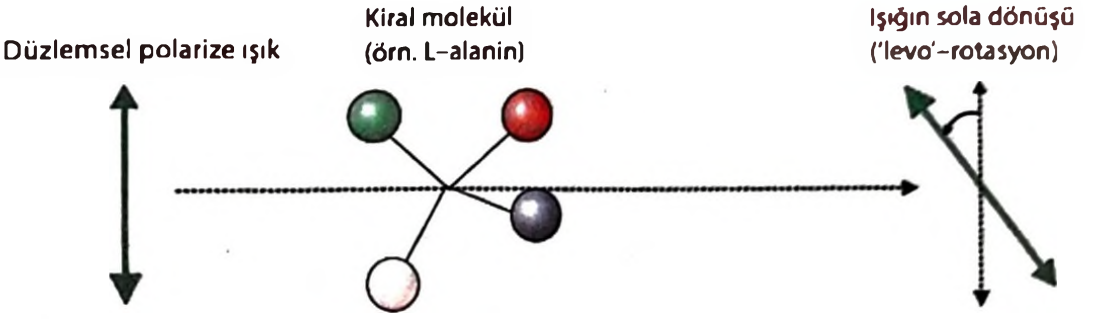
Amino asitlerin önemli bir özelliği, glisin dışında tüm biyolojik amino asitlerin **kiral** olmasıdır. Bunu açıklamanın en iyi ve ikonik yolu senin ellerin. Sol elinizin avcunu bir masanın üstüne koyun. Şimdi sağ elinizi de sol elinizin üzerine koyun. Tam olarak örtüşmüyorlar. Sol elinizin baş parmağı sağda, sağ elinizin baş parmağı ise solda kalır. Çünkü onlar ayna görüntüsüdür, üst üste binemezler (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Ellerle gösterilen kiralite ve amino asitler için genel yapı (Kaynak: wikicommons).

Dört farklı yan zincir veya daha fazlası verildiğinde, moleküller de sol ve sağ el formlarında olabilirler. Aynı kimyasal formüle sahip ancak farklı yapıda olan bileşiklere **izomer** denir. Kiral moleküllerin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan yol, polarize ışığın moleküllere çarptığında döndürüldüğü yönü esas alır (Şekil 3.6). Farklı ayna görüntüleri ışığı bir yöne ya da diğerine döndürme eğilimindedir. Eğer ışık sola döndürülürse, molekülü levorotatör veya 'L' formu olarak adlandırınız. Eğer molekül ışığı sağa döndürüyor ise – dekstrorotatör–, ona 'D' formu diyoruz. Hem L hem de D moleküllerinin eşit bir karışımına sahip olduğumuzda, karışımın **rasemik** olduğunu söyleriz. Kiral veya optik olarak aktif izomer olan iki molekülü belirtmek için özellikle **enantiyomer** terimini kullanınız.

Dünyadaki yaşamla ilgili garip olan şey, canlılarda kullanılan amino asitlerin neredeyse hepsinin 'L' formunda olmasıdır. Diğer form olan D–amino asitleri her ne kadar bakterilerin hücre zarlarında bulunsa da çok nadir görülür ve işlevleri tam olarak anlaşılamamıştır. Bu konu bir sonraki bölümde tekrar karşı-



Şekil 3.6 Kiral moleküller polarize ışığı belirli yönlerde döndürme eğilimindedir. Burada L-alanin amino asidiyle şematik olarak ışığın sola dönüşü (levorotatuar) gösterilmektedir (Kaynak: Charles Cockell).

mıza çıkacak. Yaşamın baskın olarak bir çeşit amino asit kullanmasının nedeni tam olarak anlaşılamamıştır, ancak bu durumun moleküler tanımayla bir ilgisi olabilir. Pek çok biyokimyasal etkileşim, kimyasal reaksiyonları gerçekleştirmek için bir molekülün bir başka hücreye girmesini içerdiğinden, L ve D formlarının karışımı olan bir yaşam sistemi büyük karmaşıklığa neden olur. Çünkü hem L hem de D formunu tanıyabilen aktif bölgelere sahip proteinlere ihtiyacımız olacak. L veya D formunu kullanmaya uygun bir biyokimyasal yapı ortaya çıktıktan sonra bu seçimin kullanılmaya devam edeceğini tahmin etmek makul görünüyor. Yeryüzündeki yaşam L formuna dayalı bir biyokimya geliştirmiştir.

Tartışma Noktası: Farklı kiraliteye sahip yaşam

Bu bölümün son paragrafındaki açıklamayı kabul edip etmediğinizi düşünmek isteyebilirsiniz. D-amino asitlerin protein benzeri yapılarda baskın amino asit olduğu yaşam formlarını oluşturmak mümkün müdür? Ya da başka bir yerdeki yaşam da L-amino asitlere karşı önyargılı olur mu? Astrokimyayı tartıştığımızda bu konuya geri döneceğiz (Bölüm 9) ve o bölümden sonra bu soruyu tekrar ele almak isteyebilirsiniz. Dünyadaki yaşamın neden L-amino asitleri seçtiğine ışık tutmak için hangi bilgileri toplayabilirsiniz? Sizce biyokimyasal yapısında rasemik bir D ve L-amino asit karışımı kullanan bir canlı formu için ne gibi problemler ve hatta avantajlar olabilir?

Bonner, W.A. (1991) The origin and amplification of biomolecular chirality. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* **21**, 59–111.

Breslow, R., Cheng, Z.-L. (2009) On the origin of terrestrial homochirality for nucleosides and amino acids. *Proceedings of the National Academy of Sciences 106*, 9144–9146.

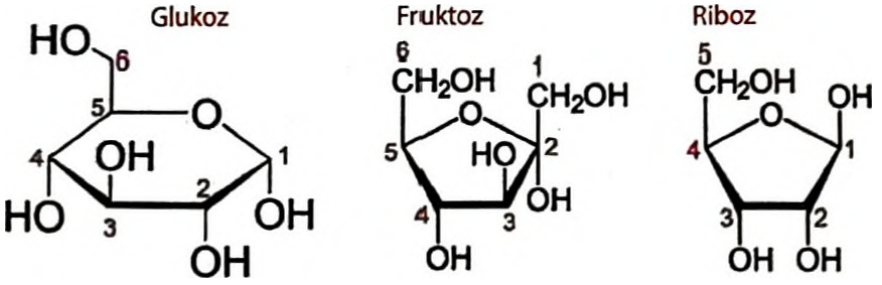
3.7 Karbonhidratlar (Şekerler)

Zincirler, yaşamın diğer önemli özelliklerinin önemli bir bileşenidir. Örneğin, **karbonhidratlar** yapısal destek ve enerji molekülleri olarak kullanılır (bu nedenle diyet yapan insanlar ne kadar karbonhidrat yedikleriyle ilgilenirler). Kar-

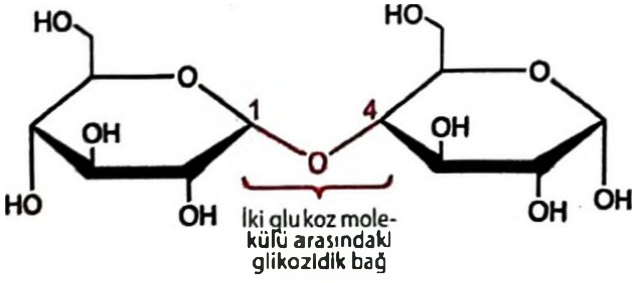
bonhidratlar, CH_2O genel formülüne sahip hidratlanmış karbon atomlarıdır. Karbonhidratlar glukoz, $C_6H_{12}O_6$ veya fruktoz (glukozla aynı kimyasal formüle ancak farklı yapıya sahip bir izomer; Şekil 3.7) gibi ayrı ayrı şeker zincirlerinden oluşur.

Altı karbon atomlu bir şekere heksoz denir (bu nedenle farklı yapılarına rağmen, glukoz ve fruktoz, her ikisi de altı karbon atomu içerdiğinden heksoz şekerlerdir). Beş karbon atomlu bir şekere ise pentoz denir. Riboz buna bir örnektir (Şekil 3.7).

Şekerler, zincir oluşturmak için proteinlerdeki peptid bağlarına benzer biçimde glikozidik bağla birleşir. O–Glikozidik bağlar, şeker molekülleri arasındaki oksijen köprülü bağlardır (Şekil 3.8). Şekil 3.8, bir glikozun –OH bağı (4 numaralı karbon) ile başka bir glukozun hemiasetal grubu (–OH grubuna ve şeker halkasındaki oksijen atomuyla bir bağa sahip olan karbon –glukozdaki 1 numaralı karbon) arasındaki bağla oluşturulan maltoz örneğini göstermektedir. Bu, neden bazen 1–4 glikozidik bağ olarak adlandırıldığını açıklar. Alternatif olarak, bir glukoz molekülünün 1 numaralı karbonu ile bir fruktoz molekülünün 2 numaralı karbonu (hemiasetal karbon) arasındaki bir bağ (1–2 glikozidik bağ) sükroz şekerini üretir.



Şekil 3.7 Glukoz, fruktoz ve riboz şekerlerinin moleküler yapısı, karbon atomları üzerinden numaralandırma düzenini gösterir. Halkaların içindeki karbon atomlarının bir harfle gösterilmediğini, ancak sayıların gösterildiği yerde bulunduğunu unutmayın (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 3.8 Glikozidik bağlar, şeker moleküllerinin birbirine bağlanmasına izin verir. Bu örnekte iki glukoz molekülü, iki şeker molekülü içeren maltozu oluşturmak üzere birbirine bağlanmıştır. Daha fazla birim ekleyerek polisakkaritler (karbonhidratlar) üretebiliriz (Kaynak: Charles Cockell).

Karbonhidrat polimerleri, birçok şeker molekülünün **glikozidik bağlarla** birbirine bağlanmasıyla üretilebilir. Bu karbonhidratlara bazen **polisakkaritler** de denir.

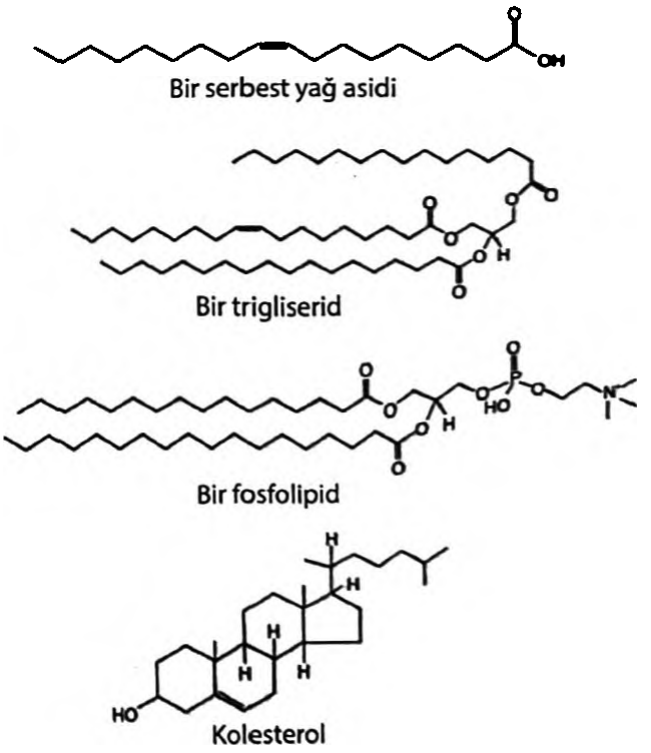
Şekerlerin sadece diğer şekerlere bağlanması gerekmez. Şeker halkalarının dikkat çekici çok yönlülüklerinden biri, moleküllere nitrojen (N–glikozidik) ve kükürt (S–glikozidik) bağları yoluyla bağlanma yetenekleridir. Bu nedenle karmaşık bir yapıya sahip çok çeşitli moleküller üretirler. N–glikozidik bağın, DNA'nın şeker omurgasının bir sonraki bölümde göreceğimiz gibi genetik kodu oluşturan baz çiftlerine bağlanması için gerekli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Amino asitler gibi, şekerler de kiral olup, L ve D formlarında bulunur. Dünyadaki tüm canlılar öncelikle D–şekerleri kullanırlar.

3.8 Lipidler

Bir başka bileşik sınıfı, çok çeşitli zincir ve halka yapısında moleküller içeren lipidlerdir. Bu sınıf, temelde tekli bağlar (örn. doymuş yağ asitleri) ve bazen çift bağlar (doymamış yağ asitleri; Şekil 3.9) aracılığıyla bir araya getirilen karbon bileşiklerinin zincirleri olan uzun zincirli karboksilik asitleri (**yağ asitleri** olarak da adlandırılır) içerir. Bir başka önemli lipid grubu, gliserol ve üç yağ asidinin bir **kombinasyonu** olan, hayvansal ve bitkisel yağlarda yaygın olarak bulunan yağlar veya trigliseritlerdir (Şekil 3.9). Birçok yağ asidi ve trigliserit bağında depolanan enerji, onları yaşamdaki enerji depolama molekülleri olarak yararlı kılmıştır. Birçok lipid, uçlarında önemli moleküler etkileşimlere izin veren yan gruplar veya başka fonksiyonel gruplar içerir.

Birçok lipid, yüklü bir uca sahip olmak gibi önemli bir özelliğe sahiptir. Bu uç suya çekilme eğilimindedir ve yük lipidin suda çözünmesine yardımcı olur. Biz buna, Yunanca *hydro* (su) ve *philos* (sevmek; suyu sever) kelimelerinden gelen **hidrofilik** uç adını veriyoruz. Polar



Şekil 3.9 Bazı lipidlerin moleküler yapısı. Serbest yağ asitleri enerji depolama molekülleri olarak bulunur. Trigliseritler bitkisel ve hayvansal yağlarda bulunur. Fosfolipitler, mikroplarda ve diğer organizmalarda hücre zarı oluşumunda rol oynarlar. Kolesterol, hayvansal hücre zarlarının yapısal bir bileşenidir (Kaynak: Charles Cockell).

olmayan diğer uç, yüklü olmadığından dolayı suda kolayca çözünmez. **Hidrofobik uç** olarak adlandırılır çünkü sudan hoşlanmaz (Yunanca *phobos* veya korku). Yüksüz ve yüklü bir uca sahip olma özelliği, bu moleküllerin aynı zamanda **amfifilik** olarak da adlandırıldığı anlamına gelir. Fosfolipidler, bir ucunda hidrofilik fosfat içeren önemli bir lipid sınıfıdır. Hücre zarının yapısına katılırlar. Şeker ve proteinler gibi, lipidler de yaşamda karmaşık ve çeşitli fonksiyonel rollere izin verecek şekilde çok çeşitlidir. Bazıları hayvan hücre zarlarının bir bileşeni olan, zar akışkanlığının ve bütünlüğünün korunmasında görevli kolesterol (Şekil 3.9) gibi halka yapıları içerir. Hayvan hücrelerinin şekil değiştirme ve hareket kabiliyetine katkıda bulunurlar.

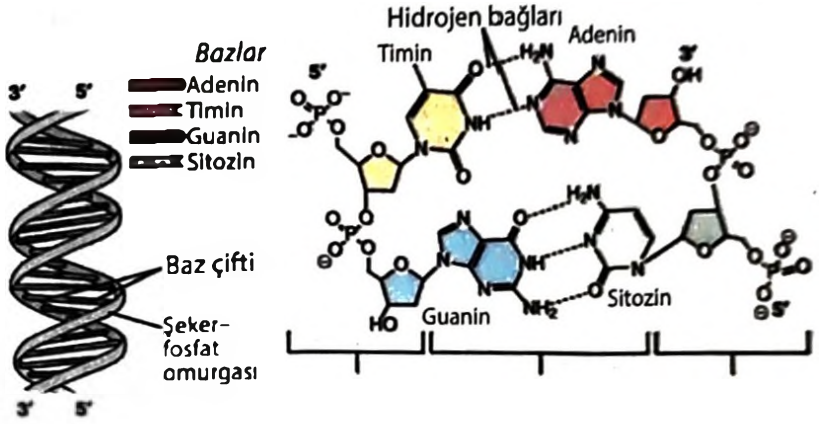
3.9 Nükleik Asitler

Son olarak canlılar için oldukça önemli olan yaşamın bilgi depolama molekülleri, nükleik asitlere geliyoruz.

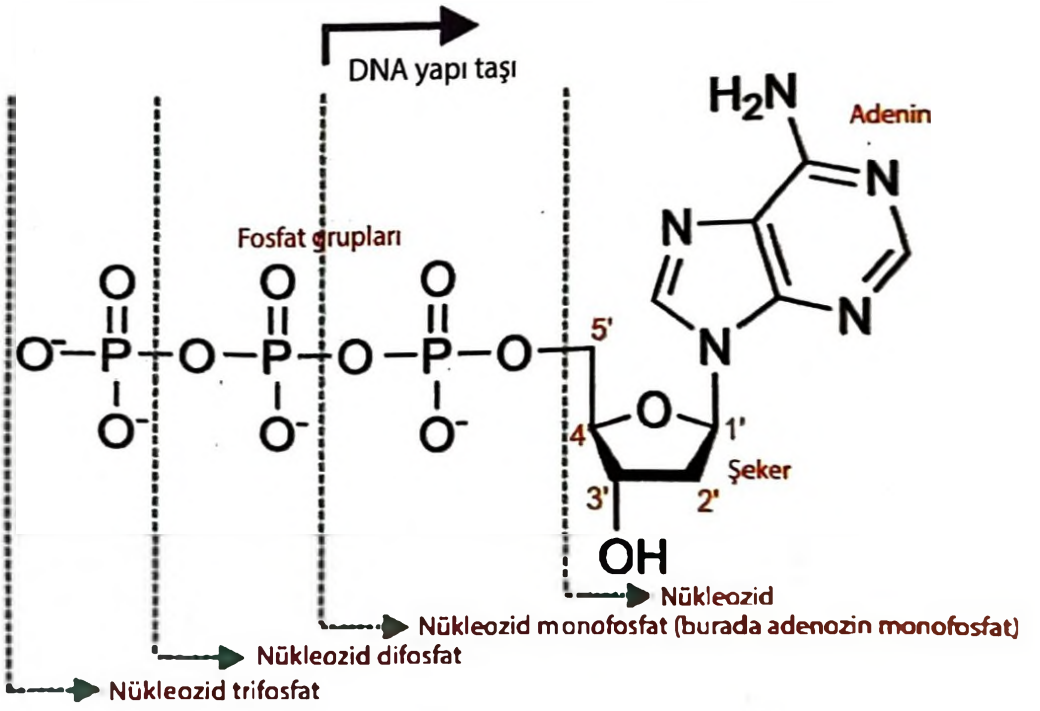
Öncelikle, bunların en bilineni olan DNA veya deoksiribonükleik asidi düşünün. Bu molekül karmaşık bir yapıdır, ancak sarmallar birbirinden ayrıldığı zaman oldukça basittir. Molekülün üç boyutlu yapısını bir çift sarmal oluşturur, ancak bu sarmalı birbirinden ayırarak masaya yatıralım ve daha yakından bakalım. İlk olarak elimizde molekülün uzunluğunu azaltan iki omurga var. Bu yapı, molekülün uzunluğu boyunca tekrar tekrar yinelenen bir fosfat grubuna bağlı bir pentoz (riboz) şekerinden oluşan şeker–fosfat omurgasıdır. Bunu iskele olarak düşünebilirsiniz. DNA molekülünü bir arada tutmak ve DNA ile diğer moleküller arasındaki etkileşimlere aracılık etmek için önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, bu molekülün asıl can alıcı noktası içindekilerdir. Fosfat ve pentoz şekeri, bir glikozidik bağ aracılığıyla bir baza (veya nükleobaza) bağlanır.

DNA'da dört adet baz bulunur –timin (T), adenin (A), guanin (G) ve sitozin (C) (Şekil 3.10a). Bu bazları DNA'nın 'harfleri' olarak adlandıralım. Bu harfler genetik kodu meydana getirir ve bu harfleri uzun diziler oluşturmak üzere tekrarlayan şeker–fosfat omurgasına istediğimiz şekilde ekleyebiliriz. Daha sonra açıkça görüleceği gibi, tüm biyolojik fonksiyonların talimatlarını kodlayan bu harf dizisidir. Timin ve sitozin ayrıca, tek bir aromatik halkaya sahip bir molekül sınıfı olan (Şekil 3.10a) pirimidinler olarak da adlandırılırken; adenin ve guanin, hem bir pirimidin halkasına hem de bir imidazol halkasına (veya farklı elementler, bu örnekte C ve N, içeren bir yapı olduğundan heterosiklik halka; Şekil 3.10a) sahip olan pürinler olarak adlandırılır.

Baz ve baza bağlı fosfat gruplarının oluşturduğu yapılar *nükleozidler* olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.10b). Nükleotid terimi, genellikle bir şeker ve en az bir fosfat grubuna bağlanan bazı tanımlamak için kullanılan genel bir terimdir. Adenin örneğinde, bir riboz şekere ve bir fosfat grubuna bağlı bu baz, AMP veya adenozin monofosfat (Şekil 3.10) olarak adlandırılır. Bu molekül, DNA'nın bir yapı taşı (baz ve omurganın bir birimini içerir) ve bir nükleotiddir.



(a)



(b)

Şekil 3.10 (a) Çift sarmal yapıyı ve molekülün merkezi boyunca bazlar arasındaki eşleşmeyi gösteren DNA'nın yapısı (Kaynak: OpenStax College). *(b) DNA'nın baz çifti bileşenleri (adenin için gösterilmiştir) ve bu bileşenlerin bölümlerine verilen isimler. Nükleobaz (burada adenin), riboz şekeri ve bir fosfat, DNA'nın temel bir yapı taşını (AMP veya adenozin monofosfat) oluşturur. Riboz şekeri üzerindeki numaralandırma kuralının ayrıca DNA'daki 3' ve 5' uçlarıya ifade edilen yönlülüğü açıkladığı da gösterilmiştir* (Kaynak: Charles Cockell).

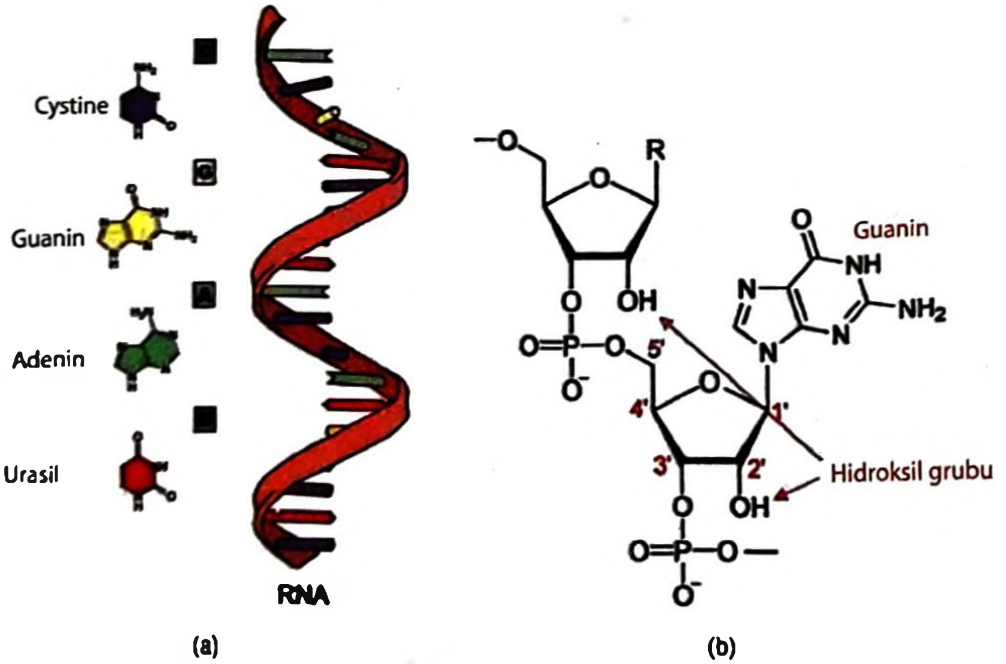
DNA molekülünün iki omurgası vardır. Bu nasıl ortaya çıktı? Molekülün merkezi boyunca her bir baz, çok özgül bir bağlanma düzeninde başka bir baza hidrojen bağıyla bağlanır. A, bir T'ye; G ise bir C'ye bağlanır ve bunun tam tersi de geçerlidir. Sonunda, iki baz arasındaki hidrojen bağlarıyla merkezlerinden birbirine bağlı iki iplik elde ederiz. Bu yapının neden önemli olduğunu muh-

temelen anlayabilirsiniz. 1953'te Francis Crick (1916–2004) ve James Watson bu yapıyı ilk kez keşfettiklerinde ve yayınladıklarında bunun önemi kesinlikle ortaya çıktı. Molekülü hidrojen bağları boyunca açarsak her bir iplik tamamlayıcı iplikle yeniden birleştirilmek üzere kullanılabilir çünkü zaten bildiğimiz gibi, her bir baz özel olarak sadece başka bir baza bağlanabilir. Bu şekilde, DNA kopyalanabilir. İki ayrı iplik, iki ayrı çift sarmalın yeniden oluşturulması için kullanılabilir.

DNA ipliğinin bir doğrultuya sahip olduğunu bilmek de önemlidir. Bu doğrultu 3′ (3 üssü olarak okunur) uçtan 5′ uca doğrudur. Bu sayılar DNA omurgasındaki riboz şekeri üzerindeki numaralandırma düzeniyle tanımlanır. 3′ karbon hidroksil grubuna, 5′ karbon ise ona bağlı fosfat grubuna sahiptir. Bu numaralandırma düzenini Şekil 3.10b'de ve ipliklerin bu düzene göre isimlendirilmesini Şekil 3.10a'da görebilirsiniz.

3.9.1 Ribonükleik Asit

Tek nükleik asit DNA değil. Bir başka önemli tür **ribonükleik asit** (RNA). DNA ile aynı temel yapıyı paylaşır, ancak birkaç kritik farkı vardır (Şekil 3.11). İlk olarak, riboz şekeri DNA'daki (deoksiriboz) şekerden farklı olarak, 2′ pozisyonundaki hidroksil (–OH) grubunda bir oksijen atomuna sahiptir. Bundan dolayı DNA'nın –deoksiribonükleik asitin– aksine, ribonükleik asit olarak adlandırılır. İkincisi RNA molekülü, timin yerine bir urasil (U) bazına sahiptir.



Şekil 3.11 (a) RNA'nın tek ipliğinin şematik yapısı ve bazları. (b) RNA molekülünün moleküler yapısı. DNA ile arasındaki temel fark, deoksiribonükleik asit ile (DNA) kıyaslandığında şeker-fosfat omurgasında riboz şekerinin 2′ pozisyonunda –OH grubunun (ekstra bir oksijen atomu) bulunmasıdır. Dolayısıyla ribonükleik asit olarak adlandırılır.

RNA, hücrenin bilgilerinin okunma mekanizmasının önemli bir parçasıdır ve bu konuya genetik kodun nasıl çalıştığını incelediğimiz bir sonraki bölümde geri döneceğiz. RNA ayrıca çeşitli virüslerde de bulunur. RNA molekülü, farklı kimyası ve bazlarının oryantasyonu nedeniyle, genellikle DNA'dan daha reaktiftir. Bu özelliklerinden dolayı RNA'nın, yaşamın kökeniyle ilgili bazı teorilerde merkezi bir rol oynadığını ilerleyen bölümlerde göreceğiz.

Tartışma Noktası: Genetik kod ne kadar farklı olabilir?

Araştırmalar, 'doğal olmayan' baz çiftlerinin hücrelerin içine yerleştirilebileceğini göstermiştir. d5SICS ve dNaM, *Escherichia coli* mikroorganizmasının DNA'sına başarıyla katılan sentetik bir baz çiftidir. Bu araştırma genetik kodun, yeryüzündeki doğal genetik kodda bulunan dört baz çiftine sahip olması gerekip gerekmediği sorusunu gündeme getirmektedir. Bunlar tek bir evrimsel yolun şans eseri ortaya çıkan sonucu mu? Tamamen farklı bir baz takımına sahip olmamız mümkün mü? İkinci ve konuyla ilişkili bir diğer soru, baz çiftleri farklı olsa bile DNA'nın temel yapısının aynı olmasının gerekip gerekmediği. Alternatif bir bilgi depolama sisteminin, diğer molekülleri (proteinler gibi) oluşturmak için bilgiyi çoğaltmak ve kodlamak için kullanılması gerektiğini akılda tutarak, ne tür bir moleküler yapıya sahip olabileceğini tartışmak isteyebilirsiniz. Böyle bir bilgi depolama sisteminin sahip olması gereken genel özellikler neler? Böyle bir bilgi depolama sisteminin organik olması gerekiyor mu? Yaşamı inşa etmek için gereken bilgi miktarını depolamak için mineraller veya düzenli kristal yapılar kullanan böyle bir sistem hayal edebiliyor musunuz?

Malyshev, D.A., Dhami, K., Lavergne, T., Chen, T., Dai, N., Foster, J.M., Corrêa, I.R., Romesberg, F.E. (2014) A semi–synthetic organism with an expanded genetic alphabet. *Nature* **509**, 385–388.

3.10 Hayatın Çözücüsü

Şimdi yaşamı inşa etmek için gerekli olan bir başka temel ihtiyaca geliyoruz. Tartışılan moleküllerin tümü bir sıvı içerisinde toplanmalıdır. Yaşam, kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için bir çözücüye ihtiyaç duyar. Bir sistem tamamen kurutulduğunda kimyasal reaksiyonlar verimli bir şekilde gerçekleşemez, çünkü kimyasal reaksiyonlar için ihtiyaç duyduğumuz reaktifler kolayca hareket edemez ve etkileşemezler.

Bu çözücünün, biyolojik fonksiyonlar için gerekli olan moleküllerin hücrelerde yeterli konsantrasyonlarda tutulmasına ve kimyasal reaksiyonların oluşmasını sağlayacak kadar hızlı bir şekilde hareket etmelerine izin veren bir viskozite ve yoğunluk gibi birtakım özelliklere sahip olması gerekir.

3.10.1 En İyi Çözücü Olarak Su

Su veya H_2O, Dünyadaki yaşamın da doğrulayacağı gibi, bu ihtiyaçları karşılayan bir çözücüdür. Suyu yaşam için bilhassa uygun bir çözücü yapan özel-

liklerden biri olan **dipol momenti** veya **polaritesi** (geçirgenlik veya dielektrik sabiti olarak ölçülür) oldukça önemlidir.

Suyun dipol momenti ($6,2 \times 10^{-30}$ cm veya 1,85 Debye), molekülün hem tuzları hem de küçük organik molekülleri kolayca çözebileceği şekildedir (Şekil 3.12). Tuzlar, canlılarda enerji kaynağı olarak veya zarların (membranların) dengesini sağlamak gibi çeşitli fonksiyonlarda rol oynayan bir katyon (K^+, Na^+, Fe^{3+} gibi pozitif yüklü iyonlar) ve anyon (Cl^- gibi negatif yüklü iyonlar) kaynağı olarak önem taşır. Tuzların su içinde yüklü iyonlar halinde çözünmesi, yüklü reaktifler gerektiren kimyasal reaksiyonlar için suyun uygun bir ortam olarak işlev görme kabiliyetine katkıda bulunur. Suyun polaritesi ayrıca amino asitler gibi küçük organik bileşiklerin çözünmesine de olanak sağlar. Bu özellik suyun önceki bölümlerde ele alınan organik polimerizasyon reaksiyonlarının bir aracı olarak hareket etmesine izin verir.

Suyun polaritesi, su moleküllerinin hidrojen bağıyla birbirlerine bağlanmasını sağlar. Bu özellik suyun geniş sıcaklık aralığını, Dünyanın yüzeyindeki ve yeraltındaki çevresel koşullarla birlikte çakışan sıcaklıkları ve Jovian ayının iç kısmı, Europa veya Satürn'ün ayı Enceladus gibi gezegenimsilerdeki fiziksel koşulları açıklar. Bu özellikler olmadan suyun düşük moleküler ağırlığı, sıvı haldeyken çok daha küçük bir sıcaklık aralığına sahip olmasına neden olacaktır.

Suyun diğer özellikleri biyolojik bir çözücü olarak yararlı kullanımlarının çoğundan sorumludur. Su, yüksek bir buharlaşma ısısına sahiptir (bir başka deyişle, buharlaşmak için oldukça fazla enerji harcar), bu da organizmaların içinde sabit bir sıvı fazı teşvik eder ve sıcaklıkları dengeleyerek organizmaların değişken çevresel sıcaklıklarla başa çıkma kabiliyetini arttırır. Buna karşılık, yüksek bir buharlaşma ısısı, çok hücreli organizmalar tarafından ortamdaki yüksek sıcaklıklara karşı buharlaşma soğutması elde etmek için kullanılan, buharlaşma sırasında yüksek bir enerji kaybı anlamına gelir.



Şekil 3.12 Su, şekerler de dâhil olmak üzere çeşitli maddeleri çözer (Kaynak: Charles Cockell).

Belki de suyun biyolojik olarak yararlılığı konusunda en çok tartışılan özelliklerinden biri, önceki bölümde tartıştığımız gibi buzun yoğunluğunun sudan daha düşük olmasıdır. Buzun su üzerinde yüzebilme özelliği, buz tabakasının altında sıvı suda kalabilen organizmalar için bir koruma sağlar. Şüphesiz, bu özelliğin balıklar ve diğer birçok su organizması için faydalı ol-

duğunu söyleyebiliriz. Bununla birlikte, birçok mikroorganizma donmaya karşı dirençli olabilir. Ağaç kurbağası (*Lithobates sylvatica*; Şekil 3.13), toprak veya ölü yaprakların yüzeyinde kış uykusuna yatan diğer Kuzey Amerika kurbağalarına benzer şekilde donma sıcaklıklarını tolere edebilir. Kurbağa, kanındaki glikojeni kış mevsiminin başında vücut içinde buz oluşumuna cevaben şekere, glukoza, dönüştürür. Bu moleküller, hasar veren buz kristali oluşumuna karşı koruyucu görevi görür. Vücutlarındaki toplam suyun %65'inden fazlası donmazsa, kurbağalar kış aylarında donmaktan kurtulabilirler. Her ne kadar ağaç kurbağası olağandışı bir örnek olsa da donmaya karşı direnç göstermek için evrimsel stratejilerin var olduğu açıktır. Buzun su üzerinde yüzmesini sağlayan fiziksel özelliği yaşamın lehine olmasına rağmen, yaşam için bu başlı başına bir gereklilik olmayabilir. Ancak bu özelliğin başka önemli etkileri de vardır. Bir su kütlesinin yüzeyinde oluşan buz, altındaki enerjiyi tutmaya ve dolayısıyla uzun süre boyunca sıvı halde kalmaya meyillidir. Eğer buz suda batsaydı göller, nehirler ve diğer su kütleleri tamamen aşağıdan yukarıya doğru donma eğiliminde olurlardı. Bu yüzden fiziksel bir bakış açısına göre, bu özellik gezegenlerin yaşanabilirliğinin özelliklerini anlamak açısından önemlidir.



***Şekil 3.13** Tahta kurbağası, dokularında donmayı önleyen bir koruyucu madde olarak glukozu kullanır ve donma sıcaklıklarını tolere edebilir* (Kaynak: wikicommons, Brian Gratwicke).

Suyun yaşam için çok elverişli olmayan bazı özelliklere sahip olduğunu da belirtmekte fayda var. Bazı durumlarda, birçok molekülün ayrışmasına neden olan reaktif bir çözücü olabilir; örneğin proteinlerde hidrojen bağlarına zarar verebilir, bu da bazen protein katlanmasını işlevsiz hale getirir. Ayrıca daha önce gördüğümüz gibi, proteinler gibi bazı biyolojik moleküllerin oluşumu, suyun bir bağdan uzaklaştırılarak yok edildiği yoğuşma reaksiyonlarını içerir. Bu yüzden suyu mükemmel bir çözücü olarak görmemeye özen göstermeliyiz. Yaşam bazı durumlarda ödün vererek orta yolu bulmak zorunda. Bununla birlikte, tüm olasılıklar ve bazı durumlarda bazı zararlı özelliklerine rağmen su, çok çeşitli kimyasal reaksiyonlar gerçekleştirmek için en iyi çözücü olabilir.

3.11 Alternatif Kimyalar

Dünyada yaşamı inşa etmek için ihtiyaç duyulan temel gereksinimlere baktık, peki ya diğer olası kimyalar? Alternatif kimyaların yaşam tarafından kullanılabileceğini veya bazı uzak gezegenlerdeki diğer yaşam formlarının bu kimyaları

kullandığını öne süren gözleme dayalı bir kanıtımız yok, ancak önceki tartışmaları bağlama koymak için hangi olasılıkların söz konusu olduğunu incelemek faydalı olacaktır.

Kitap ilerledikçe, kendi kendinize yaşam için karbonun ideal bir omurga elemanı ve suyun ideal bir çözücü olarak düşünülmesinin mantıklı olarak kabul edilen bilimsel bir sonuç mu yoksa sadece Dünya merkezli bir önyargı mı olduğunu düşünebilirsiniz.

3.11.1 Alternatif Temel Elementler

Alternatif temel elementlerden ne haber? Popüler önerilerden biri silisyum. Periyodik Tabloda karbonun altında bulunan grup 14'ün p–blok elementi olarak karbonla birçok ortak kimyasal özelliği paylaşır.

Silisyum, üç özelliğinden dolayı karbondan daha reaktif olabilir. İlk olarak, karbon gibi silisyum da genellikle dört bağ oluşturur; ancak karbonun aksine, ilave elektronları kabul edebilir ve beş veya altı bağ oluşturabilir (karbondan daha fazla sayıda komşuya sahip olabilir). Bu da bazı reaksiyonların daha düşük enerjilerde gerçekleşmesine izin verir. İkincisi, silisyumun diğer elementlerle kurduğu bağlar karbon bağlarından daha zayıftır ve bu bağları kırmak için daha az enerji gerekir. Si–Si bağ kuvveti (222 kJ mol^{-1}), C–C bağ kuvvetinden (347 kJ mol^{-1}) daha düşüktür. Örneğin, silan (SiH_4) 0 °C'de bile havada kendiliğinden yanar; oysa karbon analoğu metan (CH_4) saf oksijende bile, kendisine enerji verilmedikçe, tamamen sabit kalır. Son olarak, silisyum karbondan daha elektropozitiftir (elektron vermek için daha büyük bir eğilim gösterir) ve kimyasal reaksiyonlara karşı çok daha hassas olan diğer ametallerle güçlü polarize bağlar kurar. Her ne kadar silisyumun daha reaktif olan doğası (en azından oksijen yokluğunda) ilk başta herhangi potansiyel biyokimyada bir dezavantaj gibi görünse de bu yüksek reaktivite düşük sıcaklıklarda biyokimyasal reaksiyonlara daha elverişli olabilir.

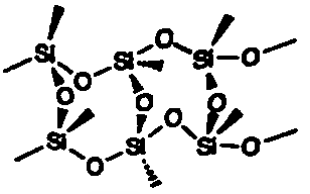
Silisyum bazı etkileyici özelliklere sahiptir. N, C ve O bağlarıyla kararlı tetra–, penta– ve hekza– yapıda bileşikler oluşturur ve karbon biyokimyasında moleküler çeşitlilik oluşumuyla ilişkili N, P, S ve diğer birçok elementle kararlı kovalent bağlar oluşturabilir. Her ne kadar silisyum, benzen gibi kendi başına altı halkalı bir yapıyı kolayca oluşturamasa da oksijen atomlarının silisyum atomlarını bir arada tuttuğu altı halkalı bir yapı (siloksan) oluşturabilir. Silseskioksan gibi kafes benzeri moleküler sistemler, kimyasal katalizde endüstriyel olarak kullanılan hatırı sayılır bir molekül çeşitliliği (Şekil 3.14) ve ışık yayan diyotlar (LED'ler) elde etmek için çok çeşitli yan gruplarla reaksiyona girebilir.

Karbon ve silisyum arasında benzerlikler olsa da, bileşik oluşumunu etkileyen bazı önemli farklılıklara sahiptirler. Silisyumun, karbonunkiyle (154 pm) karşılaştırıldığında daha büyük olan yarıçapı (233 pm), zayıf bağlanma kuvvetlerinden sorumludur. Bu da oluşturabildiği çeşitli kompleks bileşiklere

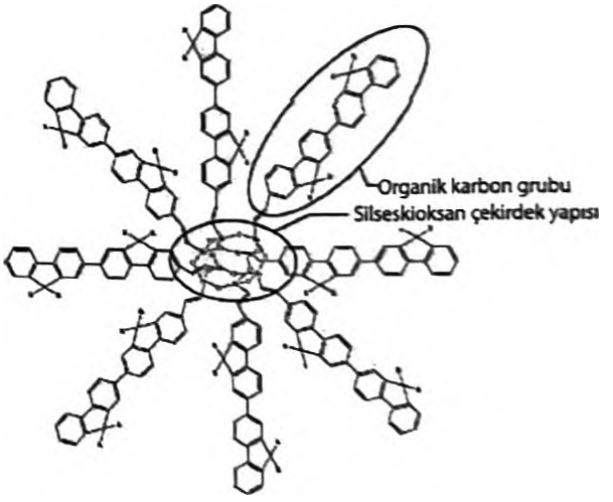
rağmen, genellikle kararlı kompleks bileşikleri daha zor oluşturduğu (Şekil 3.14) anlamına gelir. Özellikle silisyum bileşiklerinin bağ açıları, genellikle büyük boyutları nedeniyle daha geniştir. Yani silisyum karbon biyokimyasında bulunan halkasal yapıdaki bileşiklere benzeyen, çok kararlı moleküller oluşturamaz. Kararlı aromatik (halkasal) bileşikler, karbon biyokimyasında baştan sona bulunur ve oluşturulacak bileşiklerin karmaşıklığına ve bağlanma etkileşimlerine büyük birçok yönlülük kazandırır; örneğin, DNA'daki baz çiftleri. Birkaç silisyum bileşiği, karbon bileşiklerinde yaygın olarak bulunan ve lipidler gibi birçok önemli bileşiğin oluşmasını sağlayan ikili ve üçlü bağlar içerir.



Silseskioksan kafes yapısı



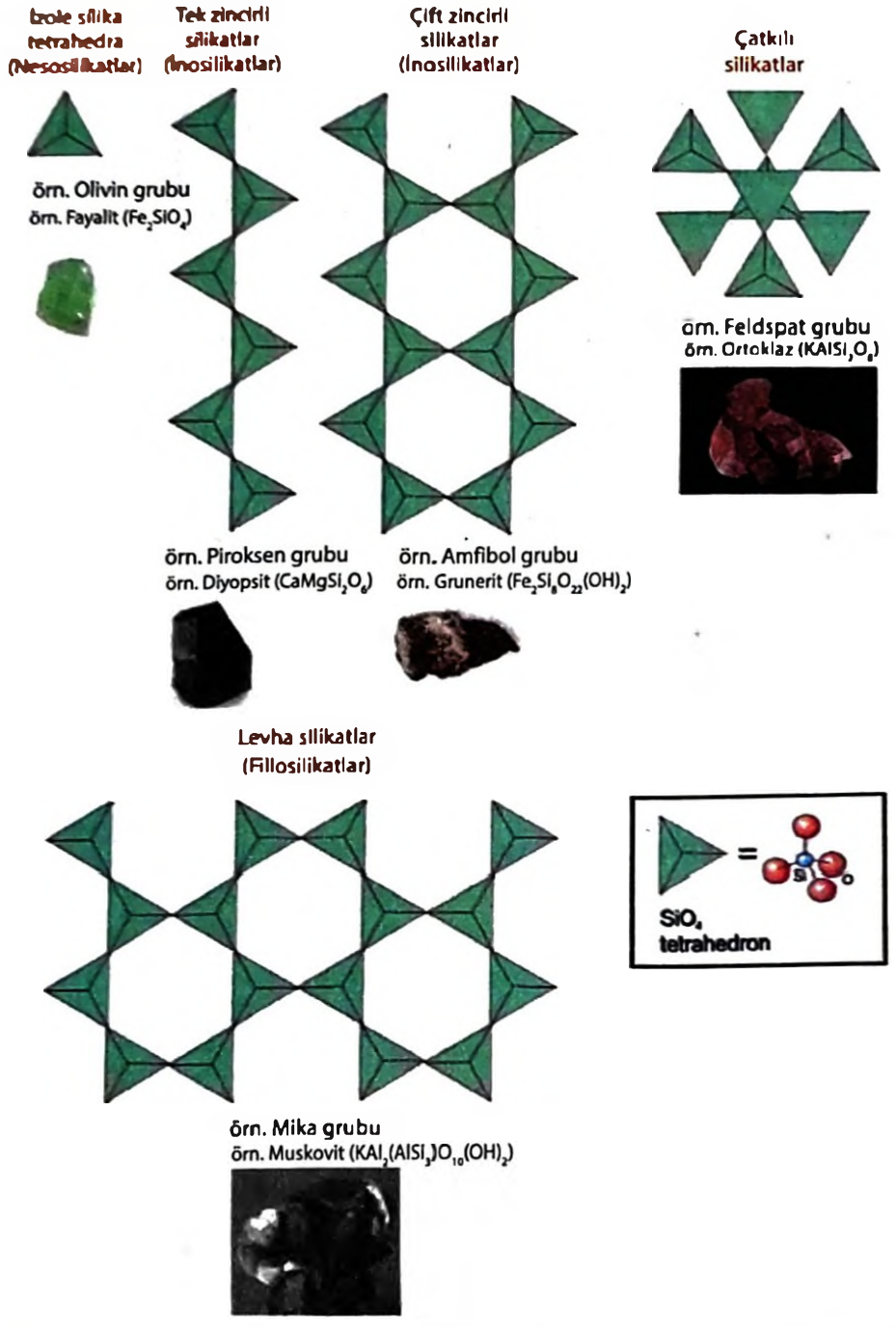
Polifenilsilseskioksan merdiven tekrarlı birim



Organik yan gruplara bağlı silseskioksan yapısı

Şekil 3.14 Silisyum, bu silseskioksan yapıları gibi olağanüstü karmaşık yapılar oluşturabilir (Kaynak: Charles Cockell).

Belki de silisyumun en önemli sınırlamalarından biri, oksijenle etkisiz yapılar oluşturma eğilimidir. Kuvars ve çok çeşitli mineralleri oluşturan ve çoğunlukla tepkimeye girmeyen bir bileşik olan silika, tamamen oksitlenmiş silisyumdur. Buna karşılık karbon oksijenle ikili bağ yaparak, yaşam için kolay erişilebilir bir karbon formu olmasının yanı sıra biyolojik metan üretimi (**metanogenez**) gibi enerji açığa çıkaran çeşitli biyokimyasal reaksiyonlarda kullanımı kolay bir gaz olan karbondioksiti üretir. Gerçekten de standart sıcaklık ve basınç altındaki çoğu ortamda silisyum, Dünya üzerinde farklı kaya türlerinde çok çeşitli çeşitlerde bulunan reaktif olmayan silikatları oluşturur (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 *Silisyum oksijene bağlandığında oluşan biyolojik olarak etkisiz çeşitli silikat yapılar. Bunlar genellikle kayalar ve mineraller olarak adlandırdığımız şeyi oluşturan yapılardır. Bu bileşiklerin temel yapıtaşı, silika tetrahedron (SiO_4)'dur* (Kaynak: Charles Cockell).

Silikatların tümü, temel yapıtaşı olarak silika tetrahedrondan oluşturulur. Kendi başlarına ve demir veya magnezyum gibi katyonlarla bir araya getirildiklerinde **olivin** sınıfı mineraller gibi mineralleri oluştururlar. Uzun bir zincire bağlandıklarında **piroksen** sınıfını oluştururlar. Bu zincirlerin kendileri çift zincirli silikatlar oluşturmak için birbirlerine bağlandıklarında **amfibol** mineral sınıfını oluştururlar. Zincirler geniş bir katmana dâhil edildiğinde tabaka

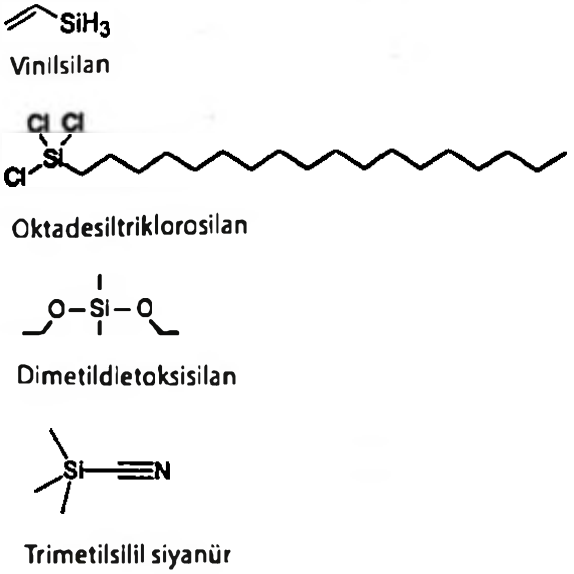
silikatları oluştururlar. Bu sınıf, Mars yüzeyinde ve volkanik kaya silikatlarının suyla reaksiyona girdiği birçok ortamda yaygın olarak bulunan bir kil sınıfı olan **fillosilikatları** da içerir. Üç boyutlu mineral yapılar **feldpsatlar** gibi çatılı silikatları oluşturur. Bunların örneklerini Şekil 3.15'te görebilirsiniz. Bölüm 13'te bu minerallere geri döneceğiz. Şimdilik bu konuyu, evrende yaygın olan oksijen varlığının silisyum kimyasını silikatlara doğru yöneltme eğiliminde olduğunu ve bir biyokimyagerin ilgisini çekebilecek çeşitli silisyum bileşiklerini oluşturma eğiliminden uzak olduğunu söyleyerek özetlemek yeterlidir.

Silisyum içeren daha olası bir kimya, karbonlu hibrit bir sistemdir. Karbon kimyasındaki alkanlara benzeyen silanlar (Şekil 3.16), karmaşık silisyum ve hidrojen düzenlemelerinden oluşan moleküllerdir. Dallanmış molekül zincirleri oluşturma yeteneğine sahiptirler. Silisyum–hidrojen bağı zayıf olduğundan dolayı, silanlardaki hidrojen atomu organik gruplarla değiştirilerek daha kararlı bir yapı elde edilir. Bu organosilisyum bileşikleri termal olarak kararlıdır ve kimyasal olarak etkisizdir. Bu bileşiklerin üretilmesi için laboratuvar deneyleri yapılabilse de nadiren Dünya üzerinde doğal olarak bulunurlar. Bununla birlikte, eğer yaşam silanlar üzerine kurulacaksa, kimyasal reaksiyonların muhtemelen düşük sıcaklıklarda veya oksijenle reaksiyona girmeleri sonucu etkisiz silisyum maddelerinin üretilmesine engel olmak için oksijen ve su içermeyen bir ortamda gerçekleşmesi gerekecektir.

Diğer spekülasyonlarda, kayaların erimesi sonucu reaktivitenin artmasıyla yüksek sıcaklıklarda silikat temelli yaşam formlarının olduğu düşünülmüş. Bazı insanlar, erimiş kayalarda yaşayan organizmalar olan 'lavoblar' ve '*magmobeler*' olasılığı üzerine tartışmışlar. Genetik bilgi, mineraller içindeki yapısal kusurlar dâhil inde şifrelenir. Bu fikirler her ne kadar ilgi çekici olsa da Dünyanın tarihi boyunca bol miktarda erimiş kaya içeren ortam olmasına rağmen, yeryüzü kayaç kayıtlarında bu konuyla alakalı hiçbir kanıt yoktur.

Periyodik Tabloyu incelediğimizde, çeşitli moleküller için mantıklı alternatif temel yapı elementi olarak sillisyum gibi pek fazla uygun element öneremekteyiz.

Periyodik Tablonun 14. grubunda, silisyum ve karbondan sonraki element olan germanyuma bakabiliriz. Tetrahedral GeO_4 düzenlemeleri oluşturan ve silikatlarla birçok benzerliği bulunan germanatlar adı verilen üç boyutlu bir molekül



Şekil 3.16 Silanlar organik gruplara sahip hibrit molekülleri içerir (Kaynak: Charles Cockell).

takımı oluşturabilir. Elementin kütle numarası 72'dir ve evrendeki daha az kütle numarasına sahip elementlere kıyasla oldukça nadir görülür (yeryüzünde miktarı yaklaşık 1 ppm'dir). Silisyum gibi germanyum da karbondaki moleküler çeşitlilik kapasitesinden yoksundur.

Halojenler (klor ve flor) reaktif değildir. Magnezyum, demir, nikel, potasyum, sodyum, kalsiyum vb metaller güçlü kovalent bağlar oluşturmazlar; bunun yerine, güçlü olmasına rağmen kovalent bağlarla mümkün olan çeşitli zincirlerle ilişkili zengin bir kompleks bileşik çeşitliliği üretmeyen iyonik bağlar oluştururlar (Bölüm 2). Oksijen ve bor da birçok gezegen ortamı için mantıksız adaylardır çünkü kovalent bağlar oluştursalar ve karbon kimyasında yer alsalar da kendi başlarına zincirler ve diğer karmaşık moleküler düzenlemeler oluşturmazlar.

3.11.2 Alternatif Çözücüler

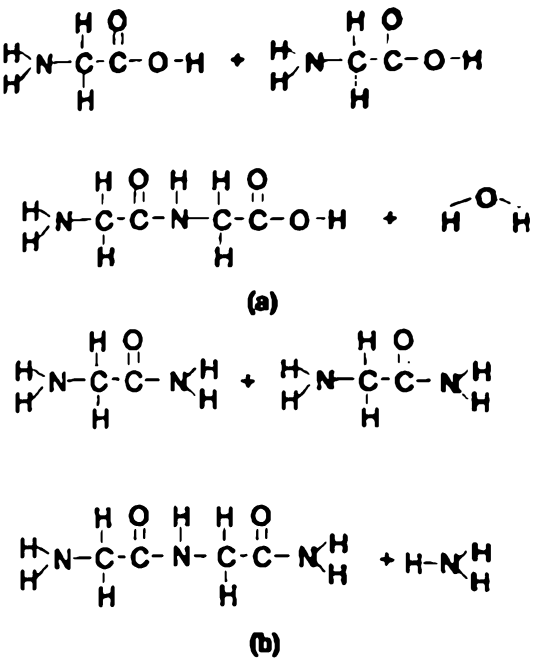
Astrobiyoloji topluluğu tarafından sıvı su yerine geçebilecek alternatif çözücüler uzun bir süredir tartışılmaktadır. Su evrende en bol miktarda bulunan çözücü olmasına rağmen, diğer çözücüler farklı fiziksel ve kimyasal koşullara sahip gezegen ortamları için makul olabilir. Ne yazık ki, bu alternatiflerin pek azı deneysel olarak derinlemesine araştırılmıştır. Bu olası çözücüleri kullanan bir yaşam formu tespit edilmeden, ikna edici biyolojik deneyler ortaya koymak zor. Ek olarak, yaşamın kökeninin nasıl oluştuğu hakkındaki bilgilerimiz, alternatif çözücüleri laboratuvar ortamında yaşamın kökenine yönelik olası çözücüler olarak test edebilmek için yeterli değil. Bununla birlikte, alternatif çözücülerin bazı fiziksel özellikleri onları aday yapabilir.

Birçok enzimin, benzen gibi polar olmayan çözücülerde aktif olabileceği ve insan DNA'sının yaklaşık %20'sinin, işlevlerini yerine getirebilmeleri için hücre zarının içinde polar olmayan ortamların olmasını gerektiren zar proteinlerini kodladığı gösterilmiştir. Bu gözlemler, eksiksiz bir biyokimya için susuz çözücülerin potansiyel olarak başarılı bir ortam olma olasılığına dair doğrudan bir kanıt sunmasa da yeryüzündeki bazı biyokimyasal reaksiyonların bile susuz çözücüler içinde gerçekleşebilmesi ve zar proteinleri örneğinde olduğu gibi aslında böyle ortamlara ihtiyaç olduğunu göstermiştir.

Amonyak, en çok tartışılan alternatiflerden biri olmuştur. Konuyla ilgili ilk tartışmalar, amino asitlerdeki –COOH grubunun yerine $-CONH_2$ grubunun aracılık ettiği olası peptid bağlarına odaklandı. Şekil 3.17'de, yeryüzündeki peptid bağı oluşum reaksiyonu (Şekil 3.17a) ve buna karşılık sıvı amonyak biyokimyası için hipotezlenmiş olan reaksiyon (Şekil 3.17b) gösterilmektedir.

Amonyağın fiziksel özelliklerinin suyunkilerle karşılaştırılması, olası üstünlükleri ve dezavantajları hakkında fikir vermektedir. Amonyak sudan daha az viskozdur [oda sıcaklığında su için 1 santipuaz (cP)'ı amonyak için 0,265 cP'yle karşılaştırın] ve böylece moleküller daha hızlı yayılır. Bununla birlikte, amonyak sudan (2257 kJ kg^{-1}) daha düşük bir kaynama ısısına (1369 kJ kg^{-1})

sahiptir ve bu nedenle sıcaklık dalgalanmalarını daha az uyum sağlayabilir. Suyla arasındaki en büyük fark, amonyağın düşük sıcaklıklarda sıvı halde olması ve atmosfer basıncında (–78 ila –34 °C) daha düşük bir sıvı sıcaklık aralığına sahip olmasıdır. Soğuk bir gezegen ortamı için, düşük sıcaklıktaki sıvı hal avantajlı olabilir. Basınç arttırılarak, yaklaşık 20 atm, sıvı aralığı genişletilebilir böylece kaynama noktası yaklaşık 50 °C'ye çıkartılır.



Şekil 3.17 Yeryüzündeki proteinlerde peptid benzeri bir bağ oluşumunu (a) amonyak içeren varsayımsal bağla (b) karşılaştıran bir şema.

Amonyak, canlılık için özellikle amonyak çözeltilerinin oluştuğu son derece yüksek pH değerleri gibi başka zorluklar sunar. %1 veya daha yüksek konsantrasyondaki amonyak çözeltileri, 11,0'dan daha büyük pH değerlerine sahiptir ve yüksek pH'a adaptasyonları olan organizmalar bilinmesine rağmen, biyokimyasallar için bu koşullara adaptasyon gerekecektir.

Hidroflorik asit, başka bir alternatif çözücü olarak tartışılmıştır. Sıvı olarak kaldığı geniş sıcaklık aralığı, olası moleküler yapılarda oksijeni değiştiren florla aday olmasını sağlar. Bununla birlikte, florun düşük kozmik bolluğu ve organik karbon molekülleriyle yüksek reaktivitesi kullanımını sınırlandırmaktadır. Bunların dışında birçok başka olası çözücü de tartışılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Yaşam için olası çözücüler, sıcaklık aralıkları, buharlaşma ısısı, viskozite ve dipol momentleri.

Çözücü	Moleküler ağırlık	Sıvı aralığı (atmosferik basınçtaki K)	Buharlaşma ısısı (kJ mol^{-1})	Viskozite (cP)	Dipol moment (Debye)
H_2O	18	273,1-373,1	2257	1,00	1,85
NH3	17	195,4-239,8	1369	0,265	1,47
HF	20	190,0-292,7	374.1	0,256	1,91
H_2SO_4	98	283,5-611,1	56,0	48,4	2,72
CH_4	16	90,7-111,7	480,6	0,184	None

3.12 Yaşamın Yapısı ve Yaşanabilirlik

Astrobiyologlar, bu kitap boyunca ortaya çıkacak olan bir tema olan diğer gezegenlerde yaşanabilir koşullar aramakla ilgileniyorlar. Yaşanabilirlik basitçe bilinen en az bir organizmanın aktivitesine uygun koşullar olarak açıklanabilir, burada aktivite bir organizmanın varlığını sürdürme, büyüme ve çoğalma yeteneğidir. Bu tanım muhakkak yaşam hakkında bildiklerimizle sınırlandırılmıştır. Başka gezegenimsileri Dünyadaki yaşam hakkında bildiklerimize göre değerlendirmek zorunda olduğumuz için başka seçeneğimiz yok. Bu durum, bu bölümdeki tartışmaların neden bu kadar önemli olduğunu açıklamaktadır, çünkü yaşamın gerektirdiği asgari koşullar, nihayetinde yaşanabilir koşullar olarak tanımladığımız ve diğer Dünyaların yaşanabilirliği konusunda yaptığımız değerlendirmeyi belirleyecektir. Yaşama ulaşmak için gereken kimyasal bileşiklerin makul çeşitliliğinin ne olduğunu düşündüğümüz konusunda net olmalıyız.

Şimdiye kadar, bu bölümdeki tartışmalar bir ortamın yaşanabilir olması için en az iki gereksinimi listelememize izin veriyor. Şunlara ihtiyacımız var: (i) yaşam için gerekli olan temel elementleri sağlayan bir ortam (CHNOPS) ve (ii) fiziksel ve kimyasal koşulların, şu anda sıvı su olduğunu varsaydığımız uygun bir çözücünün varlığını destekleyeceği bir ortam. Bölüm 5'te bir enerji kaynağına da ihtiyacımız olduğunu göreceğiz. Bölüm 7'de yaşanabilir koşulların sınırlarını da tanımlayan Dünya üzerindeki yaşam için fiziksel ve kimyasal sınırları daha ayrıntılı olarak tartışacağız.

3.13 Sonuç

Periyodik Tablodaki çok çeşitli elementlere rağmen, tüm yaşam tarafından kullanılan seçim çok azdır. Organizmalar tarafından altı tane element (CHNOPS) yaşamın ana moleküllerini oluşturmak için daha özelleşmiş kullanım alanları olan diğer elementlerle birlikte kullanılır. Karşılaştırılabilir bağlanma kuvvetine sahip elementlerle çok çeşitli kovalent bağlar oluşturma yeteneğiyle ortaya çıkan karbonun çok yönlülüğü, oluşturabileceği milyonlarca bileşiği ve yaşamın gerektirdiği moleküler karmaşıklığı üretme kapasitesini açıklar. Her ne kadar karbon moleküllerinin çeşitliliği yaşamda çok büyük olsa da proteinler, karbonhidratlar, nükleik asitler ve lipidler dâhil olmak üzere bazı büyük gruplarda geniş ölçüde bulunuyorlar. Proteinler ve şekerler kiral özellikler gösterir. Uzun zamandır alternatif kimyalar hakkında birçok spekülasyon var: karbona en çok tercih edilen alternatif olarak silisyum, Dünyanın biyokimyasında çözücü olan suya olası bir alternatif olarak ise amonyak. Her ne kadar bu farklı kimyalara dayanarak yaşamı dışlamamamız gerekse de karbon ve su bazlı bir yaşamın canlılar için gereken kimyasal çeşitlilik ve çevresel toleransların en yüksek olasılığını göstereceğinden şüphelenmek için iyi kimyasal nedenler olduğunu gördük. Sahip olduğumuz bu bilgi sayesinde, bu moleküllerin yaşam

sistemleri inşa etmek için nasıl bir araya geldiğini görebilecek durumdayız. Bu, bir sonraki bölümün odak noktası olacak.

İleri Okumalar

Kitaplar

Grinspoon, D. (2004) *Lonely Planets*. Harper Collins, New York.

Schulze–Makuch, D., Irwin, U. (2008) *Life in the Universe*, Springer, Heidelberg.

Ward, P. (2005) *Life As We Do Not Know It*. Penguin, New York.

Yayınlar

Bains, W. (2004) Many chemistries could be used to build living things. *Astrobiology* 4, 137–167.

Benner, S.A., Ricardo, A., Carrigan, M.A. (2004) Is there a common chemical model for life in the Universe? *Current Opinions in Chemical Biology* 8, 672–689.

Conrad, P.G., Nealson, K.H. (2001) A non–Earth–centric approach to life detection. *Astrobiology* 1, 15–24.

Firsoff, V.A. (1965) Possible alternative chemistries of life. *Spaceflight* 7, 132–136.

Kamerlin, S.C., Sharma. P.K., Prasad, R.B., Warshel, A. (2013) Why nature really chose phosphate. *Quarterly Reviews in Biophysics* 46, 1–132.

McKay, C.P., Smith, H.D. (2005) Possibilities for methanogenic life in liquid methane on the surface of Titan. *Icarus* 178, 274–276.

Mottl, M., Glazer, B., Kaiser, R., Meech, K. (2007) Water and astrobiology. *Chemie der Erde* 67, 253–282.

Pace, N.R. (2001) The universal nature of biochemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98, 805–808.

Watson, J.D., Crick, F.H.C. (1953) A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature* 171, 737–738.

Westheimer, F.H. (1987) Why nature chose phosphates. *Science* 235, 1173–1178.

4

YAŞAMIN YAPISI: MOLEKÜLLERDEN HÜCRELER OLUŞTURMAK

Öğrenme Çıktıları

- Dünya üzerindeki canlıların sahip olduğu farklı hücre tiplerini anlamak.
- Yaşamdaki bölümlendirmenin önemini anlamak.
- Hücre zarlarının yapısını ve bu yapının farklı varyasyonlarını anlamak.
- Genetik transkripsiyon ve translasyon işlemlerini ve bu işlemlerde yer alan temel molekülleri anlamak.
- Genetik kodun proteinleri oluşturmak için nasıl kullanıldığını ve genetik kodun dejenere olmasının ne demek olduğunu anlamak.
- Virüs ve prionların özelliklerini tanımlamak.

4.1 Moleküllerden Hücrelere

Elementlerin atomlarda nasıl bir araya getirildiği, atomların molekülleri nasıl oluşturdukları ve sonrasında yaşamı meydana getirecek olan başlıca makromolekül sınıfları hakkında sağlam bir fikre sahibiz. Bu yolculuğun bir sonraki aşaması, bu makromoleküllerin kendi kendini kopyalayan canlı hücrelere nasıl dönüştüğü üzerinde durmak olmalı. Buradan hareketle, bu hücrelerin bugün Dünya üzerinde tanık olduğumuz yaşam düzeninde nasıl çeşitlendiğini, bunun zaman içinde nasıl değiştiğini ve bunun evrendeki diğer gezegenimsilerde meydana gelip gelmediğini düşünmeye devam edebiliriz. Bu bölüm, makromoleküllerin canlı hücrelere nasıl dönüştüğünü anlamakla ilgili.

4.2 Hücre Çeşitleri

Hücreler yaşamı bir arada tutan paketlerdir. 'Hücre' terimi, Latince 'küçük oda' anlamına gelen '*cella*' kelimesinden türemiştir. Biyolojide hücre, organizmaların büyümesine ve çoğalmasına olanak sağlayan düzeneği çevreleyen yapıyı ifade eder. Aslında, hücresel paketler içerisinde yaşamın ana biyomolekülleri-

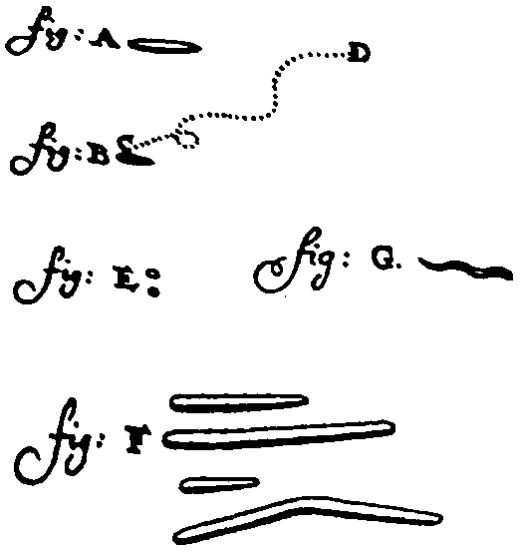
nin bölümlendirilmesi, yaşamın bazı tanımlarının bölümlendirmeyi veya hücresel yapıyı açıkça canlıların bir özelliği olarak içermesini sağlayacak kadar temeldir. Hücreler ilk olarak birçok konuda bilgi sahibi olan Robert Hooke (1636–1703) tarafından gözlemlendi ve ince mantar kesitlerinin incelenmesi sonucu bitki hücrelerinin yapısı, *Micrographia* adlı kitabında şekillerle resmedilerek belgelendi. Robert Hook bölümlendirmenin bir göstergesi olarak, hücrelerin bal peteği yapısına benzerliğini gözler önüne serdi.

Prokaryotik ve ökaryotik olmak üzere iki tip hücre tanımlayabiliriz. Prokaryotik hücrelerin çekirdeği yoktur. Bu nedenle isimleri, Yunanca kelimeler olan *pro* (önce) ve *karyon*'dan (kabuk veya çekirdek –biyolojik bağlamdaki nükleusa bir gönderme) türetilmiştir. Prokaryotlar tek hücreli organizmalardır ve yaşamın iki ana üst âlemini kapsar: bakteriler ve arkeler. Üst âlemler, canlı hiyerarşisindeki en üst basamaktır. Bakteriler toprakta, okyanuslarda, bağırsaklarınızda ve diğer birçok ortamda yaşayan çok sayıda mikroorganizma türünü içerir. Arkeler, en uç koşullarda yaşayan türlerin çoğunu, örneğin hidrotermal bacalardaki mikropları içeren bir üst âlemdir. Arkeler ayrıca, azot döngüsünde rol oynayan ve toprak gibi doğal ortamlarda yaşayan ekstremofil olmayan türleri de içerir. Kitapta ilerlerken bu iki gruba daha çok rastlayacağız. Prokaryotik hücrelerde, DNA hücre sıvısında veya sitoplazmada serbest şekilde yüzer.

Aksine, ökaryotik hücreler DNA içeren bir çekirdeğe sahip hücrelerdir. Biz de dâhil olmak üzere çok hücreli organizmaların ve alg gibi bazı tek hücreli



***Şekil 4.1** Anthony van Leeuwenhoek (a) ve ilk mikroskoplarından biri (b). Mikroskop (yaklaşık 10 cm uzunluğunda) göze tutulur ve nesneler minik cam mercekten gözlenir* (Kaynak: wikicommons, Jeroen Rouwkema).



Şekil 4.2 van Leeuwenhoek'un 1670'te yaptığı çizimler prokaryotların ilk karakalem resimlerini ve çeşitli morfolojilerini göstermektedir. 'fig: B (C–D)' olarak işaretlenen bölümde bakteri hareketliliğinin bir tasvirini görebilirsiniz.

organizmaların yapısını oluştururlar. Ökaryotik hücreler (yaklaşık 10–100 µm) genellikle prokaryotik hücrelerden (1–10 µm) daha büyüktür.

Dünyadaki canlıların çoğu prokaryotik hücrelerden oluşur. Dünyada yaklaşık 10^{29} prokaryot olduğu tahmin edilmektedir. Prokaryotlar, on yedinci yüzyılda Hollandalı kumaş üreticisi Anthony van Leeuwenhoek (1632–1723) tarafından keşfedilmiştir.

van Leeuwenhoek sattığı kumaşın kalitesini arttırmaya hevesliydi ve bu da kumaşlarındaki elyafları gözlemlemek için küçük mikroskoplar geliştirmeye başlamasına sebep oldu (Şekil 4.1). Meraklı bir adam olduğu için yeni aletlerini havuz suyu örneklerini incelemek için de kullandı. Bulduğu şey, o sırada 'animalcules' veya küçük hayvanlar olarak adlandırdığı minik yaratıklardı.

Gözlemlediği yaratıkların farklı şekilleri vardı ve Kraliyet Topluluğu aracılığıyla bu organizmaları ve görünüşlerini tarif ettiği çok sayıda makale yayınladı. İlkel mikroskoplarında bile kokoidler (yuvarlaklar), çubuklar, spiral organizmalar ve bükülmüş hücre şeklindeki mikroplar da dâhil olmak üzere mikroorganizmaların bazı ana şekillerini (morfolojilerini) kayda değer bir biçimde gözlemlemeyi başardı. Şekil 4.2'de görebileceğiniz bakteriyel hareketi veya hareketliliği bile gözlemledi.

Leeuwenhoek bakterileri öldürebileceğini bile gösterdi. 1684 tarihli bir mektubunda şöyle yazdı: "Çok az şarap sirkesi aldım ve dişimden aldığım diş plağını çözdüğüm suyla karıştırdım. O anda Hayvanlar hemen boyanmaya başladı."

Şimdilik tarihsel hikayeleri geride bırakacağız. Yine de bu noktada, Paul de Kruif'ın 1926 yılında yazdığı, mikrobiyoloji tarihinin ve başlıca karakterlerinin eğlenceli ve klasik bir hikayesi olan '*The Microbe Hunters*' adlı kitabı tavsiye etmekte hiçbir sakınca görmüyorum.

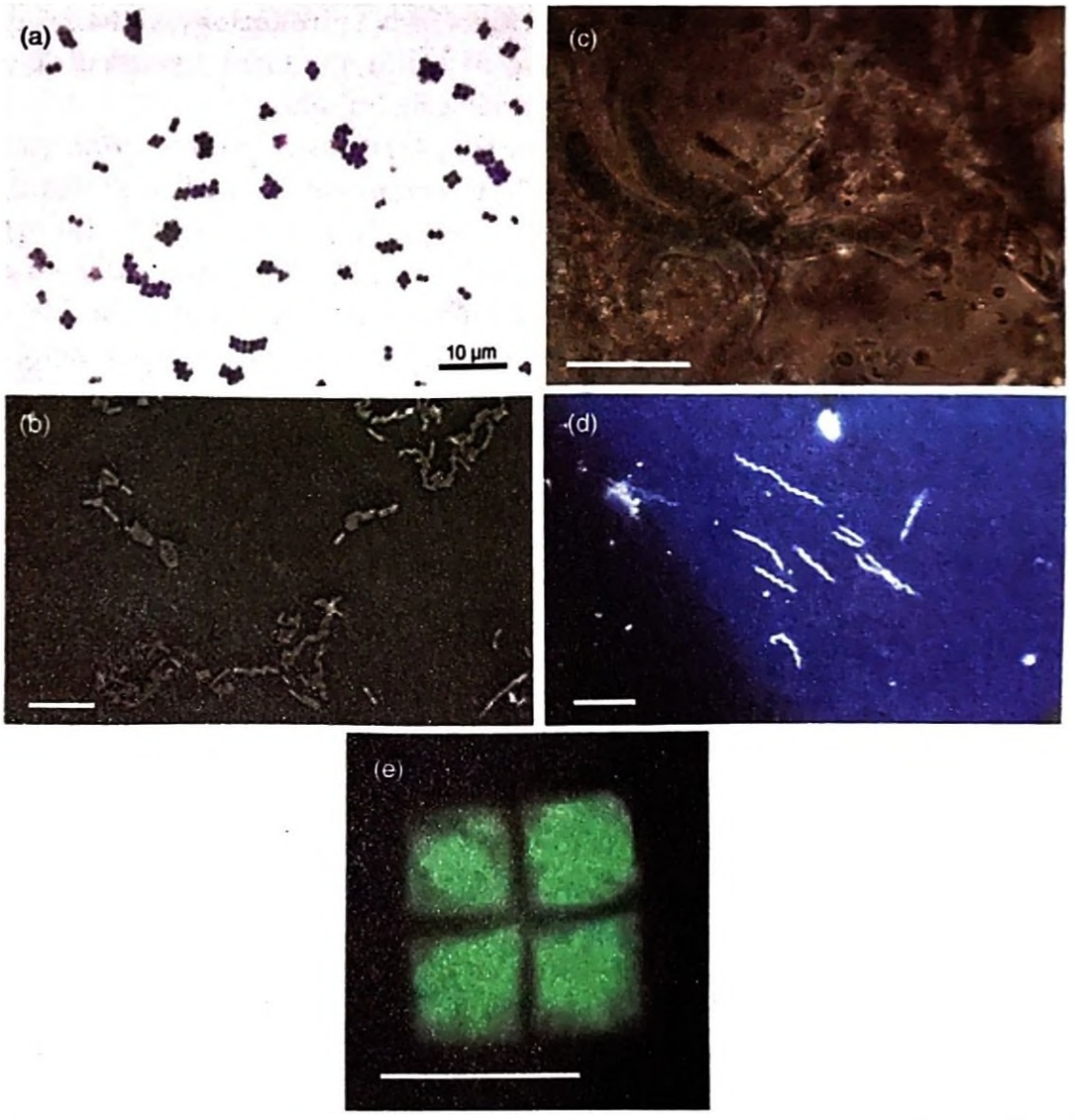
4.3 Hücrelerin Şekilleri

Hücreler türlerine, bulundukları ortamlara ve fonksiyonlarına bağlı olarak çeşitli morfolojiler edinirler. Çok hücreli organizmalardaki ökaryotik hücreler, boyutları 10 ila 100 µm arasında değişen dikdörtgen bitki hücrelerinden, sinir sinyallerini beyin gibi organlara ileten uzun (uzunlukları 1 metreye kadar çıka-

bilir) ve ince (yaklaşık 4 ila 100 µm aralığında) hücreler olan nöronlara kadar değişkenlik gösterebilir.

En tutarlı morfoloji modelleri prokaryotlarda bulunur. Prokaryotik hücreler birçok farklı şekle sahiptir (Şekil 4.3).

Pek çok mikrop, kokoid (yuvarlak) bir morfolojiye sahiptir ve *kok* olarak adlandırılır. İnsanlardaki bazı enfeksiyonlardan sorumlu olan *Staphylococcus* buna bir örnektir (Şekil 4.3a). Bazı türlerde koklar, ikili bir yapı (diplokok) veya *Staphylococcus* örneğinde olduğu gibi üzüm salkımına benzer hücre toplulukları



Şekil 4.3 Çok çeşitli prokaryot şekilleri. (a) Staphylococcus *(üzüm salkımı benzeri kümeler oluşturan kokoid bakteriler). Ölçek çubuğu: 10 mikron* (Kaynak wikicommons, Y Tambe). *(b) Çubuk şeklindeki* Escherichia coli. *Ölçek çubuğu: 5 mikron* (Kaynak: Josef Reischig). *(c) Kuzey Kutbundan filamentli siyanobakteriler. Ölçek çubuğu: 10 mikron. (d) Spiral şeklindeki spiroket bakteriler. Ölçek çubuğu: 10 mikron. (e) Kare şeklindeki bakteri,* Haloquadratum walsbyi; *burada boyanmış ve floresan altında gözlemlenmiş olarak gösterilmiştir. Ölçek çubuğu: 5 mikron.*

oluşturmak üzere toplaşır. Birçok organizma, yuvarlak uçlu silindirler olan çubuk veya *basil* şeklindedir. *Bacillus* grubundaki bakteriler veya bağırsak bakterisi *Escherichia coli* bu organizmalara örnek olarak verilebilir (Şekil 4.3b). Durumu daha da karmaşıklaştırarak bir kok ve bir çubuk karışımı olan prokaryotlar (coccobacillus) bile vardır ve hafifçe uzamış bir kok olarak kabul edilebilirler.

Birçok siyanobakteri (Şekil 4.3c), mantarlar ve *Actinobacteria* grubundaki belli başlı bazı toprak bakterileri gibi filamentli mikroorganizmalar da bulunabilir. Filamentli organizmalar, mantarlarda ve siyanobakterilerde sıklıkla gözlenen dallanmış morfolojilere sahip olabilir. Bazı hastalıklardan sorumlu olan, örneğin Lyme hastalığı (*Borrelia burgdorferi*), Spiroketler (Şekil 4.3d) gibi spiral bir şekle sahip başka organizmalar da vardır. Bunların dışında disk, yıldız ve konik şekillere sahip olan organizmalar da bulunur.

Belki de en sıradışı olanı, kare şeklini alan Arke üst âlemi üyesi *Haloquadratum*'dur (Şekil 4.3e). Organizmalar, 40 μm uzunluğunda mikrop katmanları meydana getiren, bir nevi posta puluna benzeyen levhalara bölünür. Bu organizmaların salamura havuzlarında büyümeleri ve hücrelerin içindeki ve dışındaki ozmotik stres dengesi sonucu bu şeklin oluşmuş olması muhtemeldir.

Bazı mikroorganizmalar stres altında şeklini değiştirebilir. Besin açlığına veya düşük sıcaklıklara maruz kaldığında, bazı türler büyüme sırasında filamentli hale gelebilir. Filamentli şeklin, besin alımı için yüzey alanını arttırdığı düşünülmektedir. Filamentli şekiller ayrıca yüzeylere yapışmayı kolaylaştırır ve organizma katmanlarının veya biyofilmlerin oluşumunu geliştirebilir. Prokaryot şeklinin sadece tesadüfi ve geçici bir evrimsel özellik olmadığı, aynı zamanda mikrobiyal şekilleri etkilediği yeni yeni anlaşılmaya başlanan çeşitli çevresel baskıların var olduğu açıktır.

4.4 Hücrelerin Yapısı

Hücre şekillerinin ve tiplerinin çeşitliliğine rağmen, tüm hücrelerin bir organizmanın işlevsel olması için gerekli olan üç temel bileşene sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bunlar: (i) hücre içeriğini bir arada tutmak için bir zar, (ii) moleküler sentezi ve nihayetinde hücrenin kendisini çoğaltılmasını yönlendirmek için bir bilgi depolama sistemi ve (iii) kimyasal reaksiyonları, büyümeyi, üremeyi vb süreçleri gerçekleştirmek için dış ortamdan enerji elde eden bir enerji sistemi. Bu bölümde hücreleri çevreleyen zarlara ve bilgi depolama sistemine odaklanarak hücrelerin yapısına bakacağız. Bir sonraki bölümde, yaşamın kendini korumak, büyümek ve üremek için nasıl enerji elde ettiği üzerine odaklanacağız.

4.5 Zarlar

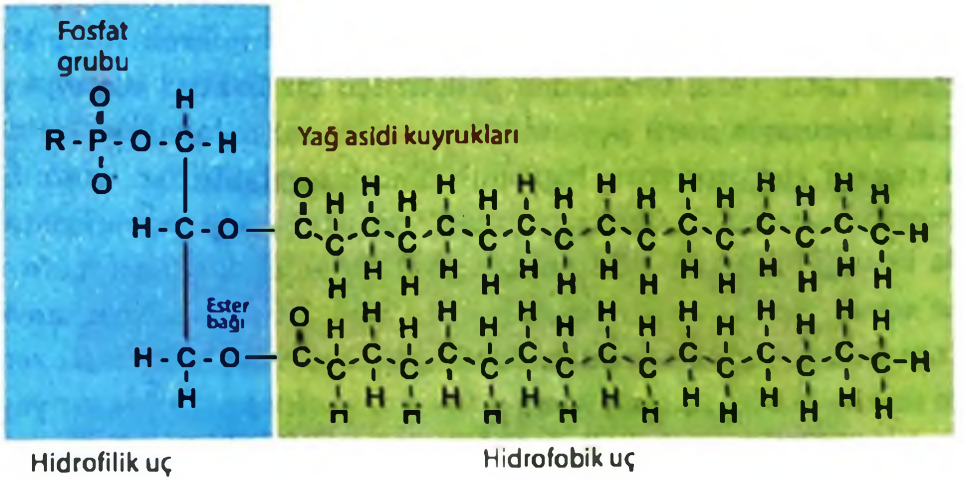
Kendi kendini kopyalayan bir hücre oluşturmak için molekülleri konsantre hale getirecek bazı kanal tiplerine ihtiyaç duyarız. Biri, kimyasalların karmaşık reaksiyonlar ve dış ortamla olan etkileşimler için yeterli konsantrasyona ulaştığı

bir bahçe havuzuyla ilgili bilim kurgu senaryosu hayal edebilir. Havuz temelde fiziksel sınırlar tarafından tanımlanan, bileşenlerini karıştırmak için harekete geçiren ve onları süspansiyon halinde tutan bir 'hücre' olabilir. Bununla birlikte, genellikle, en azından Dünyada, hidrolojik döngü bir şeyleri seyreltme eğilimine sahiptir. Bu nedenle çoğu su kütlesinin faydalı biyokimyanın gerçekleşmesi için çok fazla seyreltik olması nedeniyle, hücrelerde bir zar (membran) yapısı gereklidir (ve ayrıca hücresel bahçe havuzunun kendini çoğaltma gibi bir imkânı yok, bu yüzden geleceği oldukça sınırlı).

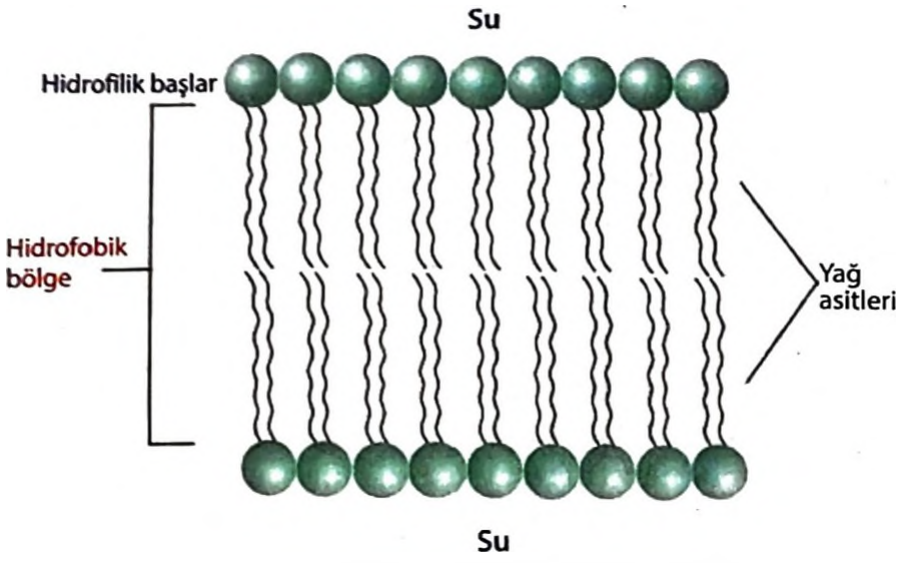
Bir hücre zarı veya zar, molekülleri nispeten yüksek konsantrasyonlarda bir arada tutmak için bir yol sağlar. Bir zar, dış koşullar oldukça kuru olduğunda bile kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesine izin verecek şekilde suyu tutar.

Bir önceki bölümde, hidrofilik (suyu seven) bir baş kısmına ve yağ asidinden meydana gelen hidrofobik (suyu sevmeyen) bir kuyruk kısmına sahip olan bazı lipidlerden bahsettik. Önemli lipid sınıflarından biri, yüklü polar ucu bir fosfat grubu olan fosfolipidlerdir (Şekil 4.4).

Amfifilik olarak adlandırılan bu moleküllerin dikkat çekici bir özelliği, suyun varlığında, hidrofilik başın suya yönelmesi ve hidrofobik kuyrukların sudan uzaklaşmak için birbirlerine doğru çekilmesiyle kendiliğinden bir araya gelme eğiliminde olmalarıdır. Bunun sonucunda ortaya çift katmanlı bir lipid zar çıkar (Şekil 4.5). Bu çift katmanlı yapı, içinde sıvı olan küçük küresel yapıdaki veziküller halinde toplanma eğilimindedir. Bunlar temel anlamda hücresel zarlardır. Bu, hiçbir şekilde ender görülen bir özellik değil. Hatta meteorlardan çıkarılan uzun zincirli **karboksilik asit**, dekanoik asit, gibi **yağ asitlerinin** bile kendi başlarına zar benzeri veziküller oluşturma eğiliminde olması bu durumun bu molekül sınıfının temel bir özelliği olduğunu ortaya koyar ve Dünya üzerinde ilk hücre zarlarının bir araya gelmesinin çok da olağanüstü bir durum olmayabileceğini gösterir.



Şekil 4.4 Bazı hücre zarlarını oluşturan fosfolipidler gibi amfifilik moleküller. Bu moleküller bir hidrofilik (suyu seven) ve bir hidrofobik (suyu sevmeyen) uca sahiptirler (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 4.5 Hücre zarlarını oluşturan çift katmanlı lipid yapısını gösteren basitleştirilmiş bir şema (Kaynak: Charles Cockell).

Hücrelerde lipid zarın kendisine ek olarak, çift katmanın içine yerleşmiş diğer proteinler de bulunur, bu da hücrenin iç ortamının dış çevreyle etkileşimini düzenleyen karmaşık bir sisteme yol açar. Bu proteinlerin birçoğu, örneğin hem hücre içine taşınacak besinler hem de dışarıya atılacak atıklar için ince kanallar gibi davranan transmembran proteinleridir. Bu proteinlerin bazıları, hücrenin dış ortamdaki fiziksel ve kimyasal koşullardaki değişiklikleri algılamasını ve bunlara yanıt vermesini sağlayan bir iletişim hattı görevi görür. Zar ve sahip olduğu proteinler oldukça akışkandır.

4.5.1 Gram-negatif ve Gram-pozitif Prokaryotik Zarlar

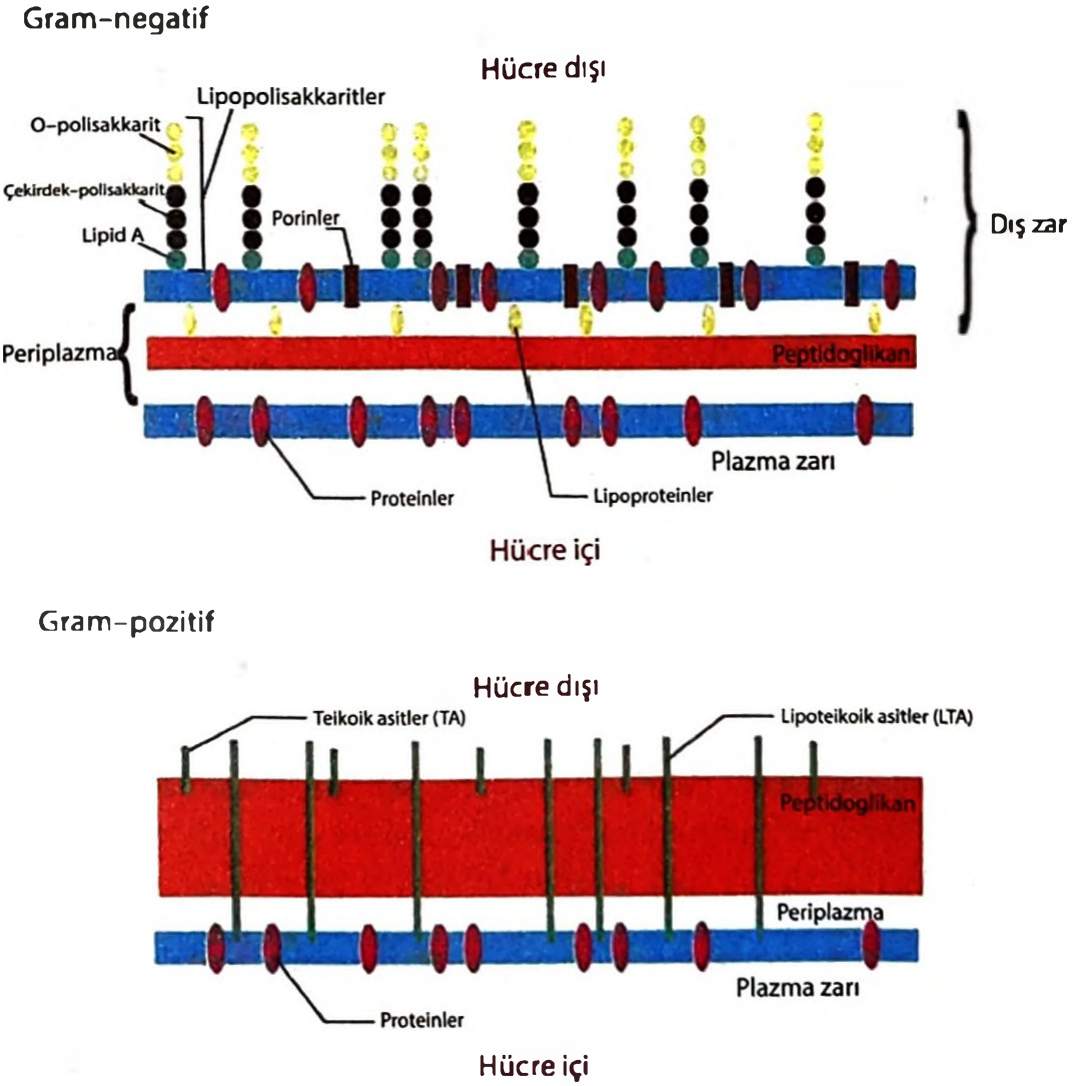
Canlılarda bulunan çift katmanlı lipid tabakaları daha karmaşık yapılar oluşturur. Örneğin bakteriler, on dokuzuncu yüzyılda mikrobiyolog Hans Christian Gram (1853–1938) tarafından geliştirilen bir bakteri boyama yöntemi olan **Gram** boyamayla nasıl boyandıklarına göre tanımlanarak Gram-pozitif ve Gram-negatif zar yapılarına kapsamlı olarak ayrılabilirler. Gram boyamada, mikroorganizmalar ilk önce koyu mavi/menekşe rengi veren kristal viyole boyasıyla boyanır. Etanolle yıkandıktan ve daha soluk bir boya (safranin) eklendikten sonra, Gram-pozitif organizmalar boyayı tutarak koyu mavi renkte görünürken Gram-negatif organizmalar boyayı kaybeder ve kırmızı renkte görünür. Bu farklılıkların, iki organizma grubundaki oldukça farklı zar yapılarına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

Gram-negatif zarlar (örneğin, her yerde yaygın olarak bulunan bağırsak bakterisi *Escherichia coli*), bir iç ve bir dış zara sahiptir. Bu zarların arasında sadece birkaç katman peptidoglikan molekülü içeren ince bir **peptidoglikan**

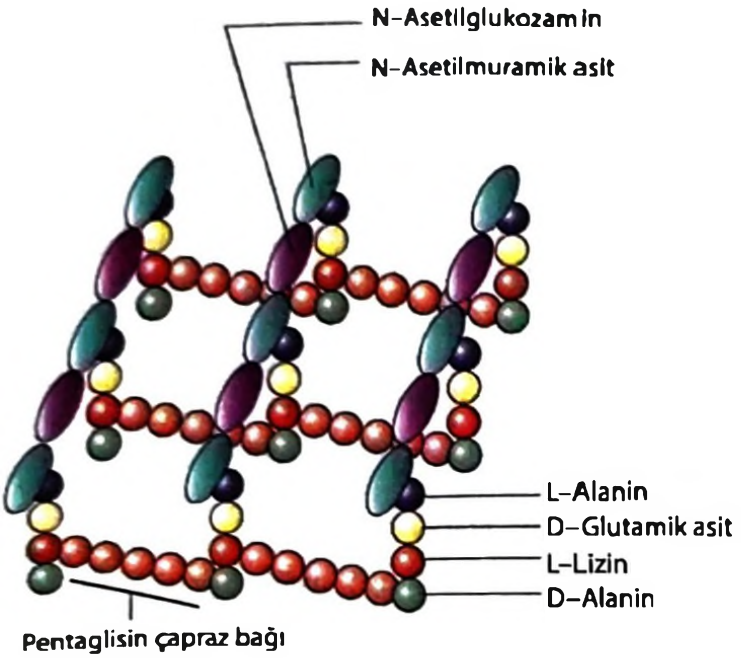
ağı bulunur (Şekil 4.6). İç zar, plazma zarıdır. İç ve dış zar arasındaki boşluğa **periplazma** denir. Sitoplazmadan biraz daha viskozdur ve şeker ile amino asit taşınmasında rol oynayan çok çeşitli proteinleri içerir. Periplazma ayrıca zararlı enzimleri tutar ve hücrelere zarar vermelerini önler.

Peptidoglikan, amino asitlere çapraz bağlanmış şekerlerden oluşan karmaşık bir yapıdır. Yaşamda, D–amino asitleri içeren az sayıdaki yapıdan biridir (Şekil 4.7). Peptidoglikan, hücrenin şeklini korumasına yardımcı olur ve hücre bölünmesine katılır.

Zardaki diğer yapılar, dış zarda bulunan protein sınıflarından biri olan **porinleri** içerir. Hücre zarı boyunca iyonların ve diğer küçük bileşiklerin hareketini kontrol ederler. Hücre ile dış ortam arasındaki iletişim ve etkileşimle ilişkili başka transmembran proteinleri de vardır. Lipidlerle birlikte dış zara bağlı uzun şeker zincirler olan **lipopolisakkaritler** (LPS), hücrelerin yüzeylere bağlanmasında rol oynarlar. Dış hücre zarının iç kısmındaki çeşitli **lipoprote-**



***Şekil 4.6** Gram-negatif ve Gram-pozitif hücre zarları* (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 4.7 Tipik bir peptidoglikanın yapısı. Pentaglisin çapraz bağı beş glisin amino asidinden meydana gelir. N-asetilglukozamin ve N-asetilmuramik asit glukoz türevi şekerlerdir (Kaynak: Charles Cockell).

inler, biyokimyasal reaksiyonlara aracılık eder. Ayrıca, dış zarın peptidoglikan katmanına bağlanmasında da rol oynarlar.

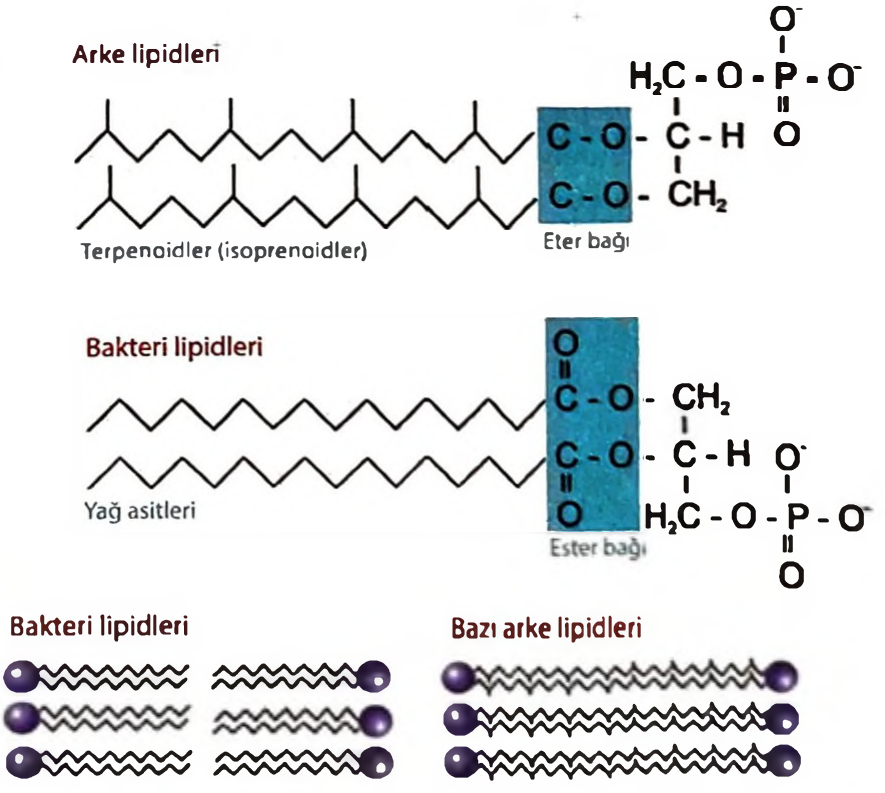
Gram-pozitif hücre duvarlarında (Şekil 4.6), üzerinde bir periplazmik boşluk olan tek bir hücre zarı vardır ve hücre, yaklaşık 40 peptidoglikan katmanından (sadece birkaç nanometre kalınlıkta olan Gram-negatif peptidoglikan katmanına kıyasla 30 ila 100 nm kalınlığında) oluşan kalın bir peptidoglikan ağla çevrilidir. **Teikoik asitler** ve **lipoteikoik asitler**, yüzeyde ve peptidoglikan tabakası boyunca bulunan uzun zincirli şekerlerdir. Peptidoglikan katmanlarının bütünlüğünde rol oynarlar, ancak bazıları Gram-negatif hücre duvarındaki lipopolisakkaritler gibi hücrelerin tutunmasında da görevlidir. Topraktan uzay aracı montaj odalarına kadar çeşitli yerlerde bulunan çok yönlü bir bakteri olan *Bacillus subtilis*, Gram-pozitif organizmalara bir örnek olarak verilebilir.

Hem Gram pozitif hem de negatif bakterilerde plazma zarının dışındaki yapılar genellikle **hücre duvarı** olarak adlandırılır.

Bakteriyel hücre duvarı genellikle **glikokaliks** adı verilen başka bir katmanla çevrilidir. Glikokaliks, bir polisakkarit ağıdır. Belirgin, jelatinimsi bir glikokaliks kapsül olarak adlandırılırken düzensiz, dağınık olan katman bir balçık tabakası olarak adlandırılır. Hücre dışına bağlanmış şekerler bazen Ekstraselüler Polisakkarit veya **EPS** olarak adlandırılır. EPS, yüzeylerle etkileşime aracılık eden koruyucu bir şeker katmanı olarak işlev görür. Hücrelerin mineralleri bağlamasına ve biyofilm oluşturmasına izin verir. Makroskopik **stromatolitler** veya konak mikroorganizmalarda mineraller ile bakterileri birbirine bağlayan maddedir. Özellikle siyanobakteriler verimli EPS üreticileridir.

4.5.2. Arke Zarları

Arkelerin hücre zarlarında büyüleyici bir fark bulunur (Şekil 4.8). Filogenetik ağaçlar ve uçlarda yaşam bölümlerinde arkelerden daha fazla söz edeceğiz. Arkelerde zarları oluşturan lipidlerin bakteri ve ökaryotlardakilerden farklı olması, bu üst âlemlerin sadece uzaktan ilişkili olduklarını gösterir. Lipidlerinin hidrofilik baş bölgelerinde ester grupları yerine, çeşitli kimyasallara karşı daha dirençli olan ve zorlu ortamlara karşı dirençte rol oynayabilecek eter gruplarına sahiptirler. Lipidlerin uzun kuyrukları da çok farklıdır. Terpenoidler (veya izoprenoidler) olarak adlandırılan bu kuyruklar, bakterilerdeki uzun ve basit lipid kuyruklarının (yağ asitleri) aksine karmaşık yan zincirlere sahiptir. Bu yan zincirler, zarları daha az geçirgen ve zorlu koşullara daha dayanıklı hale getirebilir. Daha da garip bir şekilde, bazı arkelerde çift katman, iki lipidin kuyruklarının bir araya geldiği bir tek katmanla değiştirilir (Şekil 4.8). Bu, çok asidik ortamlarda yaşayan bir arke türü olan *Ferroplasma*'daki durumdur. Bu uyarlamanın zarları zorlu koşullara karşı daha dirençli hale getirebileceği ve zarların dağılmasını önleyebileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.8 Arkelerdeki hücre zarı lipidlerinin bakterilerdeki lipidlere göre yapısı. Alttaki şema ayrıca, arke lipidlerinin ortada nasıl birleşebileceğini de gösterir (Kaynak: Charles Cockell).

4.6 Yaşamın Bilgi Depolama Sistemi

Yaşam molekülünü içeren bir zara sahibiz. Fakat bariz bir soru ortaya çıkıyor: yaşamın biyokimyası nasıl kontrol edilmekte? Hücrenin çalışması ve sonunda kendini yeniden üretmesi için gerekli molekülleri oluşturacak talimatların okunma ve yönlendirilme şekli nedir? Yaşamın bilgi depolama sistemi deoksiribonükleik asit, DNA'dır. Bu molekülün yapısını bir önceki bölümde kısaca keşfettik. G, T, A ve C bazlarının, bu dört harfin farklı kombinasyonlarından oluşan uzun bir dizide bir araya getirilerek DNA'nın bilgi kodunu içerdiğini öğrendik. Burada kodun nasıl yararlı proteinlere dönüştürüldüğünü araştırıyoruz.

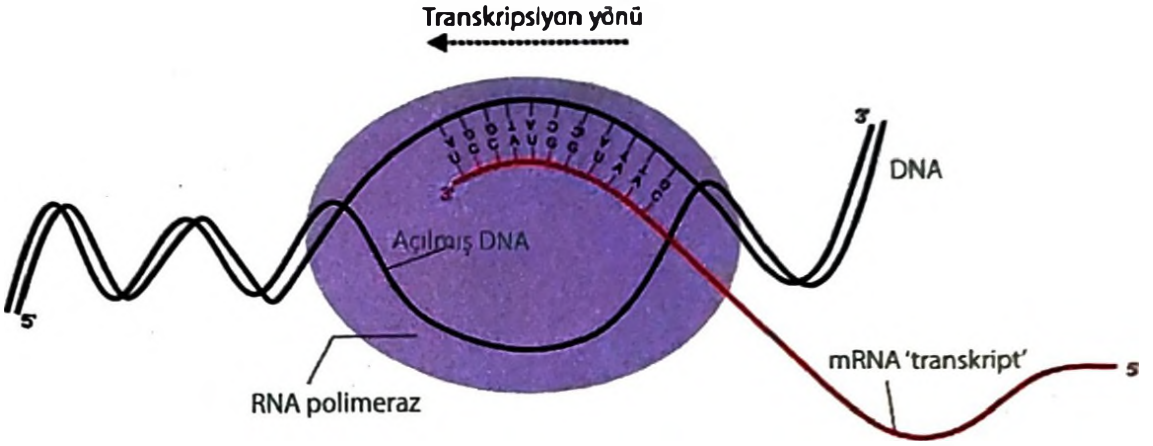
4.6.1 Transkripsiyon – DNA'dan RNA'ya

Bu noktada asıl soru ortaya çıkıyor: DNA bilgi depolama sisteminden büyüme ve üreme için hücrenin ihtiyaç duyduğu proteinleri ve diğer molekülleri yapmaya nasıl gidiyoruz?

Bu olağanüstü dönüşüm iki aşamada gerçekleşir. İlk olarak DNA, son bölümde de tarif edilen ribonükleik asit, RNA adlı benzer bir molekül yapmak için kullanılır. RNA, timinin (T) urasil (U) ile yer değiştirmesi dışında DNA'ya benzer, bir hidroksil grubunda ekstra oksijen atomu bulunan bir riboz şekerine sahiptir (DNA, *deoksi*–ribozdur) ve genellikle (ancak her zaman değil) tek sarmallıdır. Bunlar, DNA ile arasındaki üç önemli fark. DNA ve RNA, her bir yapısal birimde bir baz, şeker ve fosfat içermeleri bakımından benzerdir.

DNA çift ipliği birbirinden ayrılırken RNA, DNA'dan sentezlenir. DNA, transkripsiyon baloncuğu adı verilen, uzunluğunun küçük bir kısmı boyunca (yaklaşık 15 baz çifti uzunluğunda) gevşer (Şekil 4.9). DNA'nın bu noktasında, beş alt birimi olan bir protein, RNA polimeraz, DNA üzerindeki belirli promotörleri tanıyan küçük bir özel protein olan sigma faktörüyle bağlanır. Promotörler, kodu çözülecek belirli dizilerin başlangıcına karşılık gelen DNA dizileridir ve halk dilinde RNA polimeraza "DNA'yı burada bir RNA dizisine kodlamaya başlayın" derler. RNA polimeraz, iplik boyunca DNA dizisini okumaya devam ederken mesajcı RNA veya mRNA adı verilen bir RNA molekülü oluşturur. Bu mRNA molekülüne bazen mRNA transkripti veya birincil transkript denir. Esasen, RNA'daki her bir bazın DNA'daki eş bazına karşılık gelen DNA kodunun bir kopyasıdır. Bazen DNA'nın tamamlayıcı bir kopyası olarak adlandırılır. mRNA ipliğinin üretimi, DNA ipliğinin 3′ ucundan 5′ ucuna doğru gerçekleşir.

Prokaryotlarda, bu işlem hücrenin sitoplazmasında meydana gelir. Ökaryotlarda, hücre çekirdeğinde gerçekleşir. Ökaryotik hücrelerde çekirdekte sentezlenen mRNA'nın sitoplazmaya taşınması gerekir. Bu şekilde üretilen mRNA ipliği daha sonra protein sentezi için şablon görevi görebilir.



Şekil 4.9 DNA'nın mRNA'ya transkripsiyonu (Kaynak: Charles Cockell).

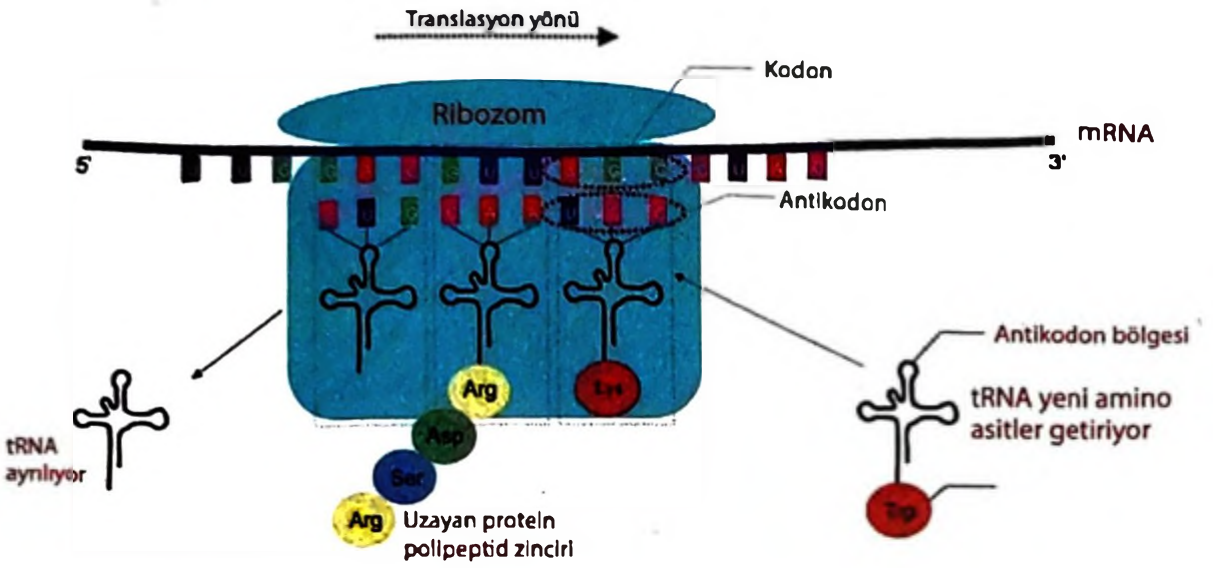
4.6.2 Translasyon – RNA'dan Proteine

Şimdi, başka bir soru kendini gündeme getiriyor. mRNA'yı proteine nasıl çeviririz? Bu, **translasyon** adı verilen bir sonraki süreçte gerçekleştirilir.

Translasyonda, bir **ribozom** içine yerleşen başka bir RNA türü (bazen *ribozomal* **RNA** veya **rRNA** olarak adlandırılır), mRNA zincirine bağlanır. Böylece, **taşıyıcı RNA (tRNA)** adı verilen bir diğer RNA molekülünün bağlanabileceği bir iskele oluşturur. tRNA'lar, proteinlerin oluşmasını sağlamak için amino asitleri bir araya getiren moleküllerdir. Bunlar, mRNA'ya bağlanan ve uzayan bir polipeptid zincirine eklemek için amino asitleri hizalayan adaptör molekülleri olarak düşünülebilir.

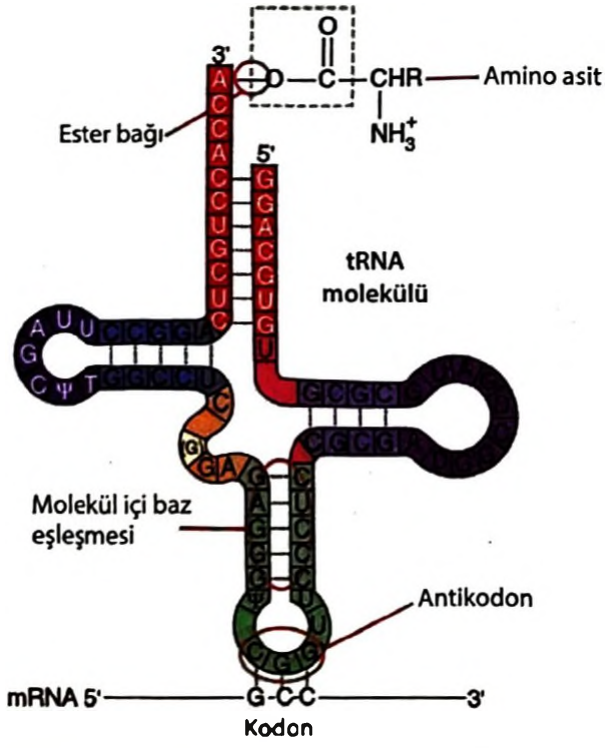
Bu süreci basit bir şekilde inceleyip neler olduğunu düşünelim. Elimizde, DNA'dan kopyalanan bir mRNA ipliği var. Bu ipliğin çevresinde, protein sentezinin meydana geleceği toplanma noktasını sağlayacak alt birimlerden meydana gelen ribozom oluşur. Ribozom etkileyici bir yapıdır. Bakterilerde ribozom, iki katlanmış RNA ipliğinden ve en az 31 özelleşmiş proteinden oluşan büyük bir RNA alt biriminden oluşur. 16S rRNA adı verilen bir katlanmış RNA parçasından oluşan küçük bir alt birim, diğerlerinden farklı 21 proteinle birlikte mRNA'ya bağlanır (16S rRNA'yı unutmayın, kitapta daha sonra Dünyadaki yaşamın çeşitliliğini keşfettiğimizde önemli hale gelecektir). Tüm bu düzenek şimdi protein yapmaya hazır (Şekil 4.10).

Ribozom, tRNA'nın bağlanabileceği korunaklı bir ortam sağlar. tRNA'nın bir ucunda bir amino asit ve her amino asidin kendisiyle ilişkili kendi tRNA molekülü vardır. Diğer ucunda ise bir **antikodon** bulunur. Antikodon, mRNA molekülü üzerindeki üç bazla (kodon olarak adlandırılır) eşleşen üç harfli bir baz dizisidir. Böylece her kodon veya üçlü kod, spesifik bir amino aside karşılık gelir (Şekil 4.11).



Şekil 4.10 mRNA çevresinde protein sentezi düzeneği (Kaynak: Charles Cockell).

Bunu nicel olarak düşünürsek, hemen her kodonun 64 kombinasyon kodlayabildiğini görebiliriz. Kodonlarda dört olası baz vardır, G, C, A ve U ve bize 4 x 4 x 4 = 64 olası kombinasyon veren üç kodon pozisyonu bulunur. Ancak önceki bölümde yaşam tarafından kullanılan genellikle 20 amino asit olduğunu gördük. Sonuç olarak, fazlalık vardır. Her amino asit, birden fazla kodon tarafından kodlanabilir. Biz buna 'genetik kodun dejenere olması' diyoruz. Şekil 4.12, mRNA kodonlarını ve bunlara karşılık gelen amino asitleri gösterir.



Şekil 4.11 Bir tRNA'nın amino asidiyle birlikte mRNA'ya bağlanması. Kodon antikodon bağına dikkat edin (Kaynak: John Wiley & Sons, Ltd).

Bazı kodonlar okuma işlemini durdurma talimatını kodlar ve kodonlardan biri (AUG –bir metiyonin) mRNA dizisini okumaya başlar.

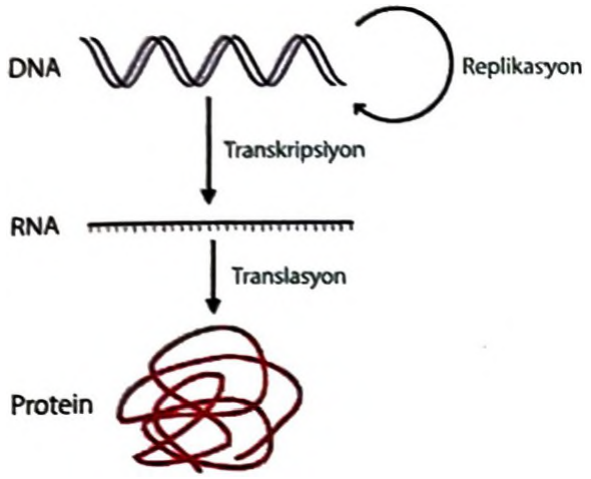
mRNA'ya bu şekilde getirilen her amino asit, mevcut zincirle bir peptid bağı oluşturur ve böylece yeni tRNA'lar mRNA'ya bağlandıkça, bir polipeptid veya protein sentezlenir, ribozomlar mRNA ipliği boyunca hareket eder. Böylece mRNA dizisi, birincil protein dizisine çevrildi. Bu birincil dizi yararlı bir işlevsel proteinin üç boyutlu yapısını oluşturmak için birlikte katlanacaktır.

Birinci pozisyon	İkinci pozisyon U	C	A	G	Üçüncü pozisyon
U	UUU Phe	UCU Ser	UAU Tyr	UGU Cys	U
	UUC Phe	UCC Ser	UAC Tyr	UGC Cys	C
	UUA Leu	UCA Ser	UAA Stop	UGA Stop	A
	UUG Leu	UCG Ser	UAG Stop	UGG Trp	G
C	CUU Leu	CCU Pro	CAU His	CGU Trp	U
	CUC Leu	CCC Pro	CAC His	CGC Arg	C
	CUA Leu	CCA Pro	CAA Gln	CGA Arg	A
	CUG Leu	CCG Pro	CAG Gln	CGG Arg	G
A	AUU Ile	ACU Thr	AAU Asn	AGU Ser	U
	AUC Ile	ACC Thr	AAC Asn	AGC Ser	C
	AUA Ile	ACA Thr	AAA Lys	AGA Arg	A
	AUG Met	ACG Thr	AAG Lys	AGG Arg	G
G	GUU Val	GCU Ala	GAU Asp	GGU Gly	U
	GUC Val	GCC Ala	GAC Asp	GGC Gly	C
	GUA Val	GCA Ala	GAA Glu	GGA Gly	A
	GUG Val	GCG Ala	GAG Glu	GGG Gly	G

Şekil 4.12 Evrensel genetik kod. mRNA kodonları ve bunlara karşılık gelen amino asitler. Amino asitler üç harfli gösterimleriyle gösterilmiştir (bakınız Ek). Kodun dejenerasyonuna dikkat edin.

Tek bir proteini kodlayan baz dizisine **gen** denir ve biz bir organizma içindeki genlerin tamamını bu organizmanın **genomu** olarak adlandırırız. Genom büyüklüğü organizmalar arasında büyük ölçüde değişiklik gösterir. İnsan genomu yaklaşık 3240 megabaz DNA içerir, bakteriler türe bağlı olarak yaklaşık 13 megabaz DNA'ya sahiptir ve tipik olarak yaklaşık 4000 gen içerir. Serbest yaşayan, kendi kendini kopyalayan bir organizmaya ait en küçük genom, bitki özsuyuyla beslenen böceklerde yaşayan *Carsonella ruddii*'ye aittir. Sadece 160 kilobaz DNA ve 182 protein kodlayan geni olan bir genoma sahiptir. En küçük grip virüsünün (kendi başına çoğalamayan) sadece 11 geni vardır. Genom büyüklüğü karmaşıklığa çok gevşek bir şekilde bağlı olsa da (bakteriler hayvanlardan daha küçük genomlara sahip olma eğilimindedir), bu ilişki hiçbir şekilde genellenemez. Bazı protozoalar (tek hücreli ökaryotlar) insanlardan daha büyük genomlara sahiptir. Organizmaların genom boyutları arasındaki bu büyük farka **C-değeri paradoksu** denir. 'C', ilk araştırmacılar tarafından sabit olduğu düşünülen türler arasındaki DNA miktarını ifade eder.

Bir organizmadaki DNA'nın bir kısmı, proteine bilinen bir çevirisi olmadığı için **kodlama yapmayan DNA** [non-coding DNA] olarak adlandırılır. Bu kodlama yapmayan DNA'nın miktarı türler arasında değişir. Bakterilerde %2 civarında olabilir ve insanlarda %98'e kadar çıkabilir. Bazen **çöp DNA** olarak adlandırılır ki bu yanlış bir adlandırmadır, çünkü bu DNA'nın bir kısmının, örneğin ribozomlar dâhil RNA molekülleri üretmek veya viral DNA'yı kodlamak gibi biyokimyasal fonksiyonlara sahip olduğu giderek daha fazla anlaşılmaktadır. Dizilerin bazıları sahte-genlerdir. Bunlar, hücre tarafından üretilmeyen



Şekil 4.13 DNA'dan proteinlere giden iki ana aşamanın özeti (Kaynak: Charles Cockell).

veya fonksiyonel olmayan diğer genlerin kopyaları olan proteinleri kodlayan dizilerdir. C–değeri paradoksunun çoğu kodlamayan DNA'yla açıklanmaktadır.

DNA'dan RNA'ya, RNA'dan proteine geçme sürecine bazen 'moleküler biyolojinin santral dogması' denir (Şekil 4.13). 'Dogma'kelimesi bilimde her zaman rahatsız edici bir kelimedir, ancak tüm şema genel olarak genetik kodu okumanın iki temel adımını göstermektedir.

4.6.3 Olağanüstü Bir Kod

Bu süreç hakkında kayda değer ve kendine saygılı herhangi bir insanı sersemletecek birkaç dikkat çekici şey var. İlk olarak, bazı organizmalarda bazı küçük değişiklikler yapılmasını engelleyen, Şekil 4.12'de gösterilen kodon tablosu esasen tüm yaşam formları için evrenseldir. Bu sadece genetik kodun kökeninin çok eski zamanlara dayalı olduğunu göstermekle kalmaz, aynı zamanda Dünya üzerindeki tüm canlıların, muhtemelen bu koddan önce var olan daha basit kodlardan ve yapılardan ortaya çıkan tek bir ortak atadan türetildiğini kuvvetle önerir.

İkincisi, tablo şaşırtıcıdır, çünkü tek boyutlu bir bilginin –bir DNA molekülünün ipliği– kimyasal olarak aktif bir molekülün üç boyutlu yapısına dönüştürülmesine izin veren bir koddur. Yapılar nasıl ortaya çıktı ve tek boyutlu bilgi depolamayı üç boyutlu biyolojik işleve bağlayan evrimsel süreç neydi? Bu, astrobiyolojideki, yaşamın kökenini anlama çabalarımızla açık bir şekilde bağlantılı en büyüleyici sorulardan biridir ve yaşamın kökenini düşündüğümüzde buna geri döneceğiz.

Yine de, bilgi depolama sistemi hücre için çok önemlidir, çünkü bu bilgilerden tüm hücre talimatları ve düzenli biyolojik modeller ortaya çıkar. Hücrenin kendisini çoğaltması ve çevresiyle etkileşmesi için talimatlar verilmiştir. Bu bilgi, çok hücreli karmaşık organizmalar içindeki hücreleri düzenler, birbirleriyle iletişim kurmalarına ve farklı hücre yapılarını oluşturmalarına izin verir, her hücre genel olarak ayrı bir rol oynar.

4.6.4 DNA Replikasyonu

Hücredeki en önemli olaylardan biri, hücre bölünmesi sırasında gerçekleşen DNA replikasyonudur. Bu olay, birçok insanın çoğalmayı yaşamın özelliklerinden biri olarak düşünmesinin temelini oluşturmaktadır. DNA replikasyonu

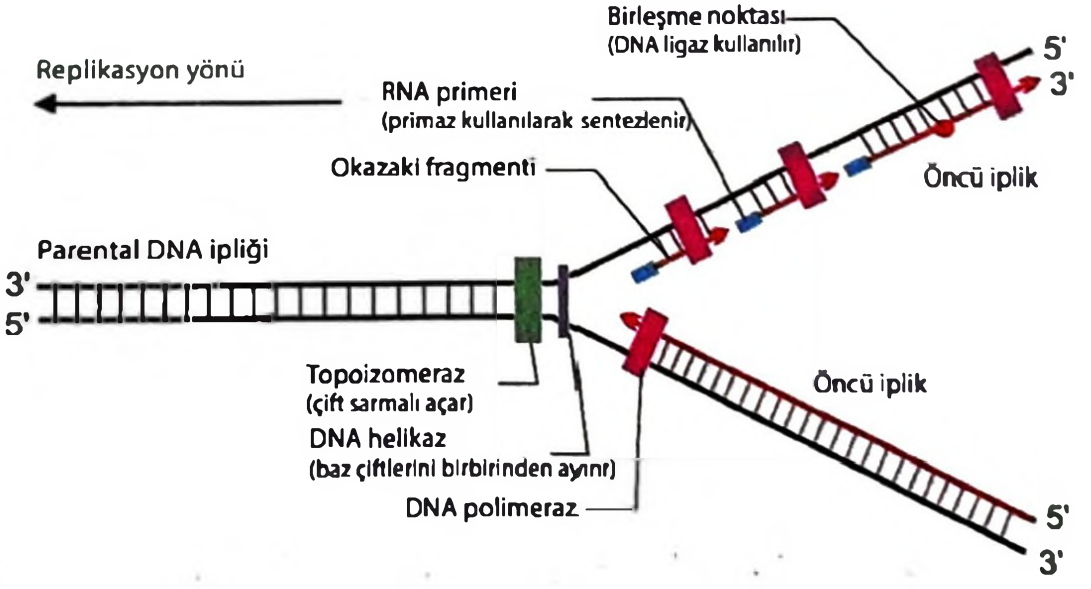
birbirleriyle uyum içinde gerçekleşen üç adımda ilerler: **başlatma**, **uzama** ve **sonlandırma**.

Bir hücrede DNA replikasyonu, DNA'nın belirli yerlerinde veya **replikasyon orijininde** başlar. Bakterilerin dairesel genomları veya **kromozomları** üzerinde tek bir replikasyon orijini bulunurken, daha uzun doğrusal kromozomlara sahip ökaryotlarda replikasyon birden fazla orijinde başlatılır. DNA çift sarmalının bu bölgelerde birbirinden ayrılması ve yeni ipliklerin sentezi bir **replikasyon çatalı** oluşmasıyla sonuçlanır (Şekil 4.14). Bu işlemi daha ayrıntılı olarak inceleyelim.

Helikaz adı verilen bir enzim, temelde hidrojen bağlarını 'çözerek' DNA'nın iki ipliğini ayırmak için kullanılır. Helikaz DNA'yı replikasyon çatalında ayırdıkça, önündeki DNA dönmeye zorlanır. Bu süreç, DNA'da bükülmeler meydana getirir ve bir direnç oluşur, bu da önlem alınmazsa en sonunda replikasyon çatalının ilerlemesine engel olacaktır. Topoizomeraz, DNA sarmalını geçici olarak açarak, iki ipliğin birbirinden ayrılmasının neden olduğu gerginliği azaltan bir **enzimdir**.

Replikasyon çatalı iki adet tek iplikli DNA üretir. İpliklerden birinde (Şekil 4.14) DNA, replikasyon çatalı ilerledikçe onu takip ederek tek iplik boyunca çalışan bir DNA polimerazla sentezlenebilir. Buna 'öncü' iplik denir. DNA polimeraz, nükleotidlerin yeni oluşan DNA zincirinde birleştirilmesinden sorumlu eski bir **multimerik** enzimdir.

Bununla birlikte diğer DNA ipliğinde, 'geriden gelen' iplik, sentez, DNA sarmalı açıldıkça replikasyon çatalı yakınında her zaman yeniden başlamalıdır (Şekil 4.14). Bunun nedeni DNA replikasyonu için bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmasıdır. Bu enerji, mevcut DNA zincirine eklenen nükleotidin 5'–trifos-



Şekil 4.14 Sürece dâhil olan çeşitli mekanizmalardan bazılarını gösteren DNA replikasyonu (Kaynak: Charles Cockell).

fatının kırılmasıyla elde edilir, bu da DNA sentezinin sadece 5' yönünden 3' yönüne ilerleyebileceği anlamına gelir. Sonuç olarak, DNA replikasyonunun bir yönü vardır. Bu durum, geriden gelen ipliğin parçalar halinde sentezlenmesi gerektiği sorununu ortaya çıkarır. Bu görevi yerine getirmek için bir RNA primeri sentezlenir ve DNA'ya bir primaz enzimiyle (RNA sentezlediği için aslında bir RNA polimeraz türüdür) bağlanır. Daha sonra DNA sentezi DNA polimeraz aracılığıyla, oluşturulan RNA primerinden ilerler. Bu şekilde üretilen DNA parçalarına 'Okazaki' fragmentleri denir. Bu fragmentler, tam bir çift sarmal oluşturmak için DNA ligaz adı verilen bir enzimle birbirine bağlanır.

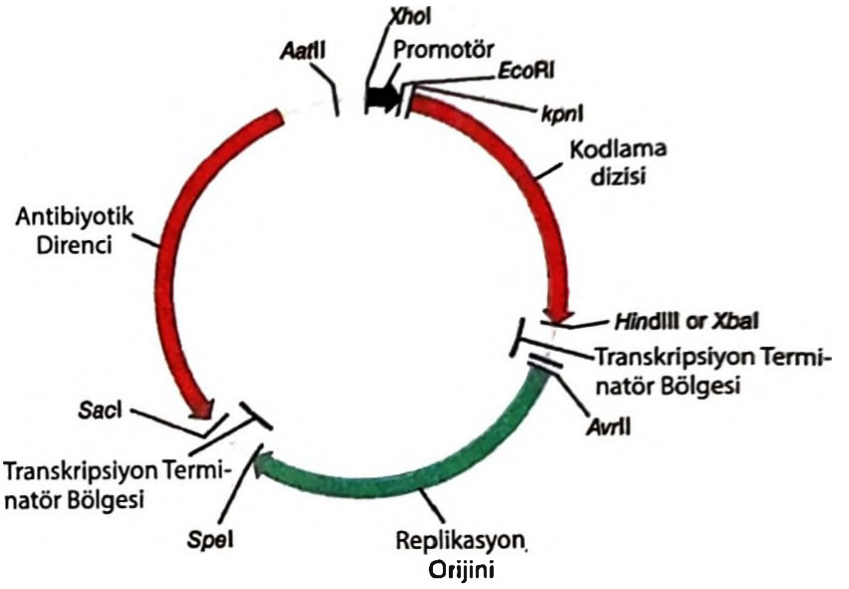
Replikasyon sırasında başka bir sorun daha var. Helikaz iki DNA ipliğini ayırdıktan sonra üretilen tek iplikli DNA, kendi üzerine katlanarak ikincil yapılar oluşturma eğilimindedir. Bu yapılar DNA polimerazın hareketine iplik boyunca müdahale eder. Bunu önlemek için, tek iplik bağlayıcı proteinler, ikinci iplik sentezlenene kadar DNA'ya bağlanır ve ikincil yapı oluşumunu önler.

DNA replikasyonunun sonlandırılması, DNA replikasyon çatalının ilerlemesinin durdurulmasını gerektirir. Sonlandırma, iki bileşen arasındaki etkileşimi içerir: DNA'daki belirli bir 'terminatör bölge dizisi' ve DNA replikasyonunu fiziksel olarak durdurmak için bu diziye bağlanan bir protein. Çeşitli bakteri türlerinde, bu proteine DNA replikasyonu terminasyon bölgesine bağlanan protein veya Ter proteini adı verilir.

Bakterilerin dairesel kromozomları olduğundan, orijinden başlayan iki replikasyon çatalının kromozomun bir noktasında karşılaşmasıyla replikasyon sonlandırılır.

4.6.5 Plazmidler

Organizmalar, DNA'yı birincil kromozomal DNA dışındaki başka formlarda da taşırlar. Bir plazmid, organizmanın toplam genomunun bir parçası olduğu düşünülse de, ayrı ve bir hücrede kromozomal DNA'dan bağımsız olarak çoğaltılabilen küçük bir DNA molekülüdür (Şekil 4.15). Çoğu zaman bakterilerde küçük dairesel, çift sarmallı DNA molekülleri olarak bulunurlar, ancak arke ve ökaryotik organizmalarda da tanımlanmışlardır. Organizmanın doğal ortamda hayatta kalmasına fayda sağlayabilecek genler taşırlar. Bu genlere, antibiyotik direnci (hastanelerde bakteriler arasında antibiyotik direncinin transferinde merkezi öneme sahip olan) ve ağır metallere direnç (organizmaların volkanik kaplıcalardan sanayi bölgelerine kadar çeşitli ağır metal içeren ortamlarda yaşamalarına izin veren) genleri örnek olarak verilebilir. Plazmidler ayrıca bakterilere, atmosferdeki azot gazını faydalı azot bileşiklerine dönüştürme veya besin maddeleri az olduğunda bir avantaj sağlayan bazı organik bileşikleri parçalama kabiliyeti sağlayabilir. Plazmidlerin büyüklüğü 1000 ila bir milyon baz arasında değişir ve tek bir hücredeki özdeş plazmidlerin sayısı, ortama ve türe bağlı olarak bir ila birkaç bin arasında değişebilir.



Şekil 4.15 Plazmidler bakterilerde yaygın olarak bulunur ve ayrıca endüstriyel açıdan önemli ürünler üretmeleri için genetik mühendisleri tarafından da mikroorganizmalara aktarılabilir. Bu plazmid, kopyalanmasına izin veren diziler olan bir replikasyon orijinine sahiptir. Önemli bir ilaç üreten bir DNA dizisi olabilen bir 'kodlama dizisi' içerir. 'Promotör', kodlama bölgesinin okunmasına izin veren bir DNA dizisidir. Transkripsiyon sonlandırma dizisi, genetik mekanizmaya transkripsiyonun ne zaman durdurulacağını söyler. Ayrıca, sadece ilaç üreten bakterilerin ürediğinden emin olmak istiyorlarsa, plazmidi başarıyla taşıyan bakterilerin araştırmacılar tarafından seçilmesini sağlayan antibiyotik direnci için bir gen içerir. Bu diyagramda işaretlenen diğer yerler (örn. SpeI, KpnI), spesifik enzimlerin (restriksiyon enzimleri) DNA'yı keseceği ve araştırmacının DNA parçalarını eklemesine veya çıkarmasına izin verdiği yerlerdir.

Yapay plazmidler, araştırmacının belirli bir organizmaya dâhil etmek ve bu organizma içinde anlatımını yaptırmak istediği yabancı genlerin 'taşıyıcıları' olarak görev yaptıkları moleküler klonlamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle genetik mühendisliğinin en önemli araçlarından biridir.

Plazmidlere bazen uygun bir konakçı içinde bağımsız olarak çoğalabilen replikonlar da denir. Bununla birlikte, virüsler gibi plazmidler bir yaşam biçimi olarak kabul edilmez. Bu görüşe katılıp katılmadığınızı ve nedenini düşünmek isteyebilirsiniz.

Tartışma Noktası: Bir hücrenin minimum boyutu nedir?

Bir hücrenin minimum boyutu önemli bir ölçüdür, çünkü bilinmeyen bir fosilin veya canlı hücrenin kendi kendini kopyalayan bir canlı organizma olup olmadığını sorgulayacağımız boyutu tanımlar. Bir hücrenin büyümesi ve çoğalması için, bölünme için gerekli proteinleri üretmek adına en az seviyede mekanizmaya ve enerji toplamak ve genetik bilgileri çoğaltma gibi temel işlevleri yerine getirmek için diğer moleküllere ve proteinlere sahip olması gerekir. Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Araştırma Kon-

seyi'nin 'Çok Küçük Mikroorganizmaların Boyut Sınırları' hakkındaki raporunda yer alan şu ifadeyi düşünün: 'Serbest yaşayan organizmalar, sentezleri için gerekli genler ve ribozomlarla birlikte en az 250 ila 450 protein gerektirir. Bu minimal moleküler içeriği tutabilen bir küre, sınırlayıcı zarı da dâhil olmak üzere 250 ila 300 nm çapında olacaktır. Bu tahminde var olan belirsizlikler göz önüne alındığında, panel 250 ± 50 nm'nin bildiğimiz kadanyla yaşam için makul bir alt boyut sınırı oluşturduğunu kabul etti.' Bu ifadeyi ve yaşam için gerekli olan minimum protein sayısının değerlendirilmesini kabul edip etmediğinizi tartışın. Bir hücrenin minimum büyüklüğü, bu sayıda proteinin on katına veya bu sayının 50 katına ihtiyaç duyuyorsa ne kadar farklı olurdu?

Size Limits of Very Small Microorganisms: Proceedings of a Workshop, 1999. National Academies Press, Washington, DC (http://www.nap.edu/books/0309066344/html/).

4.6.6 eDNA

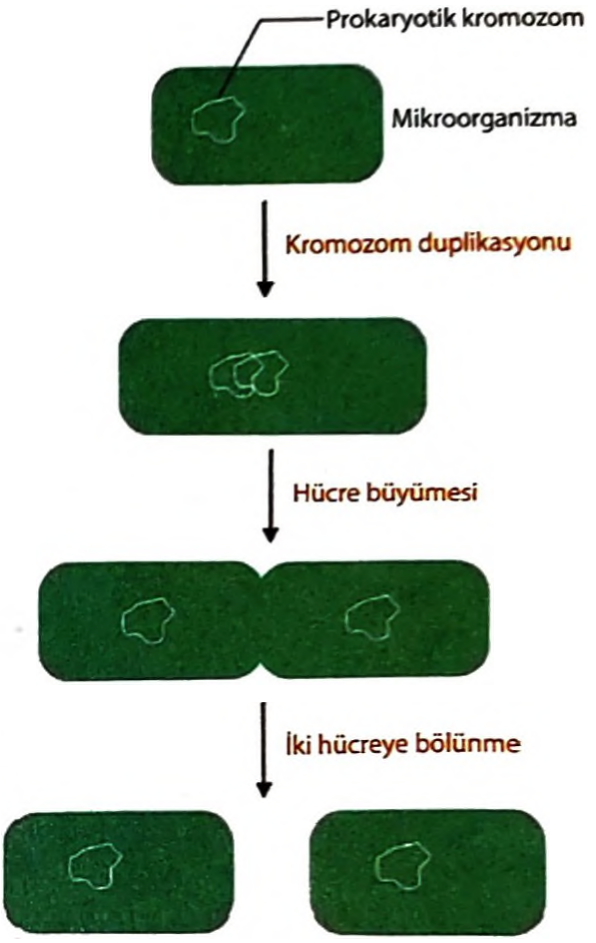
DNA'nın daha esrarengiz oluşumlarından biri, hücrenin dışında bulunan ekstraselüler DNA'dır (eDNA). Bunun, bir zamanlar ölü hücrelerden serbest bırakılan DNA olduğu düşünülürse, artık bakterilerde biyofilm oluşumu da dâhil olmak üzere çeşitli süreçlerde rol aldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, transformasyon sürecinde diğer organizmalar tarafından kendi bünyelerine katabildikleri zengin bir genetik bilgi kaynağı sağlayabilir, böylece çıplak DNA alınır ve organizmaların genomuna dâhil edilir. Bu, kitabın ilerleyen bölümlerinde daha ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

4.7 Hücre Çoğalması

Hücresel organizmalarda (prokaryotlar ve çoğu ökaryotik hücre bölünmesinde) hücreler mitozla bölünür (prokaryotlarda ikili fisyon olarak adlandırılır; Şekil 4.16). Mitoz sırasında DNA, ana hücreyle tam olarak aynı genetik içeriğe sahip iki hücre üreterek çoğaltılır. Tüm prokaryotlar bu şekilde bölünür. Prokaryotlarda, hücre bölünme hızı, yeni bir DNA replikasyon döngüsünün bir öncekinin tamamlanmasından önce başlayabileceği kadar yüksek olabilir. Mitoz, çok hücreli ökaryotlarda saç ve deri hücreleri gibi hücreleri çoğaltmak için kullanılır.

Hayvanlar, bitkiler ve mantarlar dâhil olmak üzere birçok ökaryotta mayoz olarak adlandırılan ek bir bölünme çeşidi bulunur (Şekil 4.17). Mayoz, basitçe söylemek gerekirse, yeni bireyler yapmak için bir araya gelebilecek üreme hücrelerini oluşturma sürecidir: bu cinsel üremeyi tanımlar. O zaman mayoz bölünmenin temel sürecinin, annenin ve babanın üreme hücreleri bir araya geldiğinde tam bir genetik içeriğe sahip hücreler meydana getirmesi için genetik içeriğin yarısına sahip hücreler üretmek olması mantıklı görünüyor. Bu genetik replikasyon türü, mitoza kıyasla, öncelikle DNA replikasyonu sırasında ortaya çıkan hatalara veya diğer taraftan bir hücre iki özdeş hücreye bölünürken yeni genetik elementlerin katılmasına bağlı olan çeşitliliği ortaya çıkarmak için gereklidir.

Üremenin neden evrimleştiğini tam olarak bilmiyoruz, ancak genleri karıştırarak çeşitlilik meydana getirilmesi ve böylece nesilden nesile potansiyel çeşitlilik sayısının büyük ölçüde artırılması, bazı evrimsel avantajlar sağlayabilir.

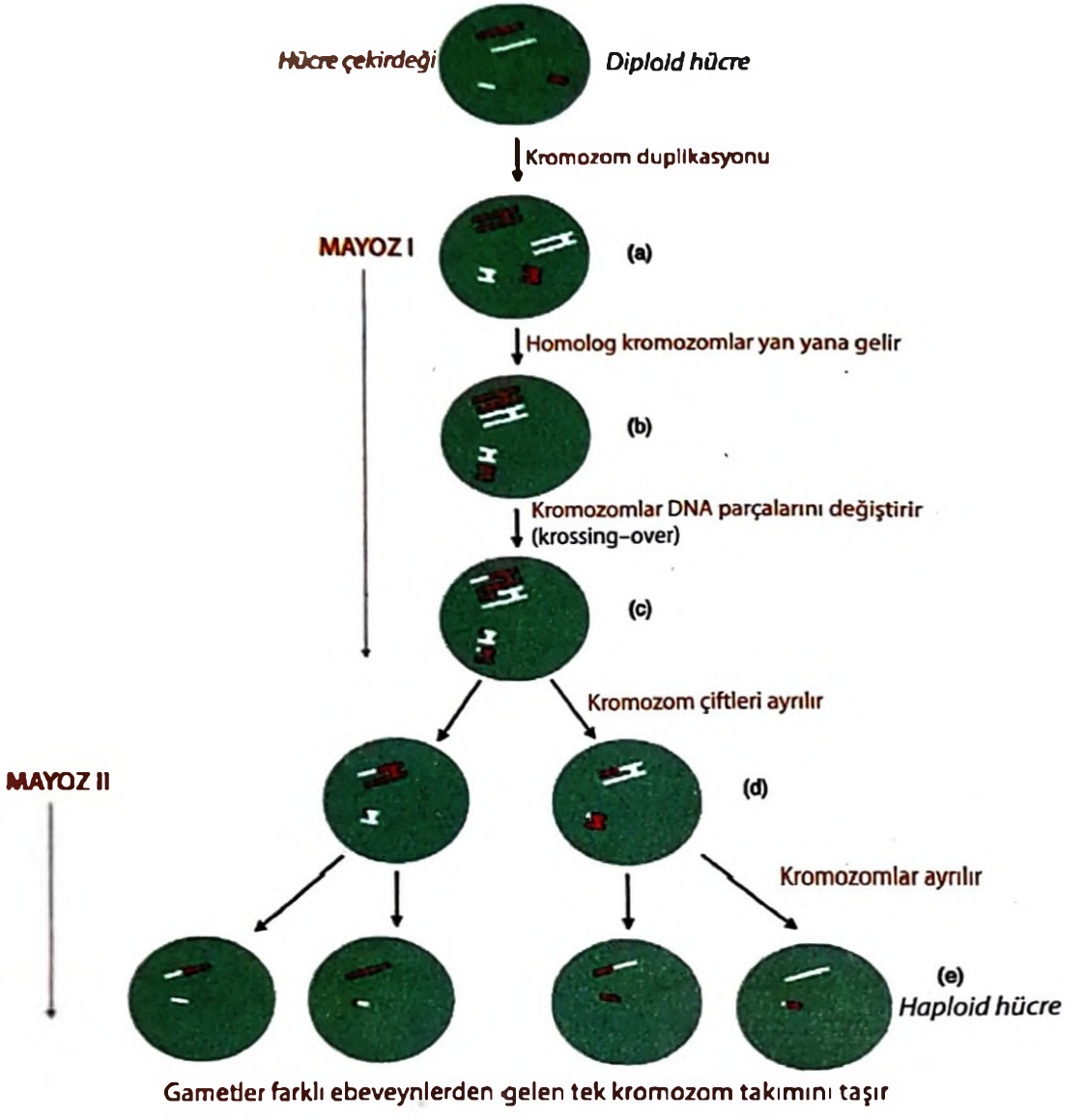


Şekil 4.16 Mitoz bölünme veya ikili fisyon süreci (Kaynak: Charles Cockell).

Mayoz, bu süreci yaşayan tipik hayvan hücreleri üzerinden açıklanabilir (Şekil 4.17). Hayvan hücreleri iki takım **kromozom** içerir. Bunlara **diploid** hücreler denir. Bir takım anneden, bir takım babadan gelir. İlk aşamada, bu kromozom takımları bir diploid hücrede çoğaltılır (Şekil 4.17a). Bu süreç mitoz veya mayozdan önce gerçekleşir. Mitozda bu kromozomlar yavru hücrelere ayrılarak, ana hücreye özdeş hücreler oluşturur. Bununla birlikte, mayozdaki kromozomlar iki katına çıkarken, hücre mayoz I adı verilen aşamaya girer. Bir sonraki adımda, iki katına çıkan kromozom takımları sıralanır (Şekil 4.17b) ve daha sonra genetik bilgi alışverişinde bulunarak (Şekil 4.17c) artık birbiriyle özdeş olmayan kromozomlar üretirler. Bu olay mayoz bölünmeye özgüdür ve **krossing-over** denir. Krossing-over sayesinde, kromozomların parçaları karıştırılarak varyasyonlar üretilir. Bu kromozomlar şimdi iki yeni hücreye ayrılabilir (Şekil 4.17d). Mayoz bölünmenin bir sonraki aşaması olan mayoz II'de, bu hücreler yine mitoza özdeş bir şekilde bölünerek dört hücre üretir (Şekil 4.17e). Bunlar üreme hücreleri. Bu sperm veya yumurta hücreleri (gametler) genetik içeriğin yarısını içerir ve **haploid** hücreler olarak adlandırılır. Bu haploid hücreler, anneden ve babadan gelen kromozomların yetişkin diploid hücreleri oluşturmak için bir araya geldiği cinsel üremeyle birleşebilirler.

4.8 Canlıların Büyümesi

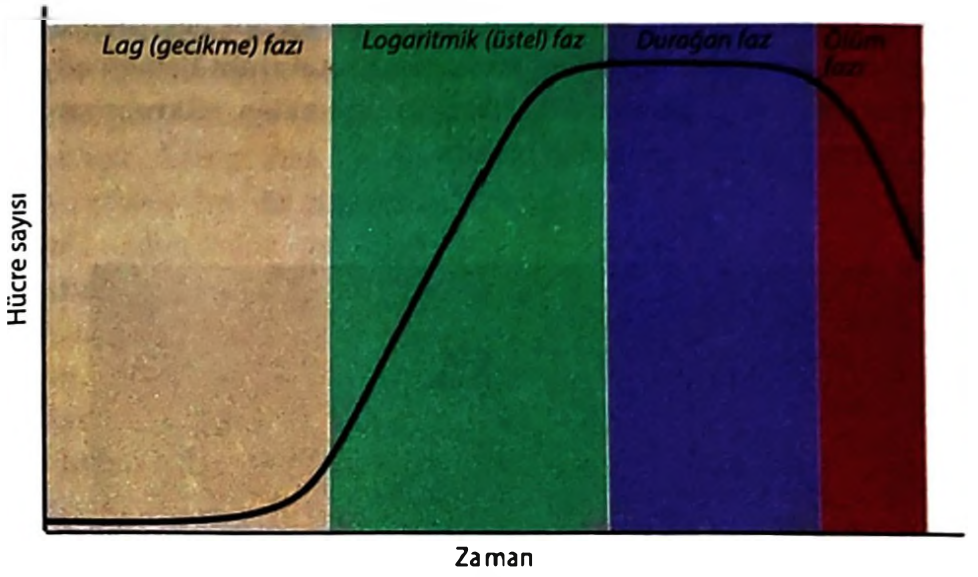
Az önce incelediğimiz çoğalma şekilleri, hücre popülasyonlarının büyümesin sağlar. Çok hücreli ökaryotlarda bu işlem, *hücre* farklılaşmasına yol açan bir genler ağı tarafından kontrol edilir, böylece başlangıçta özelleşmemiş hücreler, deri hücreleri, karaciğer hücreleri, kalp hücreleri gibi belirli hücre tiplerine



Şekil 4.17 Mayoz bölünme süreci (Kaynak: Charles Cockell).

dönüşerek, tam bir organizmayı oluşturur. Bu hücreler, hücre farklılaşmasını ve gelişmesini etkileyen hormonlar üreten genlerin kontrolü altındadır. Bu yollar hücre gelişim biyolojisiyle ilgilenen bütün bir bilim alanını kapsar. Burada bu alana girmeyeceğiz, ancak daha fazlasını öğrenmeniz teşvik ediliyor. Hücre gelişim biyolojisi, bitki ve hayvanların kökeni, evrimi ve özellikle hücre farklılaşmasının evrimi hakkında birçok bilgi sağlar.

Belki de en iyi tanımlanmış büyüme modelleri prokaryotik hücrelerde bulunur (Şekil 4.18). Cıvık mantarlar gibi bazı mantarların ilkel farklılaşma sergilemesine ve hatta siyanobakterilerin atmosferdeki azot gazını biyolojik kullanıma uygun azot bileşiklerine dönüştürmek için özelleşmiş olan heterosistler gibi özel hücre yapılarına sahip olmasına rağmen prokaryotlar genelde farklılaşmazlar.



Şekil 4.18 Bir prokaryot popülasyonunda büyümenin ana aşamaları (Kaynak: Charles Cockell).

Büyüme modeli, neredeyse evrensel olan iyi tanımlanmış bir dizi aşamayı takip eder. İlk aşamada, lag (gecikme) fazı, hücreler yavaş büyür. Bu, hücrelerin yeni mevcut enerji ve besinler varlığında çoğalmaya başladığı fazı temsil eder. Bu aşamayı takiben, hücreler yeni ortama adapte olup, büyüme hızlandığında logaritmik faza veya üstel faza girerler. Organizmalar her zaman tam bir matematiksel logaritmik fonksiyona göre büyümezler. Gerçek büyüme oranı mevcut enerjiye bağlı olacaktır. Bir sonraki aşamada, hücreler bazı temel besin veya enerji kaynaklarını tüketir ve **durağan faza** girerler. Durağan fazdan sonra, hücreler **ölüm fazına** girdikçe ölmeye başlayacaktır.

4.9 Hareket ve İletişim

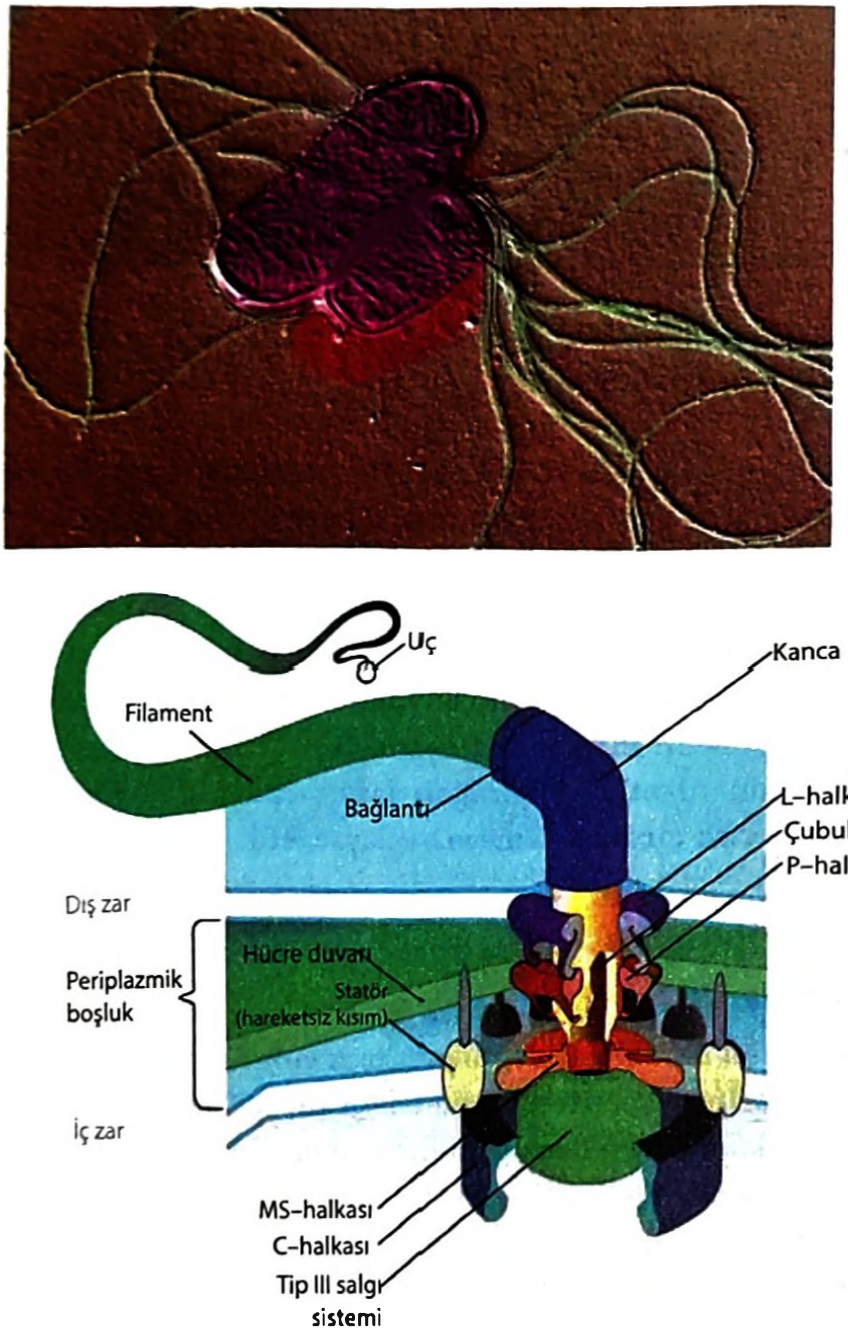
4.9.1 Prokaryotlarda Hareket

Hücreler her zaman hareketsiz değiller. Birçok mikroorganizma için hareket etmek önemli. Yerlerini değiştirerek yeni enerji kaynaklarına, besin maddelerine erişebilir veya toksinlerden uzaklaşabilirler (**kemotaksi**).

Mikroplarda hareket genellikle, enerji molekülü **adenosin trifosfat**, ATP tarafından çalıştırılarak dönen, dikkat çekici ve zarif bir hücre yapısı olan bir **flagellum** (çoğul flagella) (Şekil 4.19) aracılığıyla sağlanır. Mikropların sudaki yüzme hızları 2 ila 200 μm s^{-1} olarak bildirilmiştir. Flagella tipik olarak yaklaşık 15–20 μm uzunluğundadır.

Bir flagellum saniyede 200 döndürülebilir. Flagellumun ana 'kamçısı', çapı 20 nm (nanometre) olan ve kanca adı verilen özel bir yapı tarafından dönen bir mekanizmaya tutturulmuş içi boş bir silindirik yapıdan oluşur. Flagellumu döndüren kimyasal motor, hücre zarında bulunur ve 20'den fazla farklı protein-

den oluşur. Flagellumu oluşturmak için, tabandan içi boş çekirdeğin içine doğru yeni proteinler geçirilir ve uçtaki bir kapak proteininin hemen altında bulunan filamentin sonuna eklenir. Flagellum muhtemelen mikroorganizmalarda gelişen en dikkat çekici yapılardan biridir.



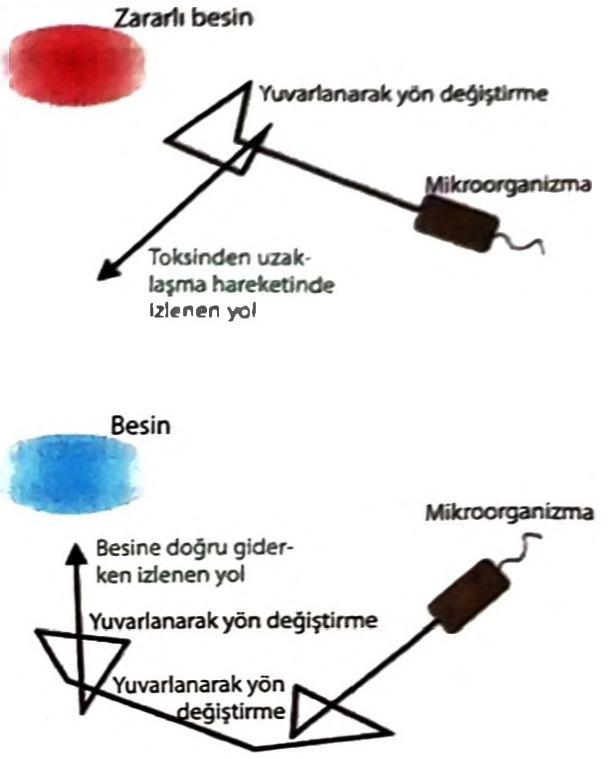
Şekil 4.19 Flagellanın gösterilmesi için boyanan mikrop, Salmonella. *Her bir organizma yaklaşık 1 μm uzunluğundadır* (Kaynak: Hastalık Kontrol Merkezleri). *Aşağıda Gram-negatif bir bakterideki bakteriyel flagellumun yapısı gösterilmektedir. Yapı, hücre zarlarına gömülü ve ATP tarafından çalıştırılan bir motordur. İsimleri belirtilen bir dizi protein alt biriminden oluşur* (Kaynak: wikikomon, kamu malı).

En basit halinde, mikrobun bir ucunda mikrobu ileri iten bir flagellum veya bir grup kamçı vardır. Yön değiştirmek için, kamçı kısa bir süre ters yönde döner, bu da mikrobun 'dönmesine' neden olur ve böylece gittiği yönü değiştirir (Şekil 4.20). Kamçının hareketi başlangıçtaki yöne döndüğünde mikrop yeni bir yönde hareket eder. Bu şekilde bir mikrop zararlı maddelerden kaçar veya besin maddelerine doğru hareket edebilir.

Tüm mikroplarda hücrenin sadece bir ucunda flagella yoktur; bazıları her iki uçta da gruplar halinde flagellaya sahiptir. Çevrede yaygın olarak bulunan ve kolera hastalığına neden olan organizmayı içeren Vibrionaceae ailesinin bazı üyelerinde, bir yüzeye tutturulmuş veya serbest halde yüzüyor olmalarına bağlı olarak, hücrenin bir ucunda veya mikropun dış yüzeyinde flagella olabilir. Bu farklı düzenlemelerin bazıları Şekil 4.21'de gösterilmektedir.

Her ne kadar hücrelerin dışındaki flagella, hareketi sağlamanın en yaygın yolu olsa da mikropların hareket edebilmesinin tek yolu bu değil. Spirochaetes grubuna dâhil olan bakteriler, hücre zarı ile hücre duvarı arasında çok sayıda kamçıya sahiptir. Mikroplar helikal şekilli olup bu iç kamçıları kullanılarak hareket edebilirler. Bununla birlikte, ileri doğru hareket edebilmek için, hücrenin her iki ucundaki flagella zıt yönlerde hareket etmelidir; eğer aynı yöne hareket ederlerse, eylemler birbirini iptal eder ve hücreler sabit kalır.

Pseudomonas aeruginosa toprakta, suda ve diğer nemli yerlerde bulu-



Şekil 4.20 Zararlı bir madde veya besinle karşılaşan olası bir mikroorganizmanın izlediği yol. Yuvarlanma, organizmanın yönünü rastgele hale getirmesine izin verir ve yön değiştirdikten sonra daha fazla zararlı madde veya besin tespit edip etmediğine bağlı olarak, konsantrasyon değişiminden uzaklaşana veya ona doğru ilerleyene kadar başka yuvarlanma olayları başlatabilir (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 4.21 Farklı flagella düzenlemelerini gösteren çizim: (a) tek bir flagellum (monotrichous), (b) hücrenin bir ucunda bir araya getirilmiş birçok flagella (lophotrichous), (c) her iki uçta bir veya daha fazla flagella (amfitrik), (d) flagella yüzeye rastgele dağılmış (peritrichous) (Kaynak: Charles Cockell).

nan yaygın ve iyi çalışılmış bir mikroptur. Bu tür, pili (tekil pilus) adı verilen flagelladan çok daha kısa yapılar kullanarak hareket eden mikroorganizma türüne örnektir. Flagelladan daha az etkili olan piluslar, hücre yüzeyinden uzatılabilir ve 'seğirmeyle' harekete sebep olurlar. Mikroskoptan bakıldığında, kısa refleksler organizmaların yavaş hareketi olarak görülebilir.

4.9.2 Prokaryotlarda İletişim

Çok hücreli ökaryotlar, ses çıkarmadan vücut hareketlerine kadar çok çeşitli yöntemlerle iletişim kurar. Diğer organizmalar tarafından dokunma, görme ve duyma yoluyla yorumlanırlar. Bununla birlikte, prokaryotlar da iletişim kurar. Quorum sensing* olarak bilinen bu iletişim türü, mikropların diğer mikropların kendilerine yakın olup olmadığını anlamalarını ve kimyasal süreçlerini buna göre düzenlemelerini sağlar.

Quorum sensing ilk olarak, ışık üretmekten sorumlu olan bazı balık ve kalamarların ışık üreten organlarında koloni oluşturan *Vibrio fischeri* mikrobunda keşfedildi. *V. fischeri* mikropları, aynı türün başka bir üyesiyle nadiren temas ettikleri normal deniz suyunda olduklarında herhangi bir ışık üretmezler. Bununla birlikte, kalamarın ışık üreten organının içi gibi yüksek bir konsantrasyona ulaştıkları bir ortamda, diğerlerinin varlığını algılarlar ve ışık üreten kimyasal reaksiyonlar tetiklenir. Mikroplar neden diğer mikropları algılar? *Quorum sensing*, mikroplara kaynaklar için ne kadar rekabetin olabileceğini anlama ve etkinliklerini buna göre düzenleme olanağı sağlar. Bazı açılardan bu bir tür iş birliği sağlamakla birlikte, her bir mikropun tek başına olup olmadığını algılamasına da yarar sağlar. Örneğin, kaynaklar için yoğun bir rekabet varsa, daha az enerji kullanmak ve daha aktif hale gelmek daha iyi olabilir. Örneğin, bireysel hücreler olarak yaşayabilen bir mikrop olan *Pseudomonas aeruginosa* belirli bir konsantrasyona ulaştığında, çevresel aşırılıklara karşı daha dirençli olmalarına ve hatta tıbbi ortamdaki konak bağışıklık sistemlerinin üstesinden gelmelerine izin verebilecek şekilde yapılandırılmış bir biyofilm oluştururlar. Quorum sensing'e, çok küçük amino asit zincirleri (peptidler) gibi organik moleküller aracılık eder. İlkel bir iletişim biçimine olanak sağlayan bu prokaryotik yetenek, hücreler ve karmaşık sosyal dinamikler arasındaki etkileşimlerin sadece çok hücreli ökaryotlarda korunmuş olmadığını, aynı zamanda bu yeteneğin prokaryotik popülasyonları da değiştirebileceğini ve şekillendirebileceğini göstermektedir.

4.10 Ökaryotik Hücreler

Ökaryotik hücreler, prokaryotik hücrelerden bir dizi önemli farklılığa sahiptir (Şekil 4.22). En dikkat çekici olanı, DNA'nın depolandığı ve içinde RNA'nın

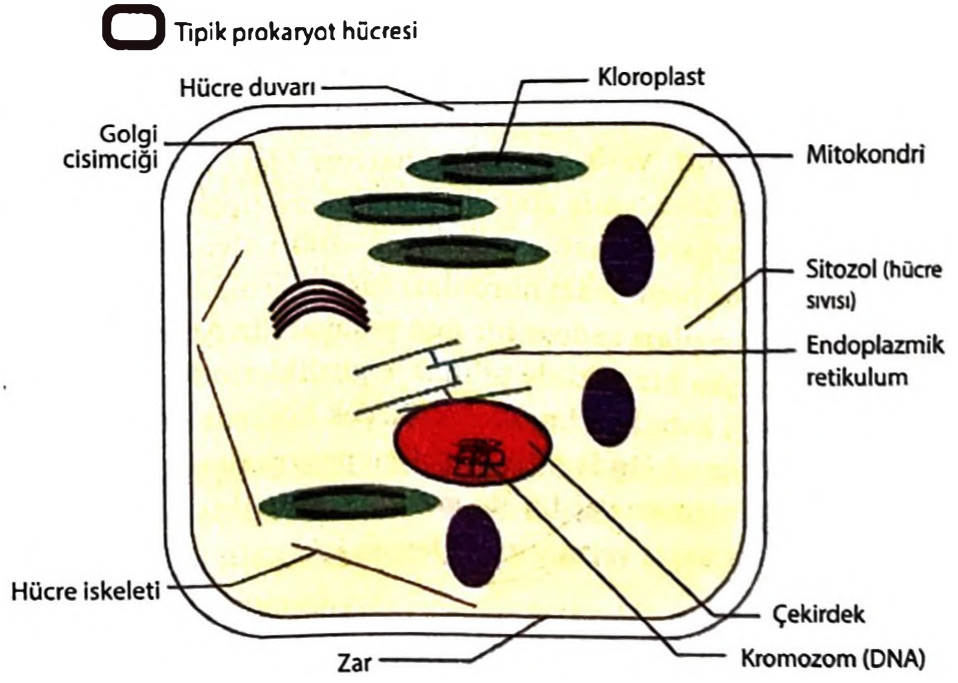
* Türkçeye "çoğunluk duyumu" olarak çevrilebilir -yn.

sitoplazmaya taşınmadan önce transkripsiyonun meydana geldiği bir hücre çekirdeğinin [nükleus] varlığıdır. Prokaryotik hücrede, nükleer materyal hücre sıvısı veya sitoplazmasında serbestçe yüzer ve genellikle nükleoid olarak adlandırılır.

Ökaryotik hücrede çekirdek, içerdiği materyalin içeri ve dışarı hareketine izin veren porlar içeren bir zarla çevrilidir. Ayrıca ökaryotik DNA ile prokaryotik DNA arasında önemli farklılıklar vardır. DNA, **intron** adı verilen dizileri içerir. Bunlar, çekirdekte sentezlendikten sonra mRNA'da sadece **ekzonları** (olgun mRNA'nın genleri amino aside çevirmek için kullanılacak kısımları) bırakmak üzere çıkarılır.

Belirli ökaryotik hücrelerde çeşitli başka uyarlamalar bulunur (Şekil 4.22). Örneğin bitkilerde, tekrarlı glukoz moleküllerinden oluşan bir polisakkarit olan selülozdan yapılmış bir hücre duvarı bulunur. Mantarlarda ise, glukozun bir türevi olan N–asetilglukozaminden yapılmış bir polisakarit olan kitin içeren bir hücre duvarı bulunur.

Birçok ökaryotik hücrede, tübülin (mikrotübüller) ve aktin (mikrofilamentler) proteinlerinin oluşturduğu tübül ve filamentler de dâhil olmak üzere çeşitli yapılardan meydana gelen bir hücre iskeleti vardır, bu da hücreye sert bir yapı sağlar ve doku oluşumunda veya besin maddelerine ve kaynaklara doğru hareket etmede hücrenin şekil değiştirmesine olanak sağlar. Hücre iskeleti, hücre bölünmesinde özellikle önemli bir rol oynar ve kromozomların ayrılması sırasında bir iskele yapısı sağlar. Ayrıca hücre bileşenlerini hücre içinde hareket



Şekil 4.22 Bazı bileşenlere sahip tipik bir ökaryotik bitki hücresi. Tipik bir prokaryotik hücrenin boyutu karşılaştırma amaçlı gösterilmiştir (Kaynak: Charles Cockell).

ettirmek için bir ağ olarak da kullanılır. Bileşenler, kinezin gibi moleküllere bağlı bir demiryolu hattı gibi mikrotübüller boyunca hareket eder. Bu, ATP gerektiren bir işlemdir.

Keratinler, sert lifli proteinlerden oluşan başka bir filament türüdür. Bunlar cilt hücrelerinde salgılanır ve cildin sert dış katmanının oluşumundan sorumludur. Keratinler hücre dışında salgılandığında, saç ve tırnaklarları oluşturur.

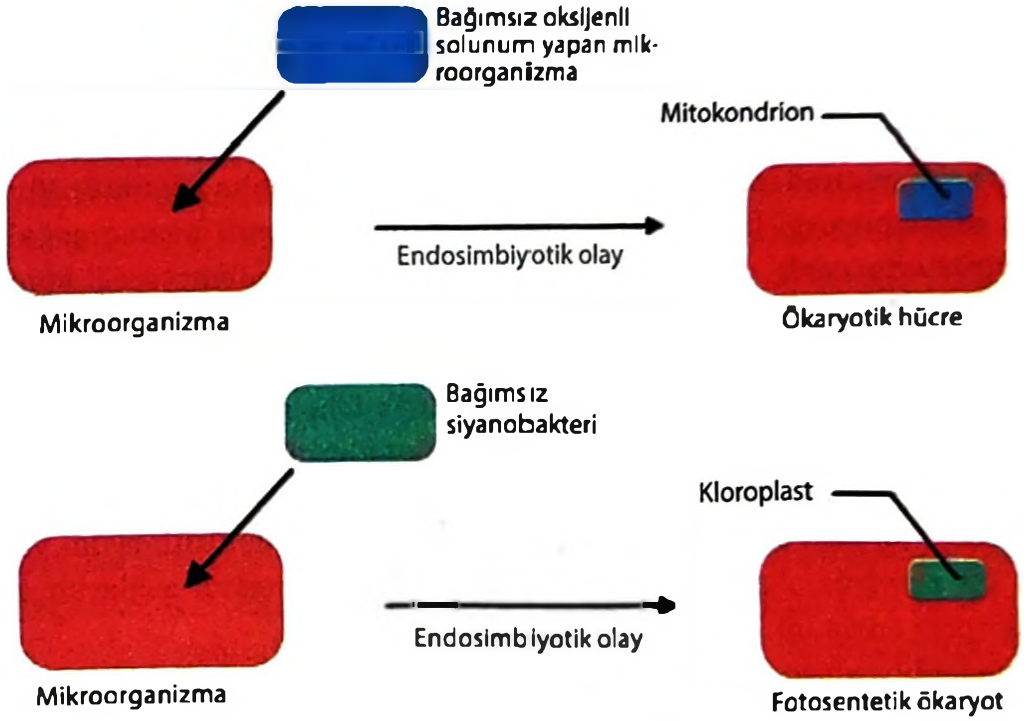
Hücre iskeleti, tamamen ökaryotlara özgü olmayabilir. Prokaryotların, bazı bakteri hücrelerine şekil veren bir halka yapısı oluşturduğu düşünülen, kresentin gibi proteinlerden oluşan basit hücre iskeleti yapılarına sahip olduğu gösterilmiştir.

Ökaryotik hücreler, farklı görevler üstlenen birtakım organeller içerebilir. Örneğin bitki hücreleri, Bölüm 5'te daha fazlasını keşfedeceğimiz, fotosentetik reaksiyonların gerçekleştiği kloroplastlar içerir. Ökaryotik hücreler, iki türe ayrılan endoplazmik retikuluma sahiptir. 'Granüllü' endoplazmik retikulum, protein sentezi; 'granülsüz' endoplazmik retikulum, lipit sentezi bölgesidir. Golgi cisimciği (veya Golgi aygıtı) endoplazmik retikulumdan gelen, özellikle hücrelerden atılacak proteinlerin paketlenmesinde rol oynar. Çoğu ökaryotik hücrede bulunan mitokondri (tekil mitokondrion), ATP üreten organellerdir –aerobik solunum bölgesi, ancak hücre sinyalleşmesinde ve farklılaşmasında da rol oynarlar. Bitkiler kloroplastlarda enerjiyi hapsetse de hücre için bir enerji kaynağı olarak fotosentezde ürettikleri glukozu parçalamak için hala mitokondri kullanırlar. Hayvan hücrelerinde, hücrenin içine aldığı molekülleri bir besin kaynağı olarak parçalamasına izin veren enzimler içeren organeller olan lizozomlar bulunur. Salgı kesecikleri hormonların ve diğer kimyasal habercilerin salgılanmasında rol oynar.

Bileşen parçalarının bolluğuyla mümkün kılınan hücresel yapıların çeşitliliği, çok çeşitli hücre tiplerine izin verir. Örneğin insan vücudu, elektrik sinyallerini iletmek (nöronlar) veya harici bir bariyer (deri hücreleri) sağlamak gibi çeşitli işlevler için özelleşmiş 200'den fazla hücre tipine sahiptir. Bu hücrelerle birlikte insan organizmasını oluşturan ~100 trilyon hücre vardır. Bu hücrelerin bazıları ömür boyu (bazı nöronlar) yaşamlarına devam ederken, beyaz kan hücreleri gibi bazıları sadece bir gün yaşayabilir. Artık, hücreler hasar gördüklerinde veya başka bir şekilde tehlikeye girdiklerinde hücre ölümünün ratgele gerçekleşmediği kabul edilmektedir. Birçok hücrede, hücre hasarı veya hücreler artık gerekli olmadığında tetiklenebilen programlanmış bir hücre ölümü veya apoptoz mekanizması vardır. Bu mekanizma muhtemelen işe yaramaz hücrelerin organizmaya zarar vermesini önlemek için gelişti.

4.10.1 Endosimbiyoz

Bu organeller nereden geldi? Bazılarının ilk başta bağımsız hücreler olması fikrinden uzun zamandır şüpheleniliyordu. Örneğin mitokondri DNA'larının dairesel yapısı ve genetik kodun içeriği, bunların bir zamanlar ökaryotlar tara-



Şekil 4.23 Başlangıçta bağımsız prokaryotik hücreler olan kloroplast ve mitokondrilerin elde edildiği endosimyoz kavramının şematik bir gösterimi (Kaynak: Charles Cockell).

fından hücre içine alınan ve sonunda konak hücreye bağımlı hale gelen bakteriler olduklarını gösterdi (Şekil 4.23). Biyolog Lynn Margulis (1938–2011) tarafından desteklenen bu endosimbiyoz sürecinin, bitkiler ve algler gibi ökaryotik fotosentetik organizmalar tarafından kloroplastların hücre içine alınmasını da açıkladığı düşünülmektedir. Kloroplastlar bir zamanlar bağımsız fotosentetik siyanobakterilerdi.

Endosimyoza, ökaryotik çekirdeğin ortaya çıkışını açıklamak için bile başvurulmuştur. Başka bir açıklama, çekirdeğin, orijinal ökaryotik zarın ayrı bir yapı (ekzomembran hipotezi) oluşturmak üzere ayrılan bir parçası olduğudur. Ökaryotik çekirdeğin kökenleri hücre biyolojisinde ilgi çekici bir sorun olmaya devam etmektedir.

4.11 Virüsler

Virüsler hücresel yapılar değil, fakat özellikle virüslerin bakteri ve arkeleri (ve ayrıca insanlar gibi ökaryotları da) enfekte ettiği bilinir ve volkanik kaplıcalar ve kutup gölleri gibi uçlardaki enfeksiyöz ajanlar olarak bilindiği için bütünlük açısından bunları tartışmalıyız.

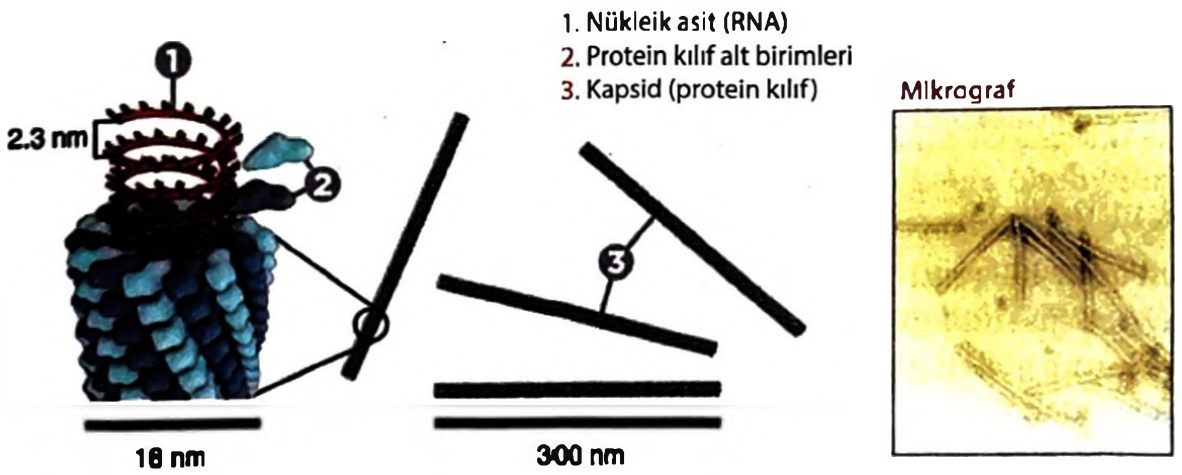
Virüsler, helikal yapıdan silindir yapılara kadar çeşitli şekil ve biçimlere sahip mikroskobik bulaşıcı parçacıklardır. Kapsid olarak adlandırılan bir protein kılıfla çevrili tek veya çift sarmallı DNA veya RNA'dan oluşurlar. Bazıları, lipidden yapılmış ve genellikle içinde glikoproteinler olan, zarf adı verilen bir

yapıyla çevrilidir. Zarf, konak hücreye erişimi kolaylaştırmada rol oynar. Virüsler bir anlamda hücresel yapılar olmamalarına rağmen, yine de yapılarında bölümlendirmeyi sergilerler. Tütün Mozaik Virüsü (TMV) örneğinde kapsid, RNA'yı çevreleyen uzun, ince bir tüp oluşturur (Şekil 4.24). Virüsler tipik olarak 20–350 nm boyutundadır, prokaryotik hücrelerden bile daha küçüktür. Virüsler, içinde çoğalabileceği bir hücreye gereksinim duyar. Kendi başına çoğalamamak, virüslerin 'canlı' olarak değerlendirilip değerlendirilemeyeceği konusunda tartışmalara neden oldu.

Virüslerin genetik materyalindeki farklılıklar önemlidir. RNA virüsleri, RNA'yı proteinlere kopyalamak ve dönüştürmek için gereken enzimleri taşır, bu da ökaryotların sitoplazmasında yaşam döngülerini genellikle tamamlayabilecekleri anlamına gelir. Retrovirüsler (İnsan İmmün Yetmezlik Virüsü, HIV veya AIDS) gibi bazı RNA virüsleri, RNA'nın DNA'ya dönüştürülmesini ve daha sonra bir provirüs olarak konak genomuna dâhil edilmesini sağlayan, revers transkriptaz enzimini kodlar.

Virüsler biyosferde önemli işlemlere aracılık eder. Biyosferdeki karbon döngüsünde, parçalandıkları veya çoğaldıkları bakteri hücrelerinin parçalanmasına neden olarak, okyanuslarda karbonun dolaşımını sağlayarak son derece etkili bir rol oynamaktadırlar. Genetik bilginin bir hücreden diğerine aktarılmasına, hücrelerin içine girip çoğalarak aracılık edebilirler. Üreme kabiliyetini içeren klasik bir yaşam tanımına uymasalar da bunlar kesinlikle yeryüzündeki yaşamın önemli bir parçasıdır. Dünyada bakterilerin yaklaşık on katı kadar virüs parçacıkları vardır –genellikle bir litre deniz suyu başına yaklaşık 10 milyardır.

Virüslerin kökeni kesin değildir. Bu konuyla ilgili farklı hipotezler gündeme gelmiştir.Bu hipotezler virüslerin, çok sayıda gen kaybedip diğer hüc-



Şekil 4.24 Tütün Mozaik Virüsünün (TMV) yapısı, nükleik asidi ve protein kılıfı gösterir. Ayrıca virüsün bir mikrografı da gösterilmiştir (Kaynak: wikicommons'dan şematik, Thomas Splettstoesser).

relere bağımlı hale gelerek, diğer hücrelerle birlikte evrimleşen eski yozlaşmış hücreleri temsil ettikleri veya daha büyük organizmaların genlerinden evrimleşmiş oldukları düşüncelerini içerir. RNA virüsleri, bu yapıların ilk hücrelerin evriminden önceki RNA Dünyasından (Bölüm 10) geriye kalanlar olabilecekleri düşüncesini güçlendirdi. Bu hipotezlerin hiçbiri tüm virüslerin özelliklerini açıklamak için yeterli değildir ve hepsinin istisnaları vardır. Virüslerin çok eski olduğu ve birkaç kez farklı şekillerde evrimleşmiş olabileceği düşünülmektedir.

Virüslerdeki farklı nükleik asit ve hücresel olmayan yapıları, geleneksel bir Yaşam Ağacına (Bölüm 6) kolayca yerleştirilemeyecekleri, ancak hücresel yaşamdan ayrı kendi varlık gruplarını oluşturabilecekleri anlamına gelir. Bununla birlikte, ataları izlenebilmektedir ve çoğu eski soylara sahiptir. Herpes virüsleri, zarflı DNA virüsleri, en az 150 virüs içeren bir grup oluşturur ve alfa, beta ve gama alt aileleri olmak üzere üç gruba ayrılır. İnsanlarda su çiçeği, soğuk algınlığı ve genital herpes gibi çeşitli hastalıklardan sorumludurlar. Yaklaşık 400 milyon yıl önce Devoniyen'de geliştikleri ve karaya çıkan ilk hayvanlara bulaştıkları düşünülüyor. Kadim soyları, aynı zamanda tüm insan nüfusunu etkilediklerinden de kaynaklanmaktadır.

Belirgin bir virüs grubu, prokaryotları enfekte etmelerinden dolayı bu ismi alan viral partiküller olan bakteriyofajlar veya fajlardır. Bakteri ve virüslerin birlikte evrimi, karmaşık ve uzun süreli bir etkileşim olmuştur. Bakteriler, bakteriyofaj aracılığıyla bakteri hücresine giren virüs DNA'sını keserek enfeksiyonun başarılı olmasını önleyen enzimler olan restriksiyon endonükleazları üretirler. CRISPR dizileri, daha önce onları enfekte etmiş virüslerden gelen dizilere karşılık gelen bakteri genomu içindeki DNA şifreleridir. Bakteriler bu dizileri kullanarak, daha sonraki bir aşamada kendilerini enfekte eden benzer fajların nükleik asidini tahrip eden nükleazları ve RNA dizilerini sentezleyebilir. Bu bir tür kazanılmış bağışıklıktır.

Astrobiyologların virüslere ilgi duymasının bir nedeni, virüsler ve prokaryotik dünya arasındaki bu yakın ilişkiden kaynaklanmaktadır. Mevcut prokaryotlar arasındaki bilgi transferindeki (Yatay Gen Aktarımı; Bölüm 6) rolleri, Dünya üzerindeki yaşamı betimleyen evrimsel ağaçlar oluşturma ve belirli metabolik ve biyokimyasal yolakların kökenini çözme çabalarımızı karmaşıklaştırmaktadır. Bu karmaşıklıkların bir örneği, siyanobakterileri enfekte eden siyanofajlarla gösterilmiştir. Bu virüsler fotosentetik genleri aktarabilmektedir ve Dünyadaki siyanobakteri kaynaklı fotosentezin %10'unun siyanofajlar tarafından aktarılan genler aracılığıyla gerçekleştirildiği tahmin edilmektedir. Virüsler aracılı gen transferi aktivitesinin, organizmalar arasındaki evrimsel ilişkilere dair genetik bilgi temel alınarak yapılan çıkarımların doğruluğunu ne kadar etkilediğini anlamamız gerektiğini gösteren bu olguya benzer başka birçok örnek vardır.

4.12 Prionlar

Prionlardan bahsetmemek eksik olurdu. Bu yapılar hastalığa neden olan özelliklere sahip yanlış katlanmış proteinlerden meydana gelmiştir. Bunların en iyi bilinen özelliklerinden biri, beyin ve sinir dokusunu etkileyen, bulaşıcı birkaç spongiform ensefalopatiden biri olan Scrapie'den sorumlu ajandır. Prionlar, hücrelerdeki normal proteinleri sabit bir konfigürasyonda yanlış katlanmak üzere uyarabilir, bu da diğer proteinlerin yanlış katlanmasına neden olabilir, böylece yanlış katlanmış proteinlerin zincir reaksiyonunu oluşturur. Bu yanlış katlanmış proteinler, normalde hücrelerdeki hatalı proteinleri parçalayan enzimler olan proteazlara dirençli hale gelecek şekilde katlanır. Prokaryotlarda prionlara henüz rastlanmamış, fakat mantarlarda bildirilmişlerdir. Virüsler gibi, konakçı hücrelerde çoğalabilirler, ancak kendi başlarına çoğalamazlar. Bu durum onları yaşamın çoğu tanımının dışına koyabilir. Prionlar, 'yaşam' için hangi işlevsel tanımı kullandığımız konusundaki tartışmalarımızı ilerletmeye davet ediyorlar.

4.13 Sonuç

Hücresel düzeyde yaşam karmaşıktır. Bununla birlikte, hücre tiplerini tanımlayabiliriz ve hepsinin paylaştığı bazı özellikleri genel olarak tanıyabiliriz. Farklı organizmalarda farklı tipte zarlar olmasına rağmen, amfifilik lipidlerden oluşan hücre zarlarının temel biyokimyasal yapısı, tüm hücre yaşamında ortaktır. Prokaryotlarda Gram-pozitif ve Gram-negatif zarlar bakterilerde bulunan iki ana gruptur, arkeler zorlu ortamlarda varlık göstermelerini sağlayan olağandışı uyarlanımlar sergilemektedir. Benzer şekilde, DNA'dan RNA'ya, RNA'dan proteine kadar genetik kodun okunması Dünyadaki yaşam için ortaktır. Genetik kod, bilgilerin depolanmasındaki rolü için mükemmel bir şekilde gelişti, ancak kodlandığı amino asitlerde fazlalığı (genetik kodun yozlaşması) nasıl içerdiğini de gördük. Ökaryotik hücreler prokaryotik hücrelerden daha karmaşıktır, ancak bazı benzer temel yapıları sergilerler. Onları 'basit' olarak görmemize rağmen, prokaryotlar hareket ve quorum sensing gibi oldukça karmaşık davranışlar sergilerler. Dünyadaki yaşam çok çeşitli hücresel yapılar ve şekiller sergiler ve virüsler gibi hücresel olmayan yapılarla etkileşime girer. Şimdi, tüm bu hücresel yapıların faaliyet göstermek için enerjilerini nereden aldıklarını araştırmalıyız.

İleri Okumalar

Kitaplar

Allen, T., Cowling, G. (2011) *The Cell: A Very Short Introduction.* Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford.

Pross, A. (2014) *What is Life? How Chemistry Becomes Biology.* Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford.

Yayınlar

Bell, S.P., Dutta, A. (2002) DNA replication in eukaryotic cells. *Annual Reviews of Biochemistry* 71, 333–374.

Bray, D. (1995) Protein molecules as computational elements in living cells. *Nature* 376, 307–312.

Jacob, E.B., Becker, I., Shapira, Y., Levine, H. (2004) Bacterial linguistic communication and social intelligence. *Trends in Microbiology* 12, 366–372.

Koonin, E.V., Novozhilov, A.S. (2009) Origin and evolution of the genetic code: the universal enigma. *Life* 61, 99–111.

Kovacs, G.G., Budka, H. (2008) Prion diseases: from protein to cell pathology. *American Journal of Pathology* 172, 555–565.

Lurland, C.G., Collins, L.J., Penny, D. (2006) Genomics and the irreducible nature of eukaryotic cells. *Science* 312, 1011–1014.

Le Romancer, M., Gaillard, M., Geslia, C., Prieur, D. (2007) Viruses in extreme environments. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 6, 17–31.

Lombard, J., López-Garciá, P., Moreira, D. (2012) The early evolution of lipid membranes and the three domains of life. *Nature Reviews Microbiology* 10, 507–515.

Martin, W., Roettger, M., Kloesges, T., Thiergart, T., Woehle, C., Gould, S., Dagan, T., Rogers, K.L., Amend, J.P., Gurrieri, S. (2012) Modern endosymbiotic theory: getting lateral gene transfer into the equation. *Journal of Endocytobiosis and Cell Research* 23, 1–5.

Satkudo, A., Ano, Y., Onodera, T., Nitta, K., Shintani, H., Ikuta, K., Tanaka, Y. (2011) Fundamentals of prions and their inactivation. *International Journal of Molecular Medicine* 27, 483–489.

Young, K.D. (2006) The selective value of bacterial shape. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 70, 660–703.

5

YAŞAM İÇİN ENERJİ

Öğrenme Çıktıları

- Organizmalardaki farklı enerji kazanım biçimlerini anlamak.
- Enerji elde etmenin kemo– ve fototrof türleri arasındaki farkları tanımlamak.
- Kemiosmoz, elektron taşıma ve enerji kazanımının bazı biyokimyasal yollarını anlamak.
- Proton hareket kuvvetini hesaplayabilmek.
- Enerji elde etmede ATP'nin temel rolünü anlamak.
- Biyojeokimyasal döngülerde farklı enerji kazanım biçimlerinin önemini tanımlamak.
- Mikrobiyal bir tabakanın yapısını ve nasıl oluştuğunu anlamak.
- Bilinen redoks reaksiyonlarını kullanarak farklı mikrobiyal metabolizmalar için mevcut Gibbs serbest enerjisini hesaplayabilmek.

5.1 Enerji ve Astrobiyoloji

Yaşam enerji gerektirir. Hücrelerin meydana geldiği tüm molekülleri büyütmek, çoğaltmak, onarmak ve sentezlemek gibi işler yapması gerekir. Gerçekten de bir enerji kaynağı varlığının, bir ortamın yaşanabilir olması için önemli bileşenlerden biri olduğu bilinmektedir (bir sıvı su kaynağı, CHNOPS elementleri ve belirli organizmalara özgü çeşitli diğer elementler ve bileşiklerle birlikte). Dolayısıyla, yaşamın Dünyada 3,5 milyar yılı aşkın bir süredir nasıl devam ettiğini ve eğer varsa, başka bir yerde nasıl var olabileceğini anlamak istiyorsak, kullanabileceği enerji kaynakları hakkında bir şeyler bilmemiz gerekir. Astrobiyolojinin bu kısmı, yaşamdaki çeşitli enerji kazanım süreçlerine biraz ayrıntılı bakacağımız için çok önemlidir.

Enerjinin davranışı termodinamik yasalarına tabidir. Enerji yaratılamaz veya yok edilemez. Bu Termodinamiğin Birinci Yasasıdır ve enerjinin korunumu kanununun bir formülasyonudur. Bununla birlikte, Albert Einstein'ın (1879–1955) ünlü $E = mc^2$ –burada E enerji, m kütle ve c ışığın hızıdır– eşitliğine göre enerji kütleye, aynı şekilde kütle de enerjiye dönüştürülebilir. Termo-

dinamiğin İkinci Yasası, izole edilmiş bir sistemin daha büyük termodinamik dengeye veya entropiye yöneleceğini belirtir. Sistemler ya kütlenin ya da enerjinin yayılmasıyla dengeye doğru yönelecektir. Soğuk suya eklenen bir bardak sıcak suyun, birleşik su ılık olana kadar enerjinin dağılmasına ve homojenleşmesine yol açması, bu duruma verilebilecek iyi bir örnek. Bazen entropi, düzensizliğin bir ölçüsü olarak adlandırılır. Konuşma diline göre bu kabul edilebilir, ancak entropi kavramındaki asıl önemli noktanın enerjinin homojenizasyonu olması bakımından her zaman doğru değildir. Örneğin dağınık düzensiz bir yatak odası, iyi durumda olan bir yatak odasından daha yüksek entropiye sahip olmayabilir, çünkü iki durumda enerji ve kütle eşit derecede homojen olmayabilir. İkinci Yasa, yaşamla ilgili bir dizi gözlemle tutarlıdır. Bir organizma, ilk ortaya çıktığında sadece çevreden enerji elde edemez ve daha sonra bu enerjiyi organizmada süresiz olarak dolaştıramaz. Reaksiyon yolakları asla %100 verimli olmaz ve her zaman bir miktar enerji, örneğin ısı olarak, kaybedilir. Dolayısıyla, yaşam sürekli olarak çevreden enerji elde etmelidir. Yaşam, bu düzeni enerjinin entropik homojenizasyon eğilimine karşı korumayı başarır çünkü dış ortamdan enerji aldığı için kapalı bir sistem değildir. Güneşten gelen ışığı enerji kaynağı olarak kullanan bitkiler özellikle önemli bir örnek.

5.2 Yaşam ve Enerji

Yaşamın etrafındaki evrenden nasıl enerji aldığı konusundaki tartışmamıza gelmek için, önce bazı tanımları netleştirmemiz gerek. Bu tanımlar sadece yaşamı sınıflandırmak için önemli değil, aynı zamanda biyoloji ile biyokimyanın ortak ilgi alanı olan, oldukça karmaşık bir tartışmaya da alt yapı sağlar.

Bir organizmanın enerjisini, karbonunu ve diğer hammaddelerini çevresinden elde ettiği süreci katabolizma olarak adlandırırız. Burada kullanılan 'diğer hammaddeler' terimi, farklı elementler (örneğin, bazı hayvanlarda kan için gerekli olan demir ve kemik için gerekli olan kalsiyum) ve küçük organik bileşikler olan vitaminler gibi çok çeşitli maddeleri içeren çok gevşek bir terimdir. Öğle yemeğini yediğinizde katabolizmaya girersiniz. Bu beslenme ürünlerinin yeni moleküller ve hücreler oluşturmak için kullanıldığı sürece anabolizma denir ve buna biyosentez de diyebiliriz. Bu işlemlerin her ikisini de genel bir terim olan metabolizmada bir araya getirebiliriz. Bu nedenle metabolizma, enerji ve diğer gerekli molekülleri veya elementleri elde etmek için molekülleri parçalama ve yeni moleküller oluşturma sürecidir. İnsanlar katabolizmayı ve/veya anabolizmayı tanımlamak için metabolizma kelimesini kullanma eğilimindedir ve bu, bundan sonra bizim de kullanacağımız kelimedir.

Metabolizmaları bazı temel ihtiyaçlara göre sınıflandırabiliriz. Metabolizma iki ana kriter temelinde gruplarına ayrılır:

1. **Enerji kaynağı.** Bakım (onarım gibi), büyüme, üreme ve diğer tüm hücresel işlevler için kullanılır.
2. **Karbon kaynağı.** Karbon, yaşamın ana omurga elementidir. Hayatın H, N, O, P ve S ve diğer organizmaya özgü çeşitli elementlere ihtiyacı olmasına rağmen, karbonun merkezi önemi, farklı metabolizmaları sınıflandırılmasında belirleyici gereksinimlerden biri olarak yerini aldığı anlamına gelir.

Önce enerji göz önüne alındığında, yaşamı geniş bir şekilde iki gruba ayırabiliriz. Bir grup, ışığı enerji kaynağı olarak kullanan fototroflardır. Daha doğrusu Güneşten gelen fotonları kullanırlar, ancak ilke olarak fototroflar herhangi bir yıldızdan gelenfotonları kullanabilirler. Diğer grup ise, bir süre sonra bahsedeceğimiz, enerjilerini diğer tüm kimyasal kaynaklardan alan kemotroflardır.

Ayrıca karbonlarını farklı kaynaklardan alan organizmaları geniş anlamda iki ana gruba ayırabiliriz. Ototroflar karbonlarını karbondioksitten (veya CO_2 suda çözülürse bikarbonat iyonundan, HCO_3^-) alırlar. Bu organizmalar özellikle önemlidir çünkü atmosferdeki karbonu heterotroflar da dâhil olmak üzere biyosferin geri kalanı tarafından kullanılabilen organik karbon bileşiklerine dönüştüren (bazen karbon 'fiksasyonu' denir) birincil üretici organizmalardır. Heterotroflar karbonlarını organik bileşiklerden alırlar. Heterotroflar sizi ve beni içerir. Burada bahsetmemiz gereken üçüncü bir grup daha var. Miksotroflar karbonlarını hem organik bileşiklerden hem de karbondioksitten alabilirler. Bu çok yönlü bir varoluş şeklidir çünkü karbon bileşikleri yetersiz kaldığında, atmosferideki CO_2'yi kullanmaya geçebilirler. Gölet alglerinin bazı çeşitleri miksotroftur.

Şimdi bu iki kavramı aşağıdaki gruplarda birleştirebiliriz:

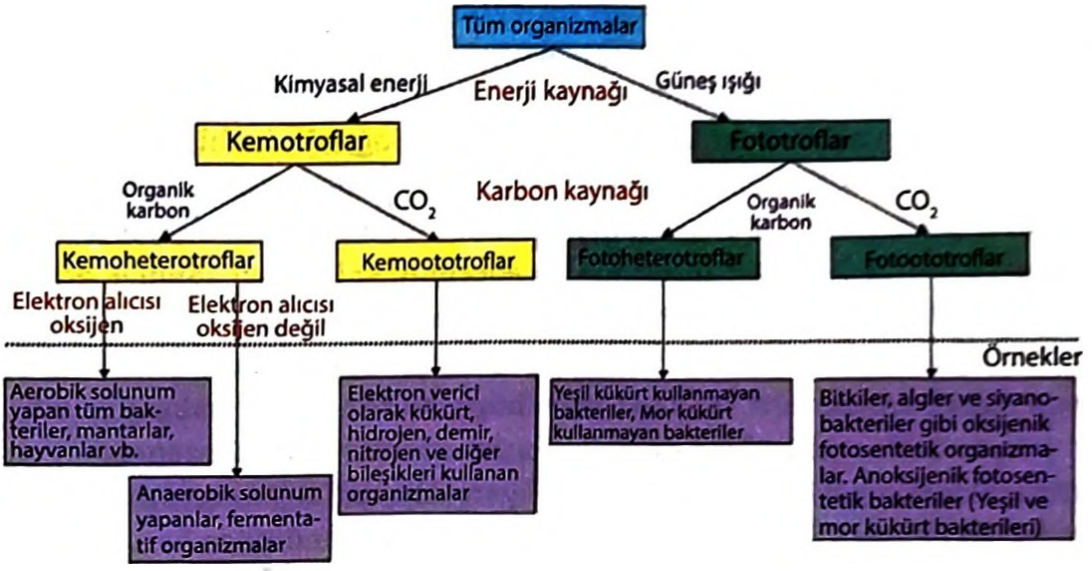
Fotoototroflar. Işıktan enerji ve karbondioksitten karbon elde eden.

Fotoheterotroflar. Işıktan enerji ve organik bileşiklerden karbon elde eden.

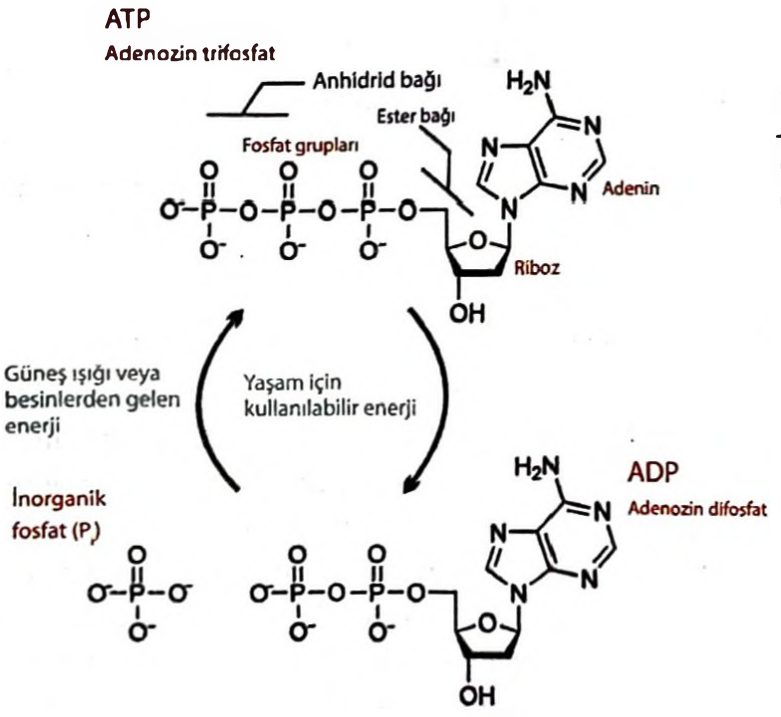
Kemootoroflar (bazen kemolitotroflar veya kemolitootototroflar olarak da adlandırılır). Kimyasal billeşiklerden enerji ve kardondioksitten karbon elde eden.

Kemoheterotroflar (bazen kemoorganotroflar olarak da adlandırılır). Kimyasal bileşiklerden (öncelikle organik bileşikler) enerji ve organik bileşiklerden karbon elde eden.

Şekil 5.1'deki akış şeması, bu karmaşık ancak oldukça mantıklı isimler kümesini özetler. Şekil 5.1'de gösterilen örnekler bu bölümde ele alınacaktır.



Şekil 5.1 Yaşamdaki farklı metabolizmalar ve bunları kullanan bazı organizma grupları.



Şekil 5.2 Adenozin trifosfat (ATP), yapısı ve hücredeki döngüsü (Kaynak: Charles Cockell).

5.3 Adenozin Trifosfat'ın Merkezi Rolü

Yeryüzü yaşamında, hücre içindeki enerjiyi aktarmak için kullanılan temel molekül adenosin trifosfattır (ATP; Şekil 5.2). Lipidler gibi diğer moleküller de enerji depolamak için kullanılsa da ATP yaşam için evrensel olarak geçerli enerji birimidir. Metabolizmayı gerçekleştirmek için enerjinin gerekli olduğu yerlere kolayca taşınmasını sağlayan küçük bir moleküldür. ATP, üç fosfat grubuna bağlı bir riboz şekerine bağlı olan pürin molekülü adenin'den oluşur.

ATP genellikle suda kararsızdır. Bu kararsızlık, ihtiyaç duyulan yerlerde serbest enerjiyi hızlı bir şekilde açığa çıkarabilen bir molekül olması açısından idealdir. ATP'deki enerjinin çoğu, ester bağının (trifosfatın riboza bağlandığı bağ) enerjisinin yaklaşık iki katı olan son fosfat bağında (anhidrid bağı) bulunur. Tipik hücresel koşullar altında ATP molekülünde bulunan serbest enerji miktarı, tam kimyasal ve fiziksel ortama bağlı olarak 50 ila 65 kJ mol^{-1} arasında değişir. ATP hidrolizi sırasında bu enerjinin salınması sonucu, adenosin difosfat (ADP) oluşur ve inorganik fosfat (P_i) hücreye salınır.

ATP'yi oluşturmak için ADP'ye inorganik fosfat eklenmesi (Şekil 5.2) fosforilasyon olarak adlandırılır. Bu, hücre zarı boyunca konumlandırılmış ve bir çark gibi çalışan dikkat çekici bir protein alt birim aparatı olan ATP sentazla gerçekleştirilir. Sonraki bölümlerde bunun nasıl gerçekleştirildiği araştırılacaktır.

Ayrıca ATP'nin diğer işlevlerde kullanıldığını da kendimize hatırlatmalıyız. Örneğin, DNA'ya adenin bazı sağlayan bir nükleotid olan AMP'nin (adenozin monofosfat) öncülü olduğunu gördük. Bu çok yönlülük biyolojideki önemli rolünü ve muhtemelen çok eski kökenlerini yansıtır. Bununla birlikte, ATP'nin erken yaşta kullanılabilen ilk ve tek enerji molekülü olması şart değildir. İki fosfat grubu, enerji açısından zengin molekül pirofosfat üretmek için birbirleriyle bir anhidrit bağı oluşturabilir. Daha fazla fosfat grubu eklenmesi, polifosfatların oluşumuyla sonuçlanır. Hem pirofosfat hem de polifosfatlar mikroorganizmalarda bulunur, bu da fosfat içeren moleküllerin diğer permütasyonlarının da fosfat bağlarında enerji depolamanın yolları olduğunu gösterir.

5.4 Kemiosmoz ve Enerji Kazanımı

Moleküller yapmak, büyümek ve çoğalmak için hücreler enerji toplamalıdır. Her ne kadar kapsayıcı sistem çok karmaşık olsa da arkasındaki ilke oldukça basittir. Metabolizmaları ne olursa olsun tüm organizmalar sonuçta enerji üretmek için elektronların hareketine güvenir. Bu nasıl çalışıyor?

Çoğu organizma, önce bir elektron vericisi veya elektron vermek isteyen bir bileşik kullanarak enerji toplar. Elektron verici olarak işlev gören bir organik maddeden gelen elektronlar buna bir örnek olabilir. İnsanlarda bu, sizin ve benim yediğimiz organik karbon içeren besinler olabilir –bu besin aslında bir elektron kaynağıdır.

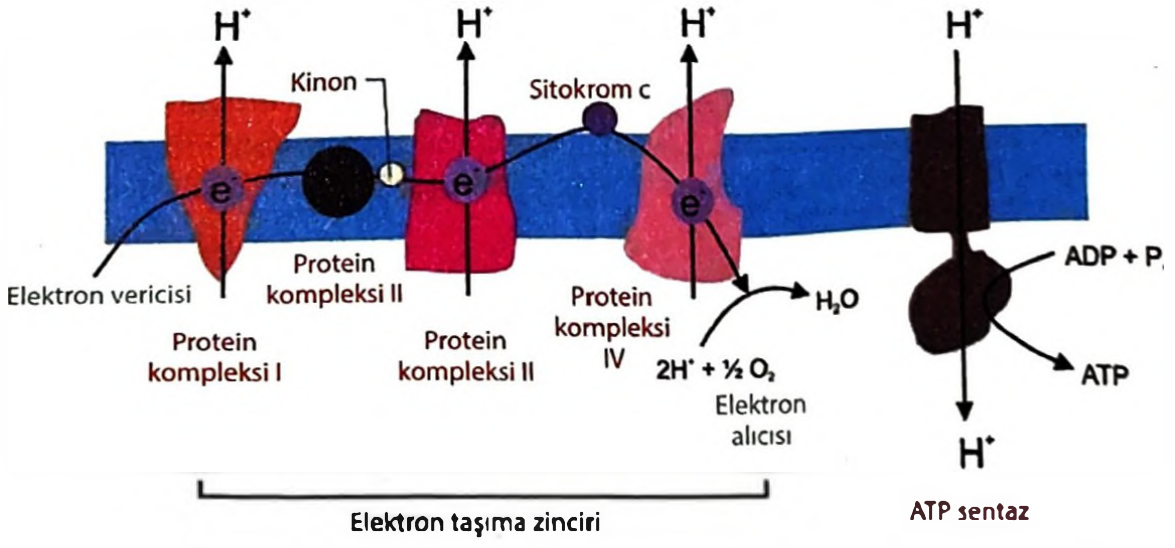
Hücre zarı boyunca elektronların hareket ettiği bir dizi sıralı protein vardır (mikrobiyal zarlarda ve ökaryotlarda mitokondri ve kloroplastların zarlarında meydana gelen bir süreç).

Sıralanan her bir molekülün kimyasal özellikleri (Şekil 5.3'te gösterilen), her birinin bir önceki moleküle kıyasla elektronlar için daha büyük bir çekime sahip olmaları eğilimindedir. Bu şekilde elektronlar, ardışık bir dizi reaksiyonla sıralanan moleküller boyunca taşınır. Buna elektron taşıma zinciri denir (Şekil 5.3). Bu moleküllerin doğası çeşitlidir ve hidrojenazlar, flavoproteinler ve de-

mir–kükürt proteinlerini içerir. Son moleküllerin çok ilkel oldukları düşünülür ve ferrodoksinler olarak bilinen Fe_2S_2 ve Fe_4S_4 kümelerine sahip proteinleri içerir. Daha sonra göreceğiz ki, bu demir–kükürt kümeleri, derin deniz hidrotermal menfezlerinde demir–kükürt mineral kökenli yaşamın kalıntıları olarak önerilmiştir. Diğer moleküller arasında, zar içinde kolayca yayılan, oldukça çözünür protein olmayan aromatik moleküller olan ubikinonlar bulunur. Sitokromlar, proteinlerin başka bir yaygın elektron taşıyıcı sınıfıdır. Demir içeren bir porfirin halkasına (siklik bir yapıya) sahiptirler. Halkadaki farklı yan gruplar bu moleküllerin, hepsi farklı elektron potansiyeline sahip ve bu nedenle de farklı elektron taşıma zincirlerinde biraz farklı yerleri işgal eden çeşitlerini (sitokrom a, b, c, d ve o) üretir. Sitokromlar eski ve çok çeşitlidir. Bazıları elektronları zincirdeki bir taşıyıcıdan diğerine taşıma amacına hizmet eder, bazıları dış ortamdaki elektron vericilerinden elektron toplar ve bazıları elektronu zincirdeki son oyuncuya (terminal elektron alıcısı) aktarmaktan sorumludur.

Sonunda elektron, zincirin sonuna gelir ve bir son elektron alıcısına geçer. Oksijen, elektron alıcısı olarak iyi bir örnektir. Sizlerde ve bende bu oksijen, aerobik solunumda son elektron alıcısıdır –elektron vericisi olarak organik madde, elektron alıcısı olarak oksijen kullanılır. Enerji üretmek için organik maddeler yemekte ve oksijen solumaktayız.

Bir vericiden bir alıcıya giden bu elektron hareketi zinciri enerjiyi nasıl kontrol ediyor? Elektronlar zar boyunca hareket ettikçe, serbest enerji üretirler (daha kararlı hale gelirler ve art arda daha düşük enerji durumlarına geçerler). Bu serbest enerji, protonları zardan hücrenin içinden dışarıya aktif olarak pompalamak için kullanılır. Daha doğrusu bakteriler, protonları sitoplazmadan Gram–negatif hücrelerde periplazmaya ve Gram–pozitif organizmalarda hücrenin dışına pompalarlar.



Şekil 5.3 ATP oluşumuna bağlı bir elektron taşıma zincirinin şematik bir örneği. Burada mitokondride elektron taşıma zinciri gösterilmiştir. Elektron taşınması, protonları (H^+) dışarı pompalayan protein komplekslerini ve geri hareket eden protonların yönlendirdiği ATP üreten ATP sentazı içerir (Kaynak: Charles Cockell).

Protonların hücre dışına hareketi, bir proton gradyanında enerjinin depolanmasıyla sonuçlanır. Bu enerji, iki şekilde saklanır. Kimyasal enerji üretilen pH farkında bulunur (ΔpH). Protonlar asitliğin temelidir ve bu nedenle protonların hücre dışında toplanması da hücre zarının dışındaki pH'da bir azalma anlamına gelir. Enerji ayrıca, hücre zarının dışındaki protonlardaki net pozitif yükün neden olduğu bir elektrik potansiyelinde (ΔΨ) de bulunmaktadır.

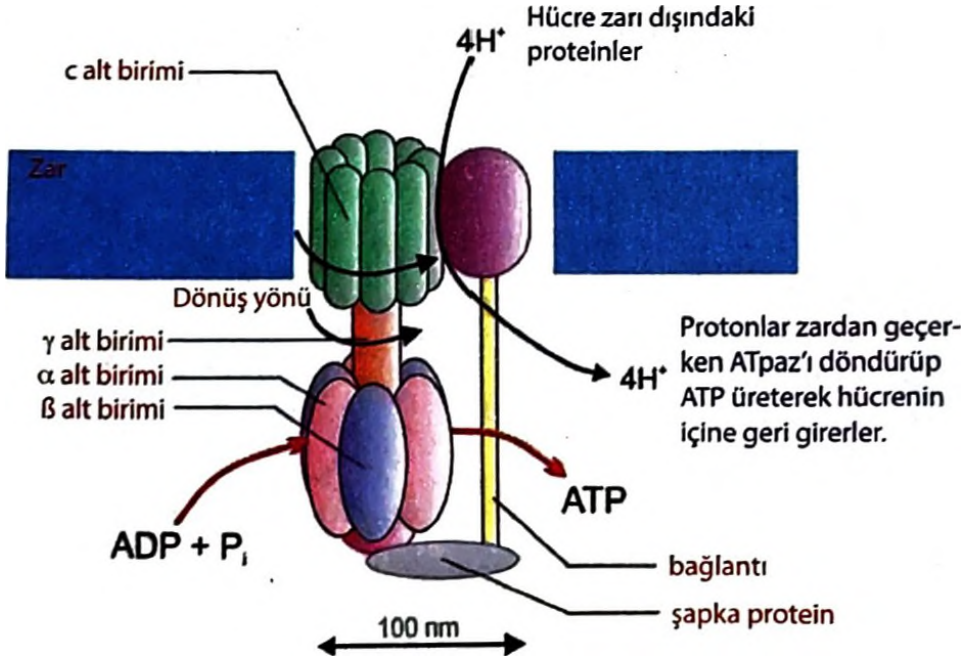
Bu iki bileşen, pH ve yük farkı, protonların yük ve pH'ı eşitlemek için zar boyunca geri hareket etme eğilimine neden olur. Buna **proton hareket kuvveti (pmf)** denir.

Pmf aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenebilir:

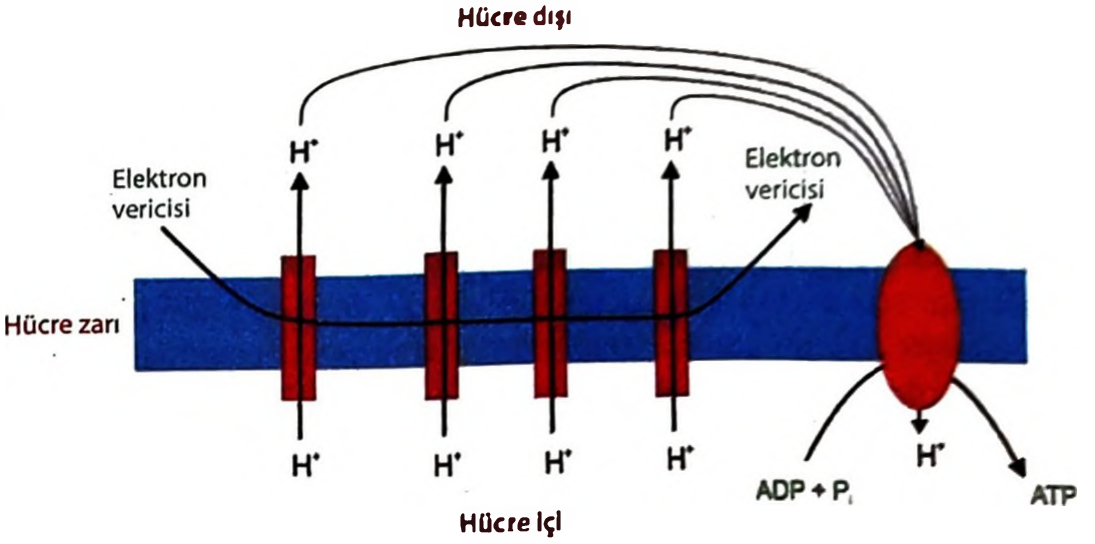
$$pmf = \Delta\Psi - (2{,}3RT/F)(\Delta pH) \qquad (5.1)$$

Burada R, evrensel gaz sabiti (8,314 J mol^{-1} K^{-1}), T sıcaklık ve F, Faraday sabiti (96,48 kJ V^{-1}). Pmf için tipik bir değer 150 ila 200 mV arasındadır.

Pmf, ATP oluşturmak için kullanılabilir. Zar genellikle protonlara karşı geçirgen olmadığından, protonlar tercihen zarda bulunan bir ATP sentazdan (bazen F tipi ATPaz olarak da adlandırılır) hücre içine geri hareket etmeye zorlanır. Bu karmaşık çok alt birimli (multimerik) protein, ADP ve P_i'den ATP üretir. ATP sentaz, ADP'yi P_i ile kovalent bir bağ oluşturmalarına olanak sağlayacak doğru şekilde hizalayan spesifik aktif bölgelere sahiptir. Protonlar, enzimi bir mandal gibi döndürmek üzere hareket eder –her mandal, bir ADP ve P_i'yi bir araya getirmek için enzimin şeklini değiştirir ve yeni bir ATP molekülü oluşturur (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 ATP sentaz (veya F-tipi ATPaz) kompleksi. ATP sentaz'ın yapısında yer alan bazı karmaşık alt birimlerle birlikte ATP oluşumunun şematik gösterimi. Tipik olarak üç ila dört protonun (burada gösterilen dördü) bir ATP molekülü oluşturmak için gerekli olduğu düşünülmektedir (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 5.5 Elektron taşınmasını, hücrenin dışına proton pompalanmasını ve ATP oluşumunu gösteren, kemiosmoz ilkelerinin toplu bir özetini sunan genel şema. Bu, Dünyadaki yaşamda serbest enerjiden yararlanmanın en önemli araçlarından biridir ve ATP üretimini yönlendirmek için atom altı parçacıkların (elektronlar ve protonlar) hareketini kullanır (Kaynak: Charles Cockell).

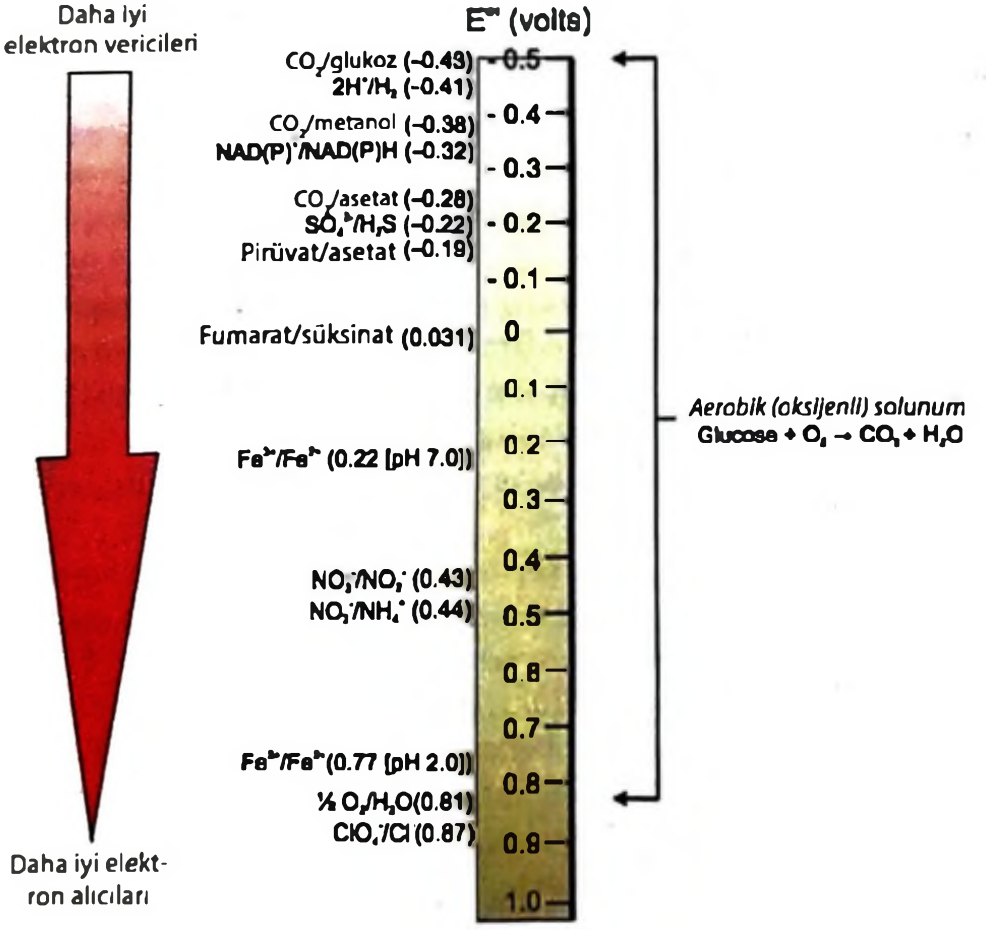
Pmf enerji üretmenin yanı sıra, diğer çeşitli yararlı biyokimyasal işlevleri yerine getirmek için kullanılabilir. Örneğin bir proton, bir transmembran taşıyıcı aracılığıyla elektronötral değişimle hücreden atılan Na^+ gibi bir katyonla değiştirilebilir. Pmf aynı zamanda organik moleküllerin alımı, sülfat iyonları gibi anyonların elektronötral alımı ve diğer transmembran süreçlerini sürdürmek için de kullanılabilir.

Bu noktaya bahsettiğimiz her şey –ATP üretmek için proton hareket kuvveti kullanılarak protonların pompalanmasına neden olan elektron taşıma zinciri– topluca **kemiosmoz teorisi** olarak adlandırılmaktadır (Şekil 5.5). Bu teori ilk olarak 1961'de Peter Mitchell (1920–1992) tarafından önerildi. 1978'de bu keşif için Nobel Ödülünü kazandı. Bu olağanüstü bir süreç çünkü esas olarak yaşam için enerji üretmek amacıyla atom altı parçacıkların (elektronlar ve protonlar) kullanılmasını içeriyor. Burada parçacık fiziği ve biyoloji arasında bölünmez bir bağlantı görüyoruz.

5.5 Ne Tür Elektron Verici ve Alıcıları Kullanılabilir?

Önceki bölümde, elektron vericisi olarak organik bileşikler ve elektron alıcısı olarak oksijen örnekleri tartışılmıştır. Organik bileşikler ve oksijen enerjiyi serbest bırakmak için bu şekilde birleştirildiğinde bunu aerobik solunum olarak adlandırırız, ancak işi yapan başka birçok elektron vericisi ve alıcısı vardır. Elektrot potansiyelini belirterek herhangi bir elementin veya bileşiğin elektron verici veya alıcı olmada ne kadar iyi olduğunu ölçebiliriz. **Elektrot**

potansiyeli (veya oksidasyon/redüksiyon potansiyeli; ORP), bir kimyasal türün elektron alma eğiliminin bir ölçüsüdür ve bu sebeple indirgenir. Volt (V) veya milivolt (mV) cinsinden ölçülür. Her kimyasal türün kendine özgü redüksiyon potansiyeli vardır. Bir elektrot potansiyeli ne kadar negatif olursa, madde bir elektrondan daha fazla vazgeçmek ister (bu onu iyi bir elektron vericisi yapar). Potansiyel ne kadar az negatif ya da pozitif olursa, o kadar elektron alıcısı gibi davranır. Elektrot potansiyeli bir standarda (genellikle H_2) göredir. Standart elektrot potansiyelleri, E°, 25°C ve 1 atm için verilir, ancak biyolojik sistemlerde pH 7'de de (E°' olarak yazılır) standart elektrot potansiyelini belirleriz.



Şekil 5.6 Standart koşullarda ve pH 7.0'da bazı yarım reaksiyon örnekleri (redoks çiftleri) ve bunların elektrot potansiyellerini gösteren bir elektron kulesi. Her yarım reaksiyon bir çift olarak gösterilir. Eğer bir elektron vericisi gibi davranıyorsa, elektrondan vazgeçen madde (örneğin glukoz) sağda ve sonuçta ortaya çıkan ürün (örn. CO_2) solda gösterilir. Bir elektron alıcısı gibi davranıyorsa, elektronu kabul eden madde (örneğin O_2) solda ve ürün (örn. H_2O) sağda gösterilir. Bu reaksiyonların ikisini birleştirerek, elektronların bir elektron vericisinden bir alıcıya akışından enerji üretilebilir. Aerobik solunum örneği gösterilmiştir. Bu reaksiyonda glukoz elektron vericisi ve oksijen elektron alıcısıdır. Bölümün ilerleyen kısımlarında bu reaksiyonlardan ortaya çıkan serbest enerjiler nicelleştirilir (Kaynak: Charles Cockell).

Elektromotor serileri veya **elektron kulesi** (örneğin, bkz. Şekil 5.6) olarak adlandırılan bir tabloda elektron verici ve elektron alıcılarını en negatiften en pozitife kadar sıralayabiliriz. Ayrıca, enerji üretmek için elektron taşıması yapmak istiyorsak, elektronların daha negatif elektrot potansiyeline sahip bir maddeden daha pozitif olan bir maddeye taşınması gerektiğini de görebilirsiniz. Elektron vericisinin kuledeki elektron alıcısının üzerinde olması şartıyla elektronları aktarmak ve enerji yapmak için çok çeşitli elektron vericileri ve alıcıları kullanabiliriz.

Bu elektron taşıma reaksiyonlarının, **redüksiyon–oksidasyon reaksiyonları** veya redoks reaksiyonları olarak adlandırılması da şaşırtıcı değildir.

Oksidasyon, bir substrattan elektronların uzaklaştırılmasıdır. Bu, elektron vericisinin reaksiyonudur:

S_d (elektron vericisi, burada d alt simgesiyle gösterilir) → P_d (ürün) + e^-.

Elektron alıcısına elektron eklenmesi redüksiyondur:

S_a (elektron alıcısı, a) + e^- → P_a (ürün).

Bazen her redüksiyon ve oksidasyon reaksiyonunu yarım reaksiyon olarak adlandırırız. İki yarım reaksiyon veya *redoks çiftleri* bir maddeden diğerine tam bir elektron taşıması yapmak için bir araya gelir.

Bu reaksiyonların termodinamiğini nasıl ölçtüğümüze daha sonra geri döneceğiz.

5.6 Aerobik (Oksijenli) Solunum

Az önce gördüğümüz elektron taşıma zinciri, birçok organizmada çok daha büyük bir düzeneğin parçasıdır. Şimdi bir adım geri çekilmeli ve bunun daha büyük metabolizma düzenine nasıl dâhil olduğunu görmeliyiz. Başlangıçta, alınan besin bu elektronlara ulaşmak için daha küçük parçalara bölünmelidir. Bir sandviçi doğrudan elektron taşıma zincirine sokamazsınız.

Önce aerobik solunuma dönelim ve karbon molekülleri ile oksijenin nihayetinde enerji üretmek için nasıl kullanıldığına dair temel adımları inceleyelim.

İlk olarak, organizmanın besindeki karmaşık karbon bileşiklerini parçalaması gerekir. Substrata bağlı olarak bunu yapmak için çok çeşitli yollar vardır.

Örneğin lipidler (yağlar) beta oksidasyon işlemiyle parçalanır, böylece yağ asitleri enzimler tarafından sırasıyla asetil koenzim A (asetil–CoA) molekülüne ayrılır. Bu molekül, koenzim A (bir tiyol) ve asetik asit (bir açil grubu taşıyıcısı) bileşikleri arasında oluşan bir tiyoesterdir. Yapısı Şekil 5.7a'da gösterilmiştir. Metabolik yolaklardaki merkezi önemi nedeniyle bazen 'Metabolizmanın Merkezi' olarak adlandırılır. Bu ürünün nereye gittiğini birazdan göreceğiz. Proteinler, amino asitlerini çıkararak onları deamine eden proteolitik enzimler tarafından parçalanır. Uzun zincirli şekerler, glikozidik bağları kıran ve glukoz gibi şeker birimlerini üreten enzimler tarafından parçalanır.

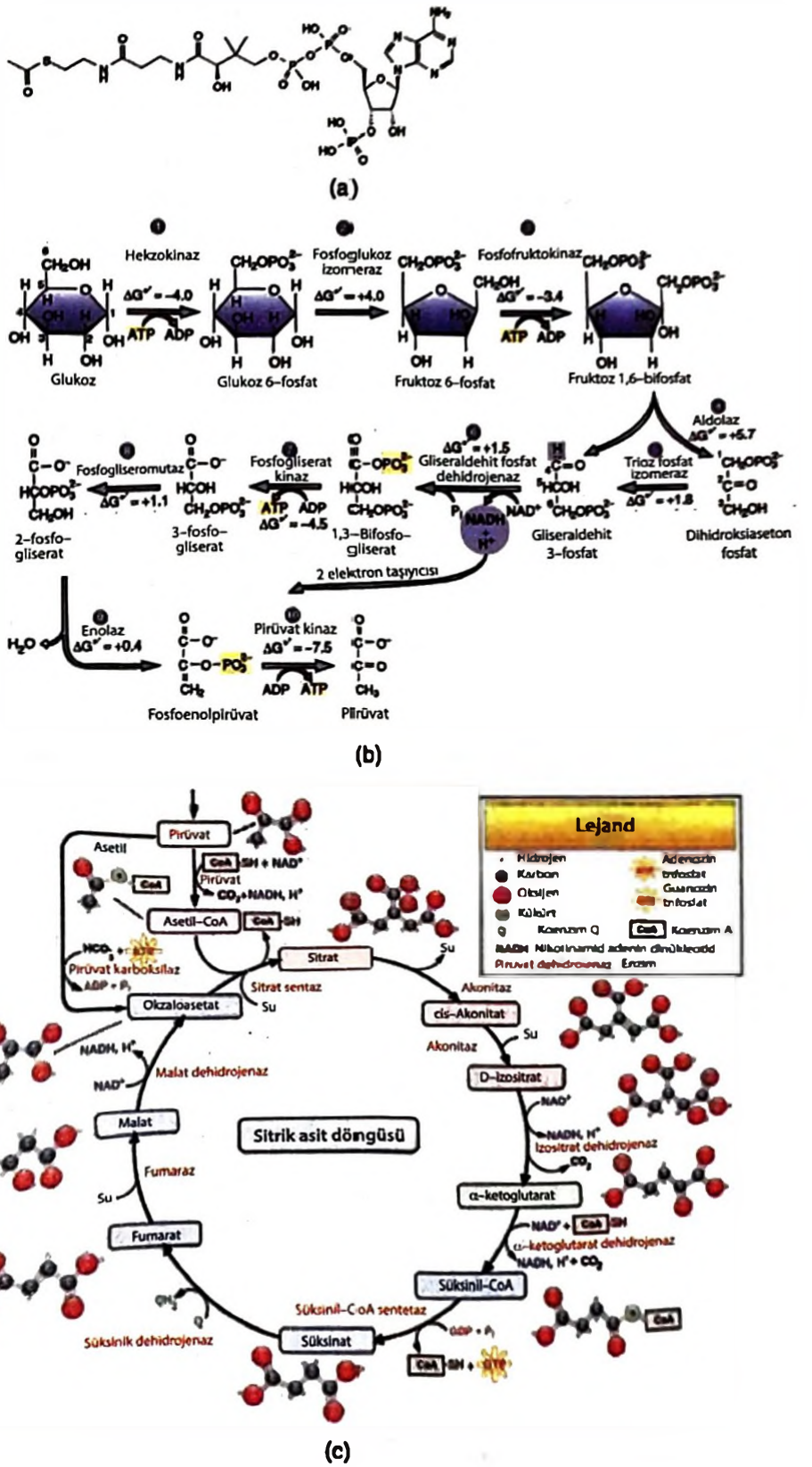
Bu organik molekül metabolizması ürünleri, onları daha da parçalayan yeni yolaklara girer. Bunların en önemlilerinden biri, glukozu pirüvata parçalayan glikolitik yol (glikoliz) veya Embden–Meyehof yolağıdır (Şekil 5.7b). Bu, enzimlerin aracılık ettiği bir dizi reaksiyonla gerçekleştirilir. Glukoz dışındaki şekerler de glikolitik yola girebilecek şekilde enzimler tarafından modifiye edilir. Lipidler ve proteinlerde olduğu gibi glikolizin son ürünü olan pirüvat, nihayetinde asetil–CoA'ya dönüştürülür.

Her ne kadar glikolitik yol devam etmek için bir miktar ATP enerjisi gerektirse de (aşama 1 ve 3; Şekil 5.7b), ATP yapmak için fosfat moleküllerinin ADP'ye aktarılabileceği bir dizi aşama içerir (aşama 7 ve 10). ATP üretmek için yüksek enerjili bir substrat (bu durumda glukozun parçalanmasıyla oluşan metabolik ürünler) kullanarak enerji elde etme sürecine substrat düzeyinde fosforilasyon denir. Bir glukoz molekülünün parçalanmasında hücre, bu işlem sayesinde iki ATP molekülü üretebilir.

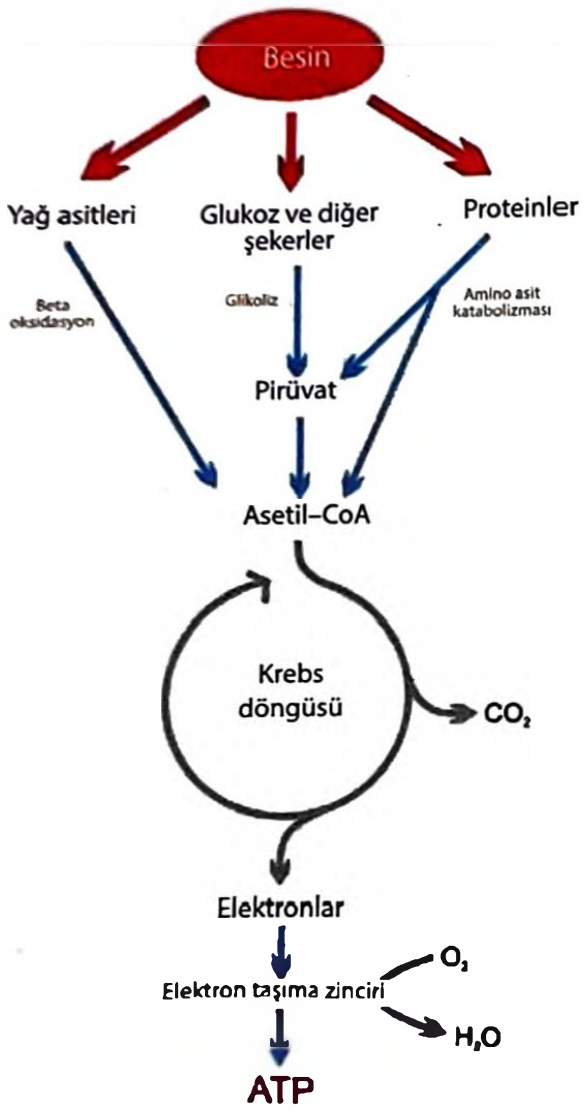
Şekerleri parçalamak için başka yollar da mevcuttur. Glikoliz gibi oksijenle veya oksijen olmadan çalışabilen pentoz fosfat yolağı, prokaryotların ve ökaryotların sitoplazmasında bulunur ve şekerleri parçalamak için kullanılır.

Şekerlerin, proteinlerin ve yağ asitlerinin parçalanmasının sonucu çok fazla miktarda asetil–CoA'dır. Şimdi bu molekül, trikarboksilik asit (TCA) döngüsü veya sadece sitrik asit döngüsü olarak da bilinen Krebs döngüsüne girmektedir. Döngü oldukça eskidir ve aşamaları, hatta aşamaların tersine çevrilmesi, çeşitli organizmalarda bulunur. Döngünün her bir aşamasının detayları ve dâhil olan enzimler Şekil 5.7c'de gösterilmiştir. Döngünün temel işlevlerinden biri asetil–CoA'yı CO_2 moleküllerine (aerobik solunum yapan canlılar tarafından tüketilen organik moleküllerin nihai kaderi) dönüştürmektir. Aynı zamanda, örneğin, hücredeki amino asitlerin *de novo* sentezinde kullanılan ara karbon bileşiklerinin üretiminde de rol oynar.

Şimdi asetil–CoA'yı karbondioksite parçalama sürecinde çok fazla enerji toplayabiliriz. Bir asetil–CoA molekülü parçalandığında, iki karbondioksit molekülü üretir ve çok fazla elektron salar. Dört çift elektron, nikotinamid adenin dinükleotid (NAD^+) adlı bir moleküle ve bir çift flavin adenin dinükleotide (FAD^+) aktarılır. Bu iki molekül koenzim olarak adlandırılır ve biyokimyadaki işlevleri genellikle elektronları kabul etmek ve daha sonra bunları diğer yararlı biyosentez yollarına aktarmaktır. Biyolojide elektronlar genellikle hidrojen atomlarına aktarılır (hatırlayın, bir proton ve bir elektron içerir). NAD^+ veya FAD^+ durumunda, iki hidrojen atomu bir verici molekülünden bunlara aktarılır, bu da iki elektronun moleküle aktarılmasıyla sonuçlanır. Bununla birlikte, molekül iki hidrojen atomundan sadece bir proton kabul edebilir, bu nedenle bir proton serbest kalır ve çözeltiye serbest bırakılır. Örneğin NAD^+'a elektron ekleme reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.7 Asetil Co-A'nın yapısı ve iki eski ve önemli biyokimyasal yolak. (a) Metabolizmada en önemli ara maddelerden biri olan asetil-CoA'nın yapısı. (b) Glikolitik yol ve ara maddelerin yapıları (Kaynak: John Wiley & Sons Ltd). *(c) Krebs veya sitrik asit döngüsü* (Kaynak: wikicommons, kamu malı).



Şekil 5.8 Solunum yapan hayvanlarda çeşitli karbon bileşiklerinin parçalanma ve enerji üretim yollarının bir özeti (Kaynak: Charles Cockell).

$RH_2 + NAD^+ \rightarrow NADH + H^+ + R.$

Buradaki R, elektron verici moleküldür.

Bu elektron taşıyıcılar şimdi elektron taşıma zincirine girebilir, bunun üzerine elektronlar zardan geçer, bir proton hareket kuvveti oluşturur ve bu protonlar ATP sentaz yoluyla zar boyunca geri hareket ettikçe ATP üretir. Sonunda zardan geçen elektronlar, son elektron alıcısı olarak aerobik solunumda oksijen tarafından alınacaktır.

Bu çeşitli adımlardan kazanılan enerji miktarı etkileyicidir. Bir glukoz molekülü başına, hücrelerde enerji gerektiren reaksiyonlar için prokaryotlarda toplamda 38 ATP molekülü üretilebilir. Toplam ATP üretiminin dökümü aşağıdaki gibidir: 2'si glikolizden, 2'si Krebs döngüsünden ve yaklaşık 34'ü elektron taşıma sisteminden. Bununla birlikte, bu verime geçirgen zarlardan kaynaklanan kayıplar nedeniyle asla ulaşılamaz. Daha gerçekçi sonuç, glikoz molekülü başına 29–30 ATP molekülüdür.

Şimdi karbon moleküllerinin yıkımının, elektron taşıma zinciriyle ve son elektron alıcısıyla (aerobik solunumdaki oksijen) ilişkili olan Krebs döngüsüne nasıl bağlandığını ve böylece hücrelerin işlerini yapabilmek için nasıl ATP ürettiğini anlıyoruz. Dev bir metabolik huni olarak kabul edilebilecek bu genel süreç, Şekil 5.8'de özetlenmiştir.

5.7 Anaerobik (Oksijensiz) Solunum

Az önce anlattığımız işlemde geçen elektronları ortamdan alacak tek elektron alıcısı oksijen değildir. Oksijenden daha az pozitif elektrot potansiyeline (yani elektron kulesinin yukarısında) sahip olsa da, işi yapacak çok sayıda başka molekül ve element vardır.

Bu anaerobik büyüme şekilleri aerobik solunumdan daha az enerji üretir, genellikle yaklaşık onda biri kadar veya daha az, ancak mikrobiyal büyüme için yeterli enerjiyi üretir.

Aerobik solunuma en benzer olan yollarından biri, elektron alıcısı olarak nitrat (NO_3^-) kullanan anaerobik solunumdur. Nitrat, bir dizi redüktaz enzimi kullanılarak nitrite (NO_2), amonyağa (NH_3) veya nitrojen gazına indirgenir (denitrifikasyon olarak adlandırılır). Bazı organizmalarda nitrat, nitrik oksit (NO) ve azot oksit (N_2O) gazlarına indirgenir. İkincisi, yüksek konsantrasyonlarda sadece kimyasal işlemlerle çok miktarda gaz elde etmek zor olduğundan, yaşamın potansiyel olarak kendine özgü bir türüdür. Bölüm 19'da döneceğimiz, ötegezegen atmosferinde yaşamın gaz temelli imzalarını aramak için potansiyel bir yol olarak önerilmiştir. *Pseudomonas*, *Bacillus* ve *Staphylococcus* cinsleri de dâhil olmak üzere çok çeşitli bakteriler nitrat indirgeme yeteneğine sahiptir. Birçok organizma hem nitrat indirgeme hem de aerobik solunum yapabilir ve oksijen ile nitratın varlığına bağlı olarak ikisi arasında geçiş yapabilir.

Diğer organizmalar, elektron vericisi olarak organik maddeleri kullanarak oksitlenmiş demiri elektron alıcısı olarak kullanabilirler. Oksitlenmiş demir, çözünmüş Fe^{3+}'dan hematit (Fe_2O_3) gibi minerallere veya $(Fe^{3+})_2O_3.0,5H_2O$formülüne sahip yaygın bir demir formu olan ferrihidrit gibi minerallere kadar çok çeşitli formlarda mevcuttur. *Geobacter* ve *Shewenella* bu dönüşümü gerçekleştirebilen ortak gruplardır. Demir indirgeyici organizmalar Bakteri ve Arke üst âlemlerinde bulunur. Demir indirgeme, indirgenmiş demirin (Fe^{2+}) çevreye salınmasına neden olur. İşlem, biyosferdeki organik maddenin oksidasyonunda ve demirin çözünür ve daha erişilebilir formu olan çözünmüş Fe^{2+}'ya indirgenmesinde son derece önemlidir.

Demir indirgeyici bakterilerin karşılaştığı bir zorluk, elektron alıcısının sıklıkla katı demir oksit mineralleri formunda olmasıdır. Organizmanın, elektronları elektron taşıma zincirinden son elektron alıcıları olan katı oksitlenmiş demir bileşiklerine taşıma yeteneğini kolaylaştıran çeşitli evrimsel yenilikler belirlenmiştir. Bunlar arasında mikropların demir oksitlere bağlanma yeteneğini geliştiren küçük dış uzantılar olan pili, hücreden demir oksitlere elektron taşıyıcısı olarak hareket eden kuinonların üretimi ve hatta elektronları organizmadan metal yüzeye taşıyan uzun iletken uzantılar olan nanotellerin salgılanması bulunur. Hücrelerin dış yüzeyindeki demir redüktaz enzimleri, elektronların mineral yüzeyine taşınmasını arttırır.

Bununla birlikte başka bakteriler, sülfat (SO_4^{2-}) indirgeme işleminde elektron alıcısı olarak sülfat kullanabilmektedir. Bu sınıf, bakteri ve arkelerin (örn. *Desulfomaculum* ve *Desulfosporosinus*) dışında sıcak kaplıca ortamlarından (örn. *Thermodesulfovibrio*) da birçok tür içerir.

Sülfat kararlı bir molekül olduğundan, hücreler önce ATP'yi kullanarak onu aktif hale getirmelidir. Enzim, ATP–sülfürilaz, sülfat iyonunu bir ATP'nin fosfat

grubuna ekler. Aktif hale gelen ürün, Adenosin fosfosülfat (APS), daha sonra sülfite indirgenebilir, bu da sonrasında sülfüre indirgenebilir.

Sülfat indirgenmesinin son ürünü, H_2S gazı olarak salınan veya metal sülfürler üretmek için minerallerle bağ kuran sülfürdür. Sülfatın bu şekilde indirgenmesi, çözeltiye bırakıldığında diğer organizmalar tarafından kükürt indirgeme reaksiyonlarında kullanılabilen trityumyon ($S_3O_6^{2-}$) ve tiyosülfat ($S_2O_3^{2-}$) gibi bir dizi ara madde oluşmasına sebep olabilir ve bu da farklı kükürt metabolize eden organizmaların birlikteliğine yol açar.

Elektron vericisi olarak organik karbon kullanılan sülfat indirgenmesi için genel reaksiyon:

$$2CH_2O + SO_4^{2-} + 2H^+ \rightarrow H_2S + CO_2 + 2H_2O$$

Bu anaerobik organizmaların bazıları önemli ölçüde çok yönlülük sergiler ve bu farklı elektron alıcılarının varlığına bağlı olarak nitrat, demir ve sülfat indirgenmesi arasında geçiş yapılabilmesini sağlar. Genel olarak iki gruba ayrılırlar, bir grup elektron vericisi olarak bir dizi farklı organik molekül kullanabilirken diğer grup özellikle basit organik asit, asetat, kullanır.

Az önce bahsedilen anaerobik metabolizmalar buzdağının görünen kısmıdır. Uranyum, arsenik ve çeşitli eser metaller elektron alıcısı olarak işlev görebilir ve sonuçta enerji kazanımına izin verebilir. Gerçekten de, enerji üretebilecek hemen hemen her teorik redoks çiftinin bir tür organizma tarafından kullanıldığı bulunmuştur. Anaerobik büyüme için perklorat (ClO_4^-) bile bir elektron alıcısı olarak kullanılabilir. Bu anyon, Mars yüzeyinde ~ %0,4–0,6 ağırlığında bulunmuştur (Bölüm 17).

Anaerobik solunumların büyük elverişe sahip kullanımı vardır. Örneğin, uranyumu indirgeyebilen demir indirgeyici mikroorganizmalar nükleer kirliliğe maruz kalmış alanlarda biyoremediyasyonu gerçekleştirmek için kullanılabilir. Uranyumun çok çözünür oksitlenmiş altı değerlikli durumundan (U^{6+}) daha az çözünür olan U^{4+} durumuna indirgenmesi, aksi takdirde yeraltı suyuna karışarak ciddi kirlenmeye ve insan sağlığı için bir tehdide neden olabilecek uranyumun hareketsizleştirilmesi için kullanılabilir.

Bu anaerobik metabolizmalar astrobiyolojik öneme sahiptir, çünkü yerel olarak mevcut elementleri kullanarak anaerobik ortamlarda enerji elde etme kapasitesini temsil ederler. Mars'ın anaerobik yüzeyinde demir oksitlerin, bol miktarda sülfat tuzlarının ve perkloratların varlığı, ortamın anaerobik solunumu destekleyip desteklemeyeceği, belki de yaşamın, eğer varsa, bu redoks çiftlerinden faydalanarak karbon açısından zengin meteoritlerden organik madde kullanıp kullanamayacağı gibi belli soruları ortaya çıkarır.

Odak Noktası: Astrobiyolog. Tori Hoehler



Hangi konu üzerinde çalışıyorsunuz? Yaşamın –özellikle mikrobiyal yaşamın– Dünyanın, Güneş sisteminin ve ötesinin çeşitli ortamlarını oluşturan fiziksel ve kimyasal parametrelerin değişen durumlarına karşı kendini nasıl yaydığını inceliyorum. Benim ekmek teknem olan dünyevi ekosistemler için bu, temelde sadece mikrobiyal ekolojidir. Ancak çevre ve yaşam arasındaki ilişkiyi, bulduğum düzenleme ilkelerinin Dünya dışındaki ortamların yaşanabilirliği hakkında düşünmeyi genişletilebilecek kadar temel düzeyde anlamaya çalışıyorum.

Nerede çalışıyorsunuz? Bazı harika yerlerde çalışma fırsatım oldu. Baja California'da (Meksika) ve Yellowstone'da oldukça fazla iş yaptım. Hidrotermal menfezler üzerinde üzerinde çalışmak için okyanusun dibinde ve Svalbard'da Kuzey Kutup Dairesinde bulundum. Şu anda, Kuzey Kaliforniya'nın *ofiyolitlerinde* yer altı mikrobiyal toplulukları incelediğim için, işlerimin çoğu eve daha yakın. NASA Ames Araştırma Merkezi'ndeyim.

İlk uzmanlık alanınız neydi? Lisans derecemi kimya alanında ve doktora derecemi okyanus bilimi alanında aldım.

Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz? Özellikle enerji akışının –çevreden gelen arz ve yaşamdan gelen talep– ekolojiyi ve yaşanabilirliği nasıl etkilediğiyle ilgileniyorum. Bu, Güneş Sistemimizin yaşanabilir hacminin çoğunda olduğu gibi, yaşamın son derece sınırlı enerji kaynağıyla nasıl başa çıktığını anlama konusunda derin bir ilgi uyandırdı.

Astrobiyoloji alanında sizi heyecanlandıran nedir? Beni genel olarak bilim hakkında heyecanlandıran şey, ihtiyaç duyduğu yaratıcılıktır. Birçok insanın bilimi yaratıcı bir çaba olarak görmediğinden şüpheleniyorum, ancak en iyi bilim tam olarak budur. Astrobiyolojinin çok fazla yaratıcılık, birçok 'zihinsel jimnastik' gerektirmesini seviyorum. Özellikle, dünyevi yaşamın özel örneğinden mümkün olduğunca çok şey öğrenme, ancak ona bağlı kalmamayla –mümkün olduğunca geniş düşünme– ilgili dikkatli bir çizgi vardır. Sorular büyük ve temel; düşünce de aynı şekilde olmalıdır.

5.8 Fermantasyon

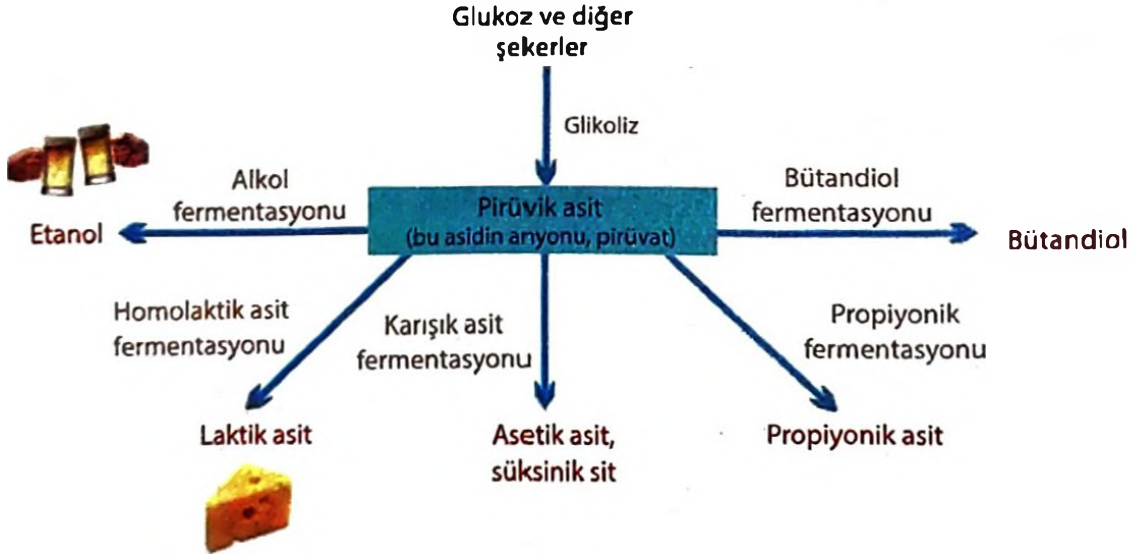
Aerobik solunumda glukozun glikolitik döngüde pirüvata (veya pirüvik asit –pirüvat sadece pirüvik asit suda çözündüğünde oluşan iyon) nasıl parçalanabileceğini gördük. Oksijenin yokluğunda olası bir problemimiz var. Daha önce gördüğümüz ve şimdi karbon bileşiklerinden bazı elektronları toplayarak NADH haline gelen NAD^+, bir şekilde bu elektronlardan kurtulmalıdır. Mevcut oksijen veya başka elektron alıcıları yoksa, NADH birikecek ve hücre metabolizması durma noktasına gelecektir. Birçok mikrop, NADH'nin yeniden oksidasyonu için elektron alıcısı olarak pirüvatın kendisini kullanarak bunu yapar. İşlem o kadar etkilidir ki birçok organizma oksijen mevcut olsa bile onu kullanır. Bu

işlem **fermantasyondur** ve bazen kimyasal bir bileşiğin aynı anda indirgendiği ve farklı ürünler oluşturmak için oksitlendiği bir orantısızlaştırma reaksiyonu olarak adlandırılır.

Mikroplar tarafından gerçekleştirilen fermantasyon çeşitliliği olağanüstüdür (Şekil 5.9). Alkol fermantasyonu sonucunda şarap, bira ve içecek endüstrisinde bariz kullanımı olan alkoller oluşur. Laktik asit fermantasyonu hayvan iskelet kaslarında meydana gelir ve ani egzersizden sonra hoş olmayan kramplara neden olur. Ayrıca, peynir üretiminde de önemlidir. Bakteriler sütteki laktoz şekerini laktik aside dönüştürür, bu da sütteki kazein proteininin bozulmasına ve karışmasına neden olarak peynir altı suyunu oluşturur. Peyniraltı suyunu parçalayan bir proteaz olan renin katkısıyla peynirin hammaddesi olan lor oluşur. Karışık asit ve diğer asit fermantasyonlarının çeşitliliği endüstriyel ve tıbbi öneme sahiptir. Fermantasyonun astrobiyolojik önemi ise, gezegenimsi bir yüzey üzerindeki organizmaların, dışarıdan temin edilebilen tam bir redoks çiftine ihtiyaç duymadan organik malzemelerden enerji elde edebileceği gözlemidir.

5.9 Kemoototroflar

Şu ana kadarki tartışmamız öncelikle farklı elektron alıcılarıyla sınırlıydı ve elektron vericisinin organik bir madde olduğunu varsaydık. Fakat bu böyle olmak zorunda değil ve kemoototrof adı verilen birçok organizma inorganik elektron vericileri kullanır (aşağıya bakınız). Bu noktada **kemolitotrof** kelimesinin **kemoototrofla** dönüşümlü olarak kullanıldığını belirtmek gerekir. İnorga-



Şekil 5.9 Fermantasyon yolakları ve çeşitli olası fermantasyonlardan sadece birkaçı. Bazılarının yiyecek ve içecek üretiminde bariz kullanımı vardır. Bununla birlikte hepsi, endüstriyel kimyasal sentezlerde kullanılan önemli temel kimyasalların oluşumu için yollardır.

nik elektron vericileri kullanan hemen hemen tüm organizmalar, karbon kaynağı olarak kolayca oluşturulmuş organik bileşiklere erişemedikleri için karbon kaynağı olarak CO_2 kullanan ototroflardır (organik bileşiklere erişebilselerdi, enerji üretmek için muhtemelen onları kullanabilirlerdi).

Elektron vericilerinin çeşitliliği çok büyüktür ve hidrojen, indirgenmiş demir, amonyak, kükürt ve diğer bileşikleri içerir. Bu bileşiklerin bazıları, kemoheterotrofların kullandığı birçok organik bileşiğin aksine, kolayca çözünemezler ve bu nedenle kemootototroflar genellikle zarlarında dışardaki maddelerden elektron alımını kolaylaştıran oksidaz enzimlerine sahiptirler.

Mikroorganizmalarda bulunan kemootototrofik redoks çiftlerinin bazı örnekleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 Kemootototrofik redoks reaksiyonlarına bazı örnekler.

Elektron vericisi	Elektron alıcısı	Ürün	Mikrobiyal süreç
$4H_2$	$+CO_2$	$\rightarrow CH_4+2H_2O$	Metanogenez (anaerobik)
CH_4	$-2O_2$	$\rightarrow CO_2+2H_2O$	Metanotrofi
$10FE^{2+}$	$+2NO_3^-+12H^+$	$\rightarrow 10Fe^{3+}+N_2+6H_2O$	Demir oksidasyonu (anaerobik)
$4H_2$	$+SO_4^{2-}+H^+$	$\rightarrow HS^- + 4H_2O$	Sülfat redüksiyonu (anaerobik)
NH_4^+	$-4O_2$	$\rightarrow 2HNO_3+2H_2O$	Nitrifikasyon (aerobik)
$2S$	$+3O_2+2H_2O$	$\rightarrow 2H_2SO_4$	Kükürt oksidasyonu (aerobik)

Ototrofi, kemootototrofların CO_2'i karbon moleküllerinde sabitlemek için Calvin döngüsü (daha sonra fototrofları ele aldığımızda tartışılacaktır) veya ters Krebs ya da ters trikarboksilik asit (TCA) döngüsü gibi enerji bakımından masraflı alternatif yollar kullanması gerektiği anlamına gelir. Ters TCA döngüsü, aslında CO_2'i serbest bırakmak yerine almak için geriye doğru çalışan TCA döngüsüdür (Bölüm 5.6). Ancak, bu basit bir geri dönüş değildir. Birçoğu elektron depolama ve taşıma molekülleri olarak hareket eden demir–kükürt kümeleri (ferrodoksinler) içeren bazı özel ek enzimlere sahiptir.

Asetil–CoA yolağı, metanojenler gibi birçok anaerobik ototrof tarafından kullanılan CO_2'i sabitlemenin başka bir yoludur. Demir–kükürt proteinlerini ve nikel ile kobalt gibi geçiş metallerini kullanan enzimleri önemli ölçüde kullanır. Eski bir yolak olduğu düşünülmektedir.

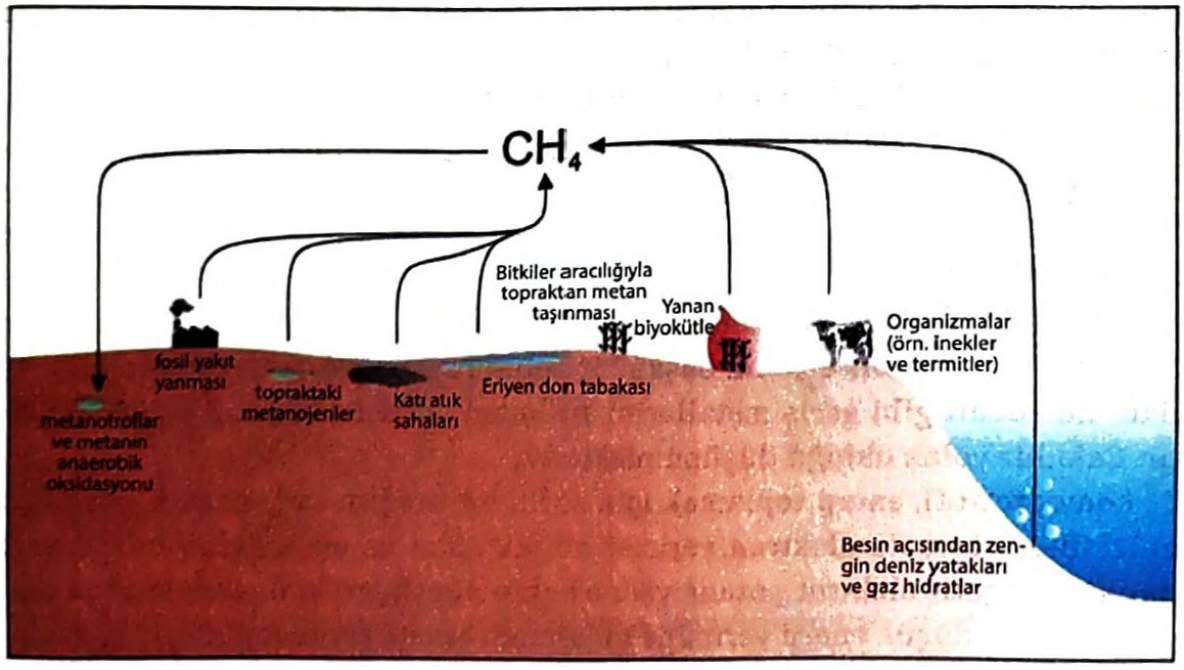
Kemootototrofi, enerji toplamak için zorlu bir araçtır. Organizmalar, organik moleküllere kıyasla elektron vericisi olarak daha az uygun olan bileşiklerin (daha az negatif elektrot potansiyeline sahip bileşikler) kullanımı sonucu oluşan nispeten düşük enerji verimine tahammül etmek zorundadır. Ayrıca, kemootototroflar tarafından kullanılan elektron vericilerinin birçoğu (hidrojen hariç), Calvin döngüsü gibi biyosentetik yolaklarda elektron vericisi olarak kullanı-

lan NAD(P)$^+$'dan NAD(P)H (Şekil 5.6) üretmek için gereken yarı reaksiyonlardan daha düşük elektron potansiyeline sahiptir. Sonuç olarak, birçok kemoototrof, herhangi bir kemoototrofik redoks çiftinden ATP kazanmanın yanı sıra, NAD(P)$^+$'ya elektron 'yüklemek' için ATP kullanmak zorundadır. Böylece, biyosentetik yolaklara elektron taşımak ve aktarmak için gerekli olan NAD(P)H'yi üretebilirler.

5.9.1 Metanojenler ve Metanotroflar

Hidrojenin elektron vericisi olarak kullanımı yaygındır ve CO_2'i hem elektron alıcısı hem de karbon kaynağı olarak kullanan metanojenlerde CO_2 indirgenmesiyle bağlanabilir. Metanojenler birçok anaerobik ortamda bulunur ve çoğu arkedir. Atmosferden ve H_2'den (serpentinizasyon gibi jeolojik süreçler tarafından üretilen) CO_2 kullanma yeteneklerinden dolayı fotosentezden bağımsız olarak yaşamlarına devam edebilmeleri ve diğer gezegenimsilerin derin alt yüzeylerinde var olabilen organizma türlerini temsil etmeleri, astrobiyologların onlara özel ilgi duymalarına neden olmuştur.

Metan (bunlar metanotroflar), metanol, metilamin ve formaldehit dâhil olmak üzere elektron vericisi olarak çeşitli tek karbonlu bileşikleri kullanan metilotroflar, önemli bir kemoototrof grubudur (Şekil 5.10). Metanotroflar özellikle önemlidir, çünkü metanın doğal metabolizmasından sorumludurlar ve muhtemelen atmosferde birikecek ve sera etkisine katkıda bulunacak olan derin deniz çökeltilerindeki metan metabolizmasında rol oynarlar. Bu nedenle bu organizmaların metan yıkımına katkılarını anlamak, er ya da geç iklim deği-



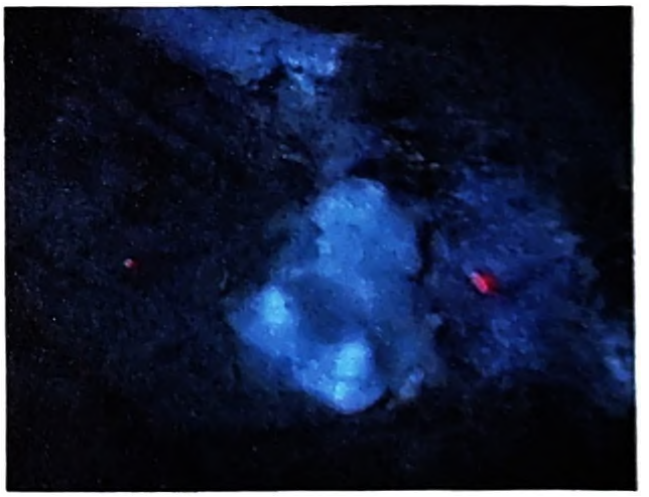
Şekil 5.10 Bazı doğal gaz kaynaklarını (hem doğal hem de antropojenik) ve mikrobiyal çukuru gösteren biyolojik metan döngüsü (Kaynak: Charles Cockell).

şikliği yoluyla donmuş metan rezervleri açığa çıkarsa ne olabileceğini anlama ihtiyacı ışığında yüksek öncelikli bir hale gelmiştir.

Metan oksidasyonu, metanojenler okyanuslarda sülfat indirgeyici organizmalarla bir arada bulunduğunda da ortaya çıkabilir. Metanojenler metabolizmalarını tersine çevirir ve metan üretmek yerine onu tüketmeye başlar. Bununla birlikte, bu sadece ürettikleri hidrojenin birikmesini önlemek ve böylece ters reaksiyonu (metanogenez) teşvik etmek için çıkarılırsa işe yarar. Organik karbon yerine elektron vericisi olarak hidrojeni kullanabilen sülfat indirgeyici organizmalar (bu reaksiyon Tablo 5.1'de gösterilmiştir), bu 'ters metanogenez' organizmaları tarafından üretilen hidrojeni tüketir ve böylece anaerobik metan oksidasyonunun gerçekleşmesine izin verir.

5.9.2 Kükürt Döngüsü

Önemli ve coğrafi olarak geniş bir şekilde yayılmış bir başka kemoototrof grubu kükürt oksitleyicilerdir. Bunlar, elektron vericileri olarak kükürt elementi veya sülfürler gibi indirgenmiş kükürt bileşiklerini kullanabilen organizmalardır. Genel olarak iki gruba ayrılırlar. Bir grup, *Thiobacillus*, *Sulfolobus* ve asidik ortamlarda yaşayan ve çevrede buldukları sülfürü oksitleyebilen, enerji üretmek için elektron alıcısı olarak oksijeni bağlayan diğer organizmaları içerir. Diğer grup, *Beggiatoa* gibi, genellikle atmosferdeki oksijen konsantrasyonu yaklaşık %5 olduğunda indirgenmiş sülfür bölgeleri ile düşük oksijen bölgeleri arasındaki arayüzlerde yaşar (Şekil 5.11). Bu arayüzlerde, sülfür veya diğer indirgenmiş kükürt türlerinin yanı sıra elektron alıcısı olarak oksijene erişebilirler. Bunlar, jeokimyasal dengesizliğin var olduğu –oksitlenmiş ve indirgenmiş bileşiklerin bir arada bulunduğu– yerlerde yaşamın nasıl sürdürüldüğünü gösteren çok iyi bir örnektir. *Beggiatoa* örneğinde, sülfürü hücrelerin içinde biriken kükürt ile kükürt elementine oksitleyebilirler. Kükürtün kendisi daha sonra sülfata oksitlenerek bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir.



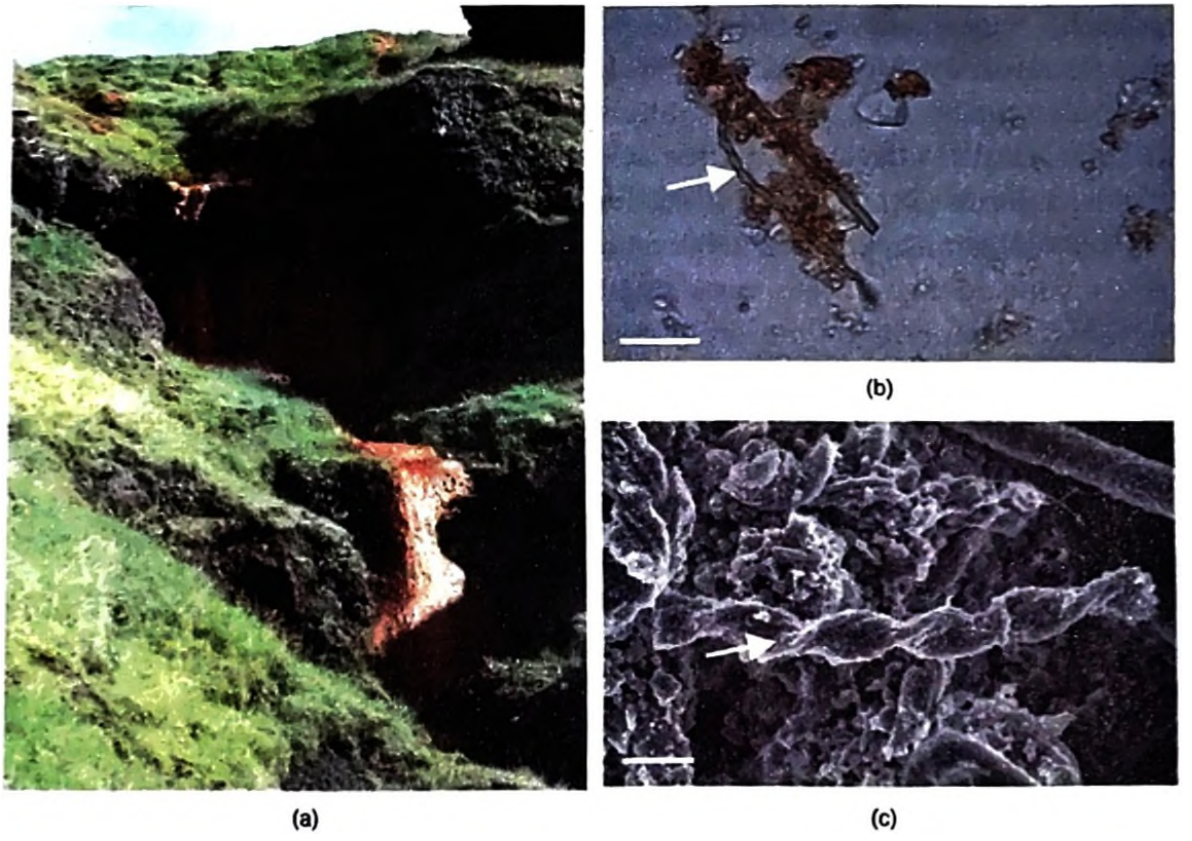
Şekil 5.11 Kükürt metabolizmasında yaygın rol oynayan, derin okyanuslardaki Beggiatoa*'nın (ortada) beyaz tabakaları. Kırmızı işaretler, görüntüyü çeken derin deniz dalgıçlarının lazer işaretleyicileridir* (Kaynak: NOAA).

5.9.3 Demir Oksitleyiciler

Metaller bazı organizmalar için substrattır. Bir grup kemoototrof demir oksitleyicilerdir. Fe^{2+} (ferröz demir) genellikle nötral pH'da kararsızdır ve hızla pas ve diğer bileşikleri oluşturan Fe^{3+}'e (ferrik demir) oksitlenir. Bunun-

la birlikte asidik pH'da, asidik ortamlarda bulunan *Acidithiobacillus ferrooxidans* gibi demir oksitleyici organizmaların yaygın varlığını dikkate alırsak, nispeten kararlıdır. Bu asidofiller termodinamik uçlarda yaşarlar. Redoks çiftinden enerji almada sadece %20 etkilidirler ve oksijen ile demir oksidasyonundan elde edilen enerji çok düşüktür, bu da 35 kJ mol^{-1} seviyesinde enerji verimine yol açar (aerobik solunumda 2879 kJ mol^{-1}). Sonuçta 1 mol glikoz üretmek için 100 mol Fe^{2+}'ye ihtiyaç duyarlar. Demir toksisitesinin önlenmesinde rol oynadığı düşünülen dikkat çekici saplar oluşturan *Gallionella* gibi bazı organizmalar, nötral pH'da demir oksidasyonunu başarabilir (Şekil 5.12). Demir oksidasyonu için enerji verimi asidik pH'a kıyasla nötr'e yakın pH'da daha yüksek olmasına rağmen, bu koşullar altında indirgenmiş demirin gerçekte bir enerji kaynağı olarak ne ölçüde kullanıldığı konusunda hala bazı tartışmalar vardır.

Demir oksidasyonu, anaerobik koşullar altında da gerçekleştirilebilir. Demir oksidasyonunu, elektron alıcısı olarak nitratın indirgenmesiyle birleştirebilen türler (anaerobik demir oksitleyiciler) bildirilmiştir. Bu reaksiyon Tablo 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 (a) İzlanda'da, bir dere yatağında oluşan parlak kırmızı bileşiklerde demir oksidasyonu ve demir döngüsünün belirgin olduğu bir ortam. Akarsu 1 m çapındadır. (b) Gallionella*'nın ürettiği karakteristik spiral yapıları gösteren (beyaz ok), ışık mikroskobunda çekilen bir görüntü. Ölçek çubuğu 10 µm'dir. (c) Bu yapılar, bir elektron mikroskobunda mümkün olan daha yüksek büyütmelerde çok daha ayrıntılı olarak görülebilir (beyaz ok). Ölçek çubuğu 2 µm'dir. Sapların demir toksisitesinin azaltılmasında bazı rollerinin olduğu öne sürülmüştür.*

Genellikle çevrede bu organizmalar oksitlenmiş demiri ferröz demire indirgeyen ve böylece demirin hem biyolojik olarak oksitlendiği hem de indirgendiği bir demir döngüsü oluşturan anaerobik demir indirgeyici bakterilerle (örneğin *Geobacter*) birlikte bulunur.

5.9.4 Azot Döngüsü ve Kemoototroflar

Anaerobik solunuma baktığımızda, denitrifikatörlerin nitrat gibi oksitlenmiş bileşikleri nasıl amonyum veya azot gazı ve diğer ara maddelere dönüştürdüğünü gördük. Azotlayıcılar, amonyumu (NH_4^+; nötr pH'da) alıp nitrite ve daha sonra nitrata dönüştüren –esasen daha önce gördüğümüz reaksiyonların tersini gerçekleştiren (azot gazı ilk önce azot sabitleyici bakteriler tarafından amonyuma sabitlenir)– kemoototrofik organizma gruplarıdır.

Azotlayıcı kemoototrofik organizmalar, tutuklanmış azot bileşiklerinin bulunduğu her ortamda, örneğin özellikle gübre akışının biriktiği yerlerde veya kıyıya yakın besinlerin bulunduğu kıyı bölgelerinde, bol miktarda bulunur. İki grup organizma baskındır; amonyumu nitrite oksitleyenler (*Nitrospira* ve *Nitrosomas*'ı içeren) ve nitriti nitrata dönüştürenler (*Nitrobacter* ve *Nitrococcus* gibi).

5.10 Işıktan Gelen Enerji: Oksijenik Fotosentez

Şimdi, yıldız ışığını kullanarak enerji elde eden ve her yerde bulunan bir enerji kazanım yoluna –fotosenteze– geçiyoruz. İki tür fotosentez vardır. Anoksijenik fotosentez oksijen üretmez. Oksijenik fotosentez oksijen üretir. Oksijenik fotosentez yapan organizmalar arasında siyanobakteriler, algler ve bitkiler bulunur (Şekil 5.13).

Oksijenik fotosentez, aşırı abartıya kaçmadan, muhtemelen gezegendeki en önemli metabolizma olarak tanımlanabilir. Dünyadaki biyokütlenin çoğunu üretir ve her yıl büyük miktarda CO_2'yi karbon bileşiklerine sabitler –net miktar olarak yaklaşık 260 milyar ton CO_2 sabitlenir. Ayrıca aerobik solunum ve kemoototrofik reaksiyonlar dâhil olmak üzere çok çeşitli metabolizmalar için son elektron alıcısı olarak işlev gören oksijeni sağlar. Daha sonra göreceğimiz gibi, muhtemelen aerobik solunuma bağlı olan çok hücreli hayvanların ortaya çıkışına izin vermekten de sorumludur. Hayvanlar aerobik solunum yapmak için atmosferde yaklaşık %10 oranında oksijene ihtiyaç duyar.

Bu olağanüstü metabolizma biçimi nasıl çalışır? Oksijenik fotosentez süreci, aydınlık ve karanlık evre reaksiyonları olmak üzere iki kısma ayrılabilir. Adından da anlaşılacağı gibi, aydınlık evre reaksiyonları bir yıldızdan fotonların yakalanmasını içeren tepkimelerdir, karanlık evre reaksiyonları ise ışık gerektirmez ve CO_2'yi karbon bileşiklerine sabitleyen tepkimelerdir.

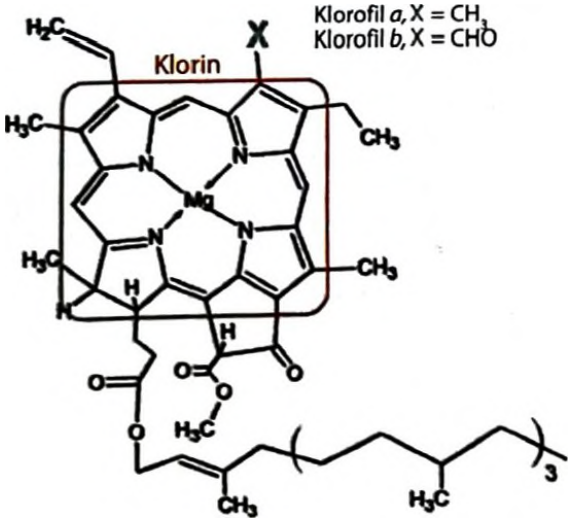
Oksijenik fotosentez

$6CO_2 + 12H_2O^* + 48$ foton $\rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O^*_2$



Şekil 5.13 Fotosentez reaksiyonu. Yıldız, oksijenin su moleküllerinden geldiğini gösterir. Aşağıda oksijenik fotosentez yapanlara bazı örnekler verilmiştir. Sol üstten: Siyanobakteriler (Lyngbya), *algler* (Botryococcus braunii; Kaynak: wiki–commons, Neon ja), *kaktüs* (Parodia microsperma; Kaynak: wikicommons, Dake) *ve lale ağacı* (Liriodendron tulipifera).

Önce aydınlık evre reaksiyonlarını ele alalım. Fotosentez ışığa duyarlı pigmentler, klorofiller, kullanılarak ışığın yakalanmasıyla çalışır (Şekil 5.14). Bunlar, klorinler adı verilen bir molekül sınıfına ait büyük düzlemsel moleküllerdir. Klorofiller, belirli ışık ortamları için gelişmiştir; oksijenik fotosentezde en yaygın olanı, tayfın kırmızı bölgesinde 665 nm'de ışığı ve aynı zamanda 430 nm'de mavi ışığı emen klorofil *a*'dır. Bu kırmızı ve mavi ışığın soğurulması ve yeşil ışığın yansıması, oksijenik fotosentetik organizmalara yeşil renk veren şeydir.



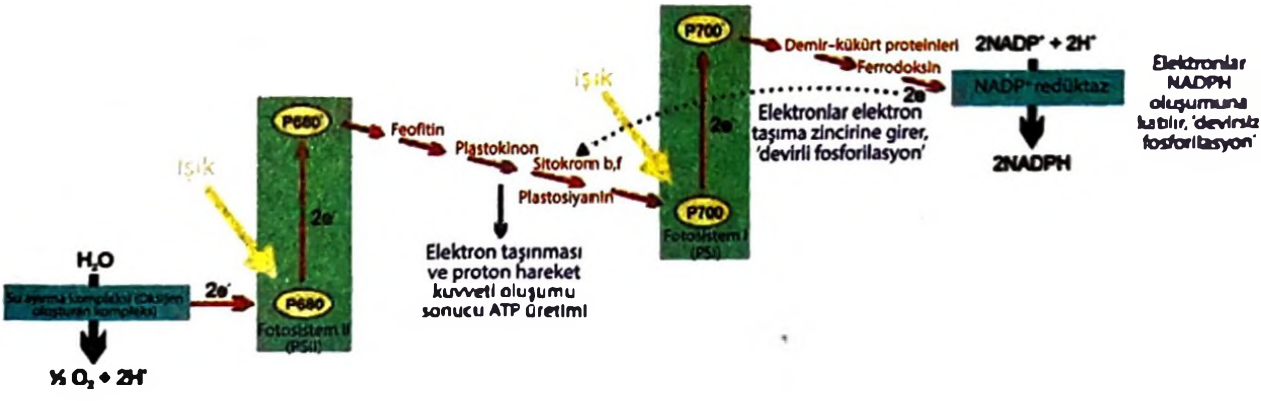
Şekil 5.14 Klorofilin yapısı. Klorofil a *ve* b *olmak üzere iki türe yol açan yan grup gösterilmiştir. Yapının altındaki köşeli parantezler tekrar eden bir birimi belirtir.*

Birçok organizmada klorofille ek olarak, mavi ve yeşil ışığın yakalanmasında rol oynayan bir karotenoid olan beta–karoten;

yaklaşık 550 nm'de ışığı soğuran kırmızı bir pigment olan fikoeritrin; ve en fazla yaklaşık 620–640 nm'de ışığı soğuran fikosiyanin gibi yardımcı pigmentler bulunur. Tüm bu pigmentler çok özel olarak düzenlenmiştir. Klorofiller ve yardımcı pigmentler, fotonları reaksiyon merkezleri içinde hapseden 300'e kadar molekül içeren antenler şeklinde yapılandırılmıştır. Oksijenik fotosentezde iki tür reaksiyon merkezi vardır. Fotosistem I (PSI) ışığı 700 nm'de ve fotosistem II (PSII) 680 nm'de optimum şekilde soğurur.

Bu ışık güdümlü sistemin, daha önce tartıştığımız tüm enerji elde eden sistemlerde olduğu gibi, bir elektron kaynağına ihtiyacı vardır. Fotosentezde gerekli elektronlar sudan gelir (Şekil 5.15). Su, su ayırma kompleksinde ayrılır. Her su molekülü ayrımı iki elektron üretir. Elektronlar PSII'deki reaksiyon merkezi olan P680'e aktarılır. Reaksiyon merkezleri tarafından yakalanan fotonlar, P680'deki elektronlara enerji verir ve magnezyumun yerini hidrojenin aldığı bir klorofil molekülü olan feofitinin indirgenmesine izin verir. Elektronlar daha sonra plastokinondan bir sitokroma ve nihayetinde bakır içeren bir proteine – plastosiyanin– veya fonksiyonel olarak eşdeğer bir protein olan sitokrom c6'ya geçer (kinon içerdiğinden dolayı bazen 'Q döngüsü' olarak adlandırılır). Bu süreçte ATP üreten bir proton hareket kuvveti oluştururlar. Bu elektronlar daha sonra zincirdeki bir sonraki fotosistemine (PSI) aktarılır.

PSI'de, ışık yine P700 reaksiyon merkezinde elektronları uyarmak için kullanılır, bu daha sonra uyarılmış bir elektronu demir kükürt proteinlerine aktarır. Elektronlar sonunda, ferrodoksin aracılığıyla tekrar ATP oluşumu için bir proton hareket kuvveti oluşturacak şekilde elektron taşıma zinciri boyunca aktarılır (Şekil 5.15). Bu elektronlar P700'e geri dönebilir ve başka bir ATP üretimi turuna başlayabilir. Buna devirli fosforilasyon denir. Bununla birlikte, başka bir yol daha vardır: devirsiz fosforilasyon. Bu yol proton hareket kuvveti üretimini içermez. Bunun yerine, elektronlar NADPH (nikotinamid adenin dinükleotid fosfat) oluşturmak için elektron alıcısı $NADP^+$ tarafından alınır. Bu molekül, bitki tarafından alınan CO_2'nin şekere dönüştürülmesinde rol oynayacaktır.



Şekil 5.15 Oksijenli fotosentezin 'Z' şeması (Kaynak: Charles Cockell).

Az önce tartıştığımız iki aşamalı süreç, fotosentezin 'Z' şeması olarak tanımlanır ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Elektronların PSI'dan *önce* PSII'ye geçtiğini göreceksiniz. Adlandırma tarihin bir cilvesidir. Fotosistem I fotosistem II'den önce keşfedildi.

Fotosentezin son kısmı karanlık evre reaksiyonlarıdır. ATP aydınlık evre reaksiyonlarında üretildikten sonra, CO_2'nin organik moleküllere sabitlenmesine katkıda bulunabilir. Oksijenik fotosentezde bu yol Calvin döngüsüdür. CO_2, **Rubisco** (ribuloz bifosfat karboksilaz/oksijenaz) adı verilen bir enzim tarafından alınır ve glukoz veya diğer organik karbon bileşiklerini sentezlemek için kullanılan bir molekül olan glukoz–6–fosfat üretmek için ATP'nin kullanıldığı bir dizi enzimatik tepkime aracılığıyla dönüştürülür. Diğer yollar indirgeyici sitrik asit döngüsü, ribuloz monofosfat yolu ve serin yolunu içerir, ancak hepsi aynı sonuca ulaşır –CO_2 gazının (veya sulu ortamda bikarbonat iyonlarının, HCO_3^-) karbon bileşiklerine sabitlenmesini sağlamak için aydınlık evre reaksiyonlarının ürünlerinin kullanımı.

5.11 Anoksijenik Fotosentez

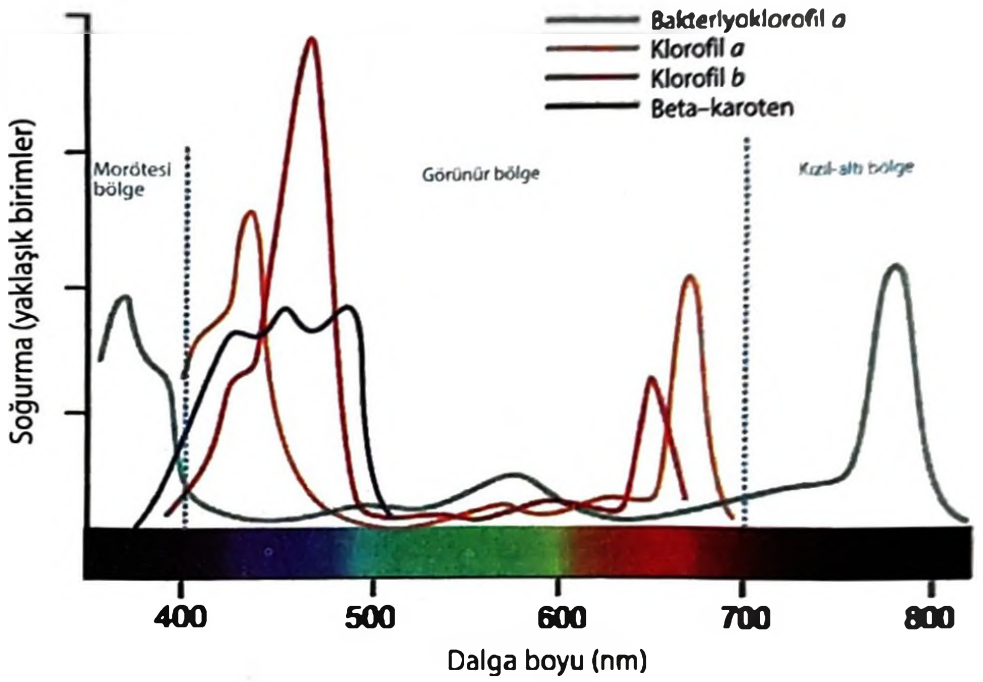
Yıldız ışığından enerji eldesi sağlamak için suyu elektron kaynağı olarak kullanmayan fotosentetik organizmalar da vardır. Kullandıkları sürece **anoksijenik fotosentez** denir. Bu süreç muhtemelen oksijenik fotosentezden çok daha eskidir, ancak evrensel öneme sahip olan ve en yaygın görülen fotosentez türüyle ilgilenmek adına önce oksijenik fotosenteze baktık.

Anoksijenik fotosentez, aşağıdakileri içeren çeşitli organizmalarda görülür: yeşil kükürt bakterileri (örn. *Chlorobium*), yeşil kükürt kullanmayan bakteriler (ör. *Chloroflexus*), mor kükürt bakterileri (ör. *Chromatium*), mor kükürt kullanmayan bakteriler (örn. *Rhodobacter*).

Oksijenik fotosentezi anoksijenik fotosentezden ayıran çeşitli özelliklerin bir listesi vardır, ancak burada bazı önemli farklılıklar vurgulanacak.

İlk olarak, bu süreç fotosistem II'den (PSII) yoksundur. Bunun yerine sadece fotosistem I (PSI) gibi bir fotosistemi var ve bu fotosistemi kullanarak devirli fosforilasyon yapıyorlar. Bu fotosistem PSI gibidir, çünkü kendisi elektronları sudan çıkaramaz. Suyun ayrışmasından elektron almak yerine, hidrojen, hidrojen sülfür, kükürt elementi, indirgenmiş demir veya organik moleküllerden elektronlar gelir (oksijen üretmediklerinden dolayı anoksijenik fotosentez).

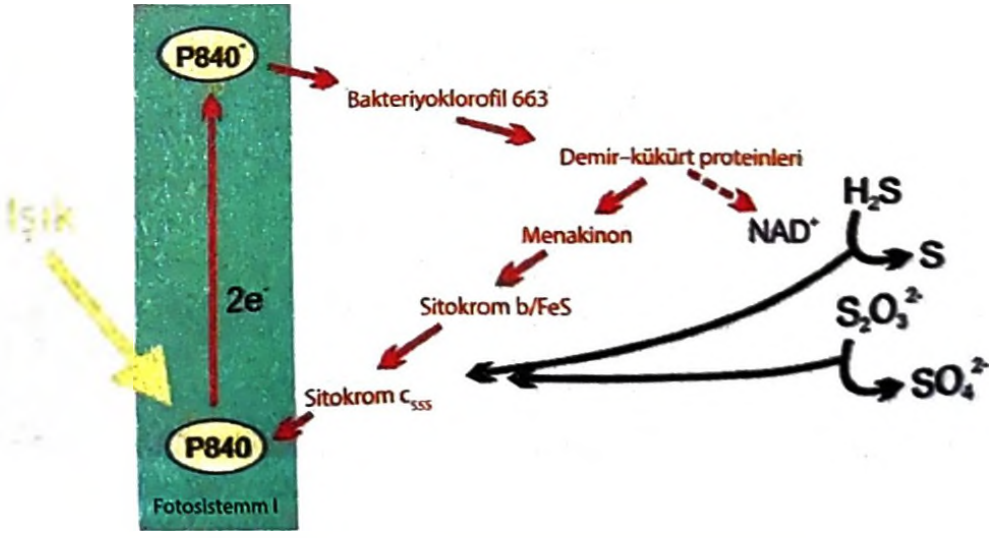
İkincisi, klorofillere göre daha uzun dalga boylarında ışığı soğuran **bakteriyoklorofil** adı verilen çok farklı pigmentlere sahiptirler. Örneğin bakteriyoklorofil *a*, polar organik çözücülerden çıkarıldığından, tipik olarak 364 ve 770 nm'de maksimum soğurmaya sahiptir (Şekil 5.16), hatta mor bakteriler ve yeşil kükürt bakterileri gibi canlı hücrelerde maksimum soğurma değeri genellikle 830–890 nm'dir. Canlı mor bakterilerdeki bakteriyoklorofil *b*, 835–850 nm ve 1020–1040 nm'de maksimum soğurma değerlerine sahiptir. Diğer dalga boyları



Şekil 5.16 Bazı fotosentetik pigmentlerin soğurma tayfları.

hem çökeltilerdeki hem de bu çökeltilerin üzerindeki oksijenik fotosentez yapan canlılar tarafından soğulurken bu dalga boyları, yukarıda bahsi geçen organizmaların çökeltiler ve mikrobiyal "tabakalarda" bulunan habitatlarına uygundur.

Anoksijenik fotosentez döngüsünün iyi bir örneği, yeşil kükürt bakterileri için verilen Şekil 5.17'de görülebilir. Fotosistem P840'da bakteriyoklorofil, ışıkla daha yüksek bir seviyeye uyarılır, demir-sülfür proteinleri ve sitokromlar

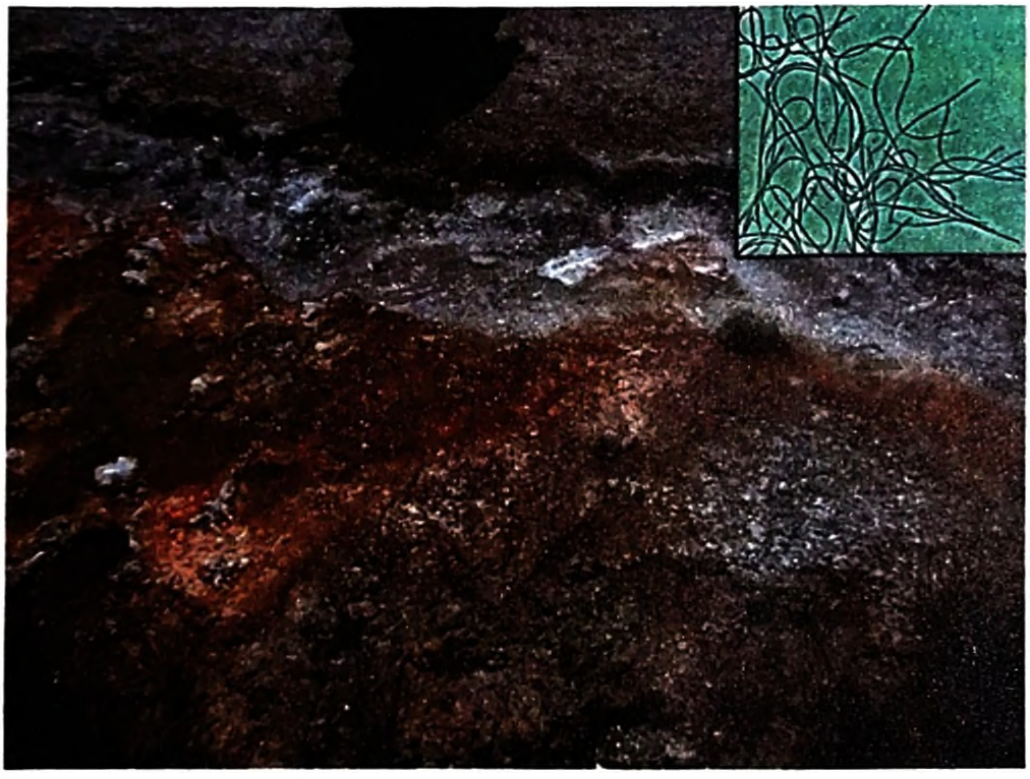


Şekil 5.17 Yeşil kükürt bakterilerinde devirli fosforilasyon. Elektron vericileri, oksijenik fotosentezdeki suyun aksine (Şekil 5.15), kükürt bileşikleridir (siyah reaksiyon şemaları) (Kaynak: Charles Cockell).

devirli fosforilasyonda reaksiyon merkezine geri döner, çünkü ek elektronlar sülfid indirgemesiyle sağlanır (Şekil 5.17). Ek elektronlar gereklidir, çünkü devirli fosforilasyon daimî olarak hareket halinde değildir. Sızıntı, yenilenmesi gereken elektron kaybına neden olur.

Chlorobium gibi yeşil kükürt bakterileri katı anaerobik fototroflardır ve fotosentez yapmak için sülfüre ihtiyaç duyarlar. Genellikle derin çökeltilerde veya mikrobiyal tabakaların altında bulunurlar. Organizmalar, hücrelerinin içinde biriktikleri sülfürden kükürt elementi üretir. Sülfür sınırlıysa, kükürt elementini sülfata oksitleyebilirler ve enerji üretirler.

Yeşil kükürt kullanmayan bakteri popülasyonunu, kaplıcalarda yaşayan termofiller olan *Chloroflexus* gibi organizmalar oluşturur (Şekil 5.18). Kaplıca kenarları etrafında, karışık filamentli büyümeleriyle bir arada tutulan ayırt edici tabakalar oluştururlar. Bu organizmalar, metabolik olarak oldukça yeteneklidirler, aminoasitler gibi basit organik bileşikler üzerinde fotoheterotrofik olarak büyüyebilir veya fotosentez için elektron vericisi olarak kükürt, sülfit ve indirgenmiş demir kullanabilirler. 740 nm'de maksimum soğurmaya sahip olan bakteriyoklorofil *c*'ye sahiptirler.



Şekil 5.18 Yellowstone Milli Parkındaki mikrobiyal tabakalar arasında, kahverengi bir mikrobiyal tabaka oluşturan anoksijenik fotosentez yapan Chloroflexus *bulunur. Görüntü yaklaşık 1 m. İç kısımda (tabakaların oluşumuna neden olan) lifli organizmanın bir mikrografisi görülebilir. Filamentlerin genişliği yaklaşık 1–2 µm'dir* (Kaynak: ana görüntü, Ay ve Gezegen Enstitüsü; iç metin, Sylvia Herter, Ortak Genom Enstitüsü).

Chromatium gibi mor kükürt bakterileri, uzun dalga boyu çeşitlerine sahip bakteriyoklorofillere (örn. *a* ve *b*) ve kısa dalga boyundaki radyasyonu (450 ila 550 nm arasında) soğuran çeşitli kırmızı ve mor pigmentlere sahiptirler. Karotenoidlerin kısa dalga boyundaki ışığı yakalayabilmesi, kızıl-altı ışığın filtrelenebileceği derin sularda ve çökeltilerde yaşamalarına izin verir. Organizmalar yine çok yönlüdür ve elektron vericisi olarak hidrojen, tiyosülfat veya indirgenmiş demir kullanabilirler. Bazıları kemoototrofik olarak büyüyebilirken diğerleri (*Thiocapsa* gibi) mevcut organik maddelerden beslenerek heterotrofik olarak büyüyebilir. Yeşil kükürt bakterileri gibi, hücre içinde kükürt biriktirebilirler. Sülfür sınırlı olduğunda bunu sülfata oksitleyerek elektron vericisi olarak kullanabilirler.

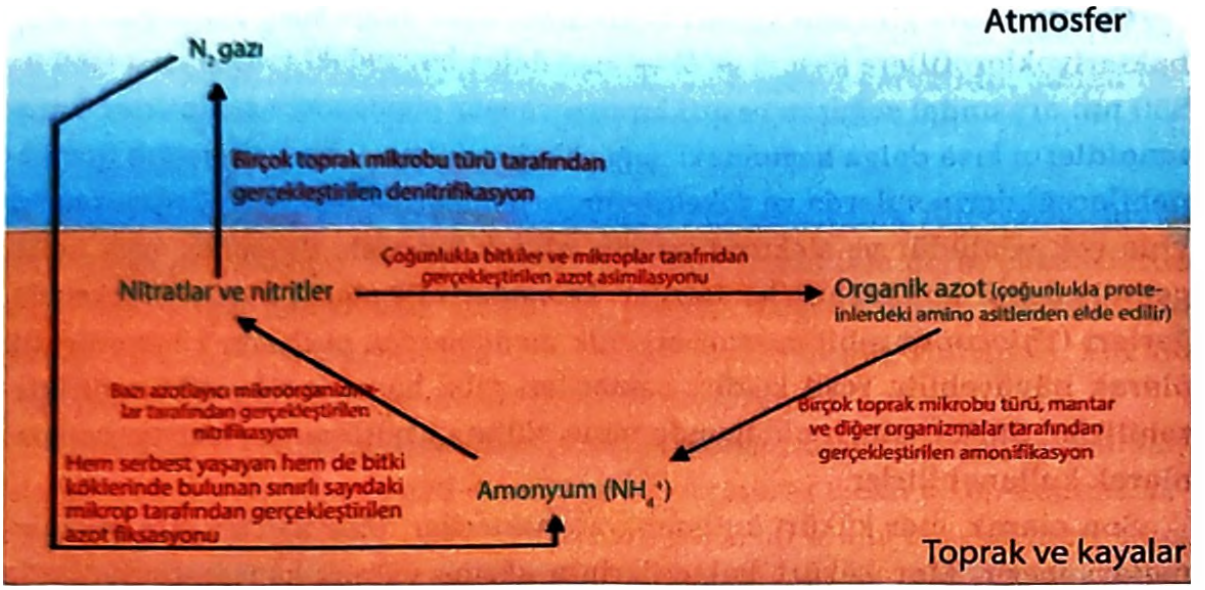
Son olarak, mor kükürt kullanmayan bakteriler *Rhodobacter* gibi organizmaları içerir. Mor kükürt bakterilerinin aksine yüksek konsantrasyonlarda sülfür içinde yaşayamamaları, mor kükürt bakterilerinden farklı habitatlarda yaşamalarını gerektirirler. *Rhodobacter* elektron vericisi olarak indirgenmiş demir ve hidrojeni kullanabilir. Bazı türler, anoksijenik fotosentez sonucunda hücre dışında kükürt elementi üretebilir. Aynı zamanda organik maddeleri metabolize edebilir ve abiyotik olarak çevreden sağlanması gereken veya karmaşık makromoleküler organiklerin diğer heterotroflar tarafından parçalanmasıyla üretilen basit organik bileşikler kullanarak fotoheterotrofik olarak büyüyebilirler. Bir mikropun atık ürünlerinin bir başka mikrop için besin olduğu duruma sintrofi diyoruz.

Bir de, genetik olarak önceki organizma gruplarından farklı olan ve fotoheterotrofi yapabilen *Heliobacteria*'nın bütünlüğünden bahsetmeliyiz.

5.12 Evrensel Biyokimyasal Döngüler

Farklı metabolizmalar çeşitlerini inceledik, ancak demir oksitleyiciler ve indirgeyicileri tartıştığımızda olduğu gibi, bu metabolizmaların kombinasyonu döngülere neden olur. Kükürt, kükürt bakterileri tarafından sülfata oksitlenir, sülfat anaerobik solunum yapan organizmalar (veya sülfatı indirgemek için elektron verici olarak hidrojen kullanan kemoototroflar) tarafından kükürt bileşiklerine geri indirgenir. Karbon kemoheterotroflar tarafından karbondioksite parçalanır, karbondioksit ototroflar vb organizmalar aracılığıyla karbon bileşiklerine sabitlenir.

Enerji ve karbon ihtiyacının yönlendirdiği bu dönüşümler gezegenimizi derinden değiştirdi. Mikroplar oksidasyon durumlarını ve çözünürlüğü değiştirerek elementleri harekete geçirir, yeni minerallerin oluşumuna neden olur ve atmosferi büyük ölçüde değiştirir. Kitabın ilerleyen kısımlarında bu değişikliklerin bazıları hakkında daha fazla bilgi edineceğiz, ancak şimdilik azotu düşünelim (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Dünya üzerindeki gezegensel ölçekli biyolojik azot döngüsü (Kaynak: Charles Cockell).

Her yıl yaklaşık 160 milyon ton azot gazı bakteriler tarafından doğrudan atmosferden amonyağa sabitlenir. Bu, hem serbest yaşayan azot sabitleyici bakteriler (örn. *Azotobacter* ve *Azospirillum*) hem de baklagillerin köklerinde bulunan simbiyotik azot sabitleyiciler (örn. *Rhizobium* ve *Bradyrhizobium*) tarafından yapılır. Ayrıca, besin açısından fakir tropikal ve subtropikal sularda *Trichodesmium* ve tropikal sularda *Crocosphaera* gibi siyanobakteriler azot fiksasyonuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Azot fiksasyonu, bir kofaktör olarak demir ve molibden veya vanadyum içeren bir enzim olan nitrojenaz kullanılarak gerçekleştirilir. Bu, çok fazla enerji tüketen bir süreçtir. Bir N_2 molekülünü ayırmak için yaklaşık 16 ATP molekülü gereklidir.

Azot bu şekilde sabitlendikten sonra, daha önce tartışıldığı gibi nitrifikasyonda diğer azot bileşiklerine dönüştürülür. Örneğin, amonyum (NH_4^+), *Nitrosomonas* gibi organizmalar tarafından nitrite (NO_2^-) sabitlenir ve daha sonra *Nitrobacter* gibi organizmalar tarafından kemoototrofik enerji ve karbon alımında nitrata (NO_3^{2-}) dönüştürülür.

Bu şekilde üretilen nitrat, organik azota indirgenebilir ve belirli *Pseudomonas* ve *Bacillus* türleri de dâhil olmak üzere birçok mikrobiyal tür tarafından yapılan asimilatör nitrat indirgenmesiyle biyokütleye dâhil edilebilir.

Sonunda azot atmosfere geri döner. Bu, daha önce gördüğümüz gibi anaerobik solunum yapan organizmalar (kemoheterotroflar) tarafından gerçekleştirilen denitrifikasyon reaksiyonlarında meydana gelir. Böylece, azot fiksasyonunda kemoototrofi ve kemoheterotrofinin büyük gezegensel bir döngüsünün parçası olarak çalıştığını görüyoruz (Şekil 5.19). Bu döngünün denitrifikasyon sırasında üretilen bazı ürünleri (örn. N_2O gazı), spektroskopi kullanılarak Güneş Sistemi dışındaki gezegenlerde yaşamı tespit etmeye yönelik bir araç olarak umut vaat eden biyo-işaretçi gazlar olarak kabul edilir.

Bir o kadar değerli olan bir başka döngü ise karbon döngüsüdür. *Litosfer* ağırlık olarak sadece %0,032 karbondur, ancak karbon litosfer ve atmosfer içerisinde döngüye uğrayarak devasa bir ölçekte çevrilir. Yıllık toplam 260 milyar tondan fazla atmosferik CO_2 fotosentezle sabitlenmektedir. Fiksasyonun çoğu deniz ortamlarında gerçekleşir. Bu sürecin ölçeği, Calvin döngüsünde yer alan Rubisco'nun Dünya üzerindeki en bol protein olması gerçeğini açıklar. Karbonun Dünya üzerindeki dağılımı öğreticidir. Okyanuslar yaklaşık 38.500 milyar ton karbon içerir, ancak litosfer karbonatlar ve kerojenler içinde sıkışmış 70.000 trilyon tondan fazla karbon içerir. Fosil yakıtlar (kömür ve petrol dâhil) 4100 milyar tonluk nispeten düşük karbon miktarına sahip olmasına rağmen, bu ve diğer havuzlara kıyasla atmosferdeki toplam 720 milyar ton karbon oldukça az bir miktardır. Bu nedenle jeosfer ve biyosfer (insan kaynaklı değişiklikler dâhil) ile karşılaştırıldığında atmosferik kaynakların ve çukurların dengesindeki değişiklikler, CO_2 ve CH_4 gibi, karbonun atmosferik içeriğini önemli ölçüde değiştirebilir ve en sonunda iklimi etkilerler.

Tartışma Noktası: Fotosentezden bağımsız yaşam

İncelediğimiz enerji elde etme sistemlerinin çoğu nihayetinde oksijenli fotosenteze bağlıdır. Aerobik solunum ve bazı kemoototrofik organizmalar dâhil olmak üzere elektron alıcısı olarak oksijen kullanan organizmalar, yeterli konsantrasyonlarda oksijen üretmek için oksijenli fotosenteze bel bağlarlar. Fotosentez tarafından üretilen organik madde, elektron vericisi olarak organik maddeleri kullanan çoğu kemoheterotrofik metabolizmayı güçlendirir (bununla birlikte abiyotik organikler, Bölüm 9'da göreceğimiz gibi başka bir kaynak sağlayabilir). Tamamen fotosentezden bağımsız olarak çalışabilen ekosistemlerin çok az açıklaması olmuştur. Böyle bir sistem, organizmaların serpentinizasyondan üretilen hidrojeni kullanacağı derin kayalarda olabilir; buradaki mineraller (olivin gibi), aşağıdaki reaksiyonda hidrojen yapmak için suyla reaksiyona girer:

$$3Fe_2SiO_4 + 2H_2O \rightarrow 2F_3O_4 + 3SiO_2 + 2H_2$$

Olivin + Su → demir oksit + silikat + hidrojen

Hidrojen daha sonra metan üretmek için, elektron alıcısı olarak karbondioksitle birlikte, bir elektron vericisi olarak kullanılabilir (*metanojenler*).

Kitapta daha sonra yaklaşık 2,4 milyar yıl önce oksijen konsantrasyonlarının nasıl dramatik bir şekilde arttığını göreceğiz. Oksijenin bu yükselişinin ışığında, bugün Dünyada oksijenin jeokimya ve dolayısıyla yaşam için enerji kaynakları üzerindeki etkisinden arınmış birçok ortam olduğunu düşünüyor musunuz? Eğer öyleyse, nerede olurlardı? Çeşitli mikrobiyal redoks çiftlerini yazın. Bu redoks çiftlerinde kullanılan elektron verici ve alıcıların oksijenik fotosentez sonucu oluşan oksijene veya oksijenik fotosentezden kaynaklanan oksitlenmiş koşullar sonucu oluşan oksitlenmiş bileşiklere bağlı olup olmadığına karar verin.

McCollom, T.M., Shock, E.L. (1997) Geochemical constraints on chemolithoautotrop-

hic metabolism by microorganisms in seafloor hydrothermal systems. *Geochimica Cosmochimica Acta* **61**, 4375–4391.
Shock, E.L. (1997) High temperature life without photosynthesis as a model for Mars. *Journal of Geophysical Research* **102**, 23687–23694.
Stevens, T.O., McKinley, J.P. (1995) Lithoautotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers. *Science* 270, 450–455.
Anderson, R.T., Chapelle, F.H., Lovley, D.R. (1998) Evidence against hydrogen-based microbial ecosystems in basalt aquifers. *Science* 281, 976–977.

5.13 Mikrobiyal Tabakalar – Yaşamda Enerji Odaklı Bölgeleme

Çamurlu su birikintileri kuruduğunda, bazen çamurun yüzeyinde yeşil bir film olduğunu fark etmiş olabilirsiniz. Bu mikrop katmanları, Amerika Birleşik Devletleri Yellowstone Ulusal Parkı gibi yerlerde kaplıcaların çevresinde de görülür. Mikropların filmleri, bir anlamda yüzeyi bir çapa olarak kullanarak, mikropların yapışabileceği ve sabit bir topluluk oluşturabileceği kaya veya toprak gibi yüzeylerle ilişkilendirilme eğilimindedir. Bu mikrop katmanlarına **biyofilm** denir ve daha kalın olanlar **mikrobiyal tabakalar** olarak adlandırılır. Her iki durumda da genellikle birden fazla mikrop türü içerirler ve genellikle yapı içinde farklı seviyelerde farklı mikropların bulunduğu net bir içyapı vardır. Bu katmanlar bazen, bazı mikropların atık ürünlerinin diğerleri için besin kaynağı olduğu **sintrofide** bu organizmalara karşılıklı yarar sağlar. Bu biyofilmler mikropların çoğunun tek başlarına izole bir şekilde değil de genellikle birbirlerinden fayda sağlayabilecekleri diğer mikroplarla birlikte topluluk halinde yaşadıklarını gösterir.

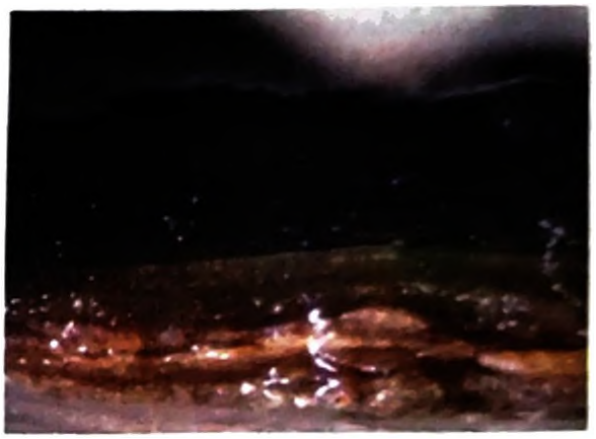
Biyofilmlerdeki mikroplar, kısmen biyofilm tarafından sağlanan koruma nedeniyle ve kısmen hücrelerin dış katmanları altındakileri koruduğu için aynı türün serbest yaşayan bireylerinden farklı özelliklere sahip olma eğilimindedir. Bu özellikler, bir yüzeye daha etkili bir şekilde yapışmalarını sağlayan polisakkaritlerin üretimini içerir. Tıbbi bağlamda bile önemi vardır, çünkü biyofilm oluşumu mikroorganizmaların antibiyotiklere karşı direncini arttırabilir ve insan vücudundan çıkarılmasını zorlaştırabilir.

Tabakaların içindeki mikroplar, esas olarak, özellikle enerji gereksinimlerine göre dikey katmanlar halinde sipariş edilir. Yüzeyde, oksijenli fotosentez yapan siyanobakteriler (Şekil 5.20) gibi fotosentetik mikroplar olabilir. Altlarında anoksijenik fotosentez yapan bakteriler ve bunların altında diğer fotosentetik olmayan metabolizmalar vardır. Yüzey tabakaları genellikle UV radyasyon tarama pigmentleri dâhil pigmentlerle doludur.

Oksijen tabakanın içine doğru ilerlerken, aerobik solunum yapan mikroplar tarafından tüketildiği için seviyesi düşer. Alt kısımlarda kemootrofi veya anaerobik solunumun meydana geldiği bir bölgeye geçiş yapıyoruz. Hammaddelerin ve enerji kaynaklarının mikroplar tarafından bir derinlikte kullanıl-

ması, altında veya üstünde büyüyen mikroplar için kullanılabilirliklerini etkileyecektir. Sadece belirli türler tabakanın belirli derinliklerinde gelişecek ve böylece bir dizi mikrop katmanı oluşacaktır.

Mikrobiyal tabakalar astrobiyologlar için önemlidir, çünkü mikroskopik yaşamın makroskopik bir tezahürüdür ve antik kayalarda bulunması nispeten kolaydır. Erken Dünyanın fosil kayıtlarında tabakalar (**stromatolitler**) için kanıtlar önerilmiştir (Bölüm 12). Ayrıca, tabakalar içindeki biyojeokimyasal döngüler, gezegen ölçeğinde meydana gelen biyojeokimyasal döngünün bir mikro kozmozu olarak kabul edilebilir. Bir mikrobiyal tabakada neler olup bittiğini inceleyerek, enerjinin ve besin maddelerinin gezegen ölçeğinde nasıl çevrildiğini öğreniriz.



Şekil 5.20 Üstte çeşitli pigmentler içeren koyu fotosentetik katmanlar ve altında beyazımsı katmanlar olarak görünen diğer metabolizmalar bulunan iyi düzenlenmiş katmanlarda bulunan tipik enerji metabolizmalarını gösteren bir mikrobiyal tabakadan bir kesit. Burada gösterilen kalınlık yaklaşık 1 cm'dir (Kaynak: wikicommons Botanik Bahçesi, Delft Teknoloji Üniversitesi).

5.14 Enerjinin Termodinamikleri ve Yaşam

Yaşamın kullandığı çeşitli metabolizmalara baktık. Şimdi, bu tür reaksiyonlardan elde edilen enerji verimlerini nasıl ölçebileceğimizi düşünmemiz gerekiyor, böylece yaşamın geçimini sağlamak için enerjiyi nasıl kullanabileceğini ve zorlu ortamlardaki metabolizmalardan elde dilen farklı enerji verimlerini nasıl karşılaştırabileceğimizi kavrayabiliriz. Dünyanın ötesinde, bir ortamı yaşam için makul bir yer olarak değerlendirmek isteyebiliriz. Bunu yapabilmemizin bir yolu, farklı teorik elektron vericileri ve alıcıları kullanarak ne kadar enerji sunabileceğini ve dolayısıyla yaşam için iyi bir yer olup olmayacağını incelemektir.

5.14.1 Gibbs Serbest Enerjisi: Reaktiflerdeki ve Ürünlerdeki Enerji

Herhangi bir redoks reaksiyonunda mevcut olan enerjiyi **Gibbs serbest enerjisi** olarak tanımlıyoruz.

Bir reaksiyonun Gibbs serbest enerjisini hesaplamanın bir yolu, reaktif ve ürünlerinde ne kadar enerjinin bulunduğuna bakmaktır. Bir kişi herhangi bir bileşik alırsa, o bileşiği yapmak için gereken enerjiyi bulmak mümkündür. Bu, oluşumun standart serbest enerjisidir, $\Delta G°_f$. Bunu bir tabloda görebilirsiniz ve size bileşiğin serbest enerjisiyle oluşturduğu elementlerden gelen serbest

enerji arasındaki farkı anlatır. Başka bir deyişle, eğer onu parçalayacak olursanız, o bileşikte ne kadar 'kullanılabilir' enerji olduğunu söyler.

Dolayısıyla, bir reaksiyon tarafından verilen veya alınan enerjiyi, sadece ürünlerdeki oluşumun serbest enerjilerinin toplamı ile içine giren reaktiflerin serbest oluşum enerjileri arasındaki fark olarak çözebiliriz. Bu bize bir reaksiyonda var olan net enerji farkını söylerdi.

Bu, Gibbs serbest enerjisi için basit bir şekilde verilen bir denklem formüle etmemizi sağlar:

$$\Delta G = \Sigma G_f^\circ \text{ (ürünler)} - \Sigma G_f^\circ \text{ (reaktifler)} \quad (5.2)$$

Reaksiyonda verilen genel enerjiyi elde etmek için ürünlerin oluşum enerjisini veya Gibbs serbest enerjisini [ΣG_f° (ürünler)] toplar ve işaretleri tutarlı tutmaya özen göstererek reaktiflerin [ΣG_f° (reaktifler)] serbest enerjisinin toplamını çıkarırız.

Şimdi bu ilişkiden, bazı temel çıkarımlar yapabileceğimizi görebilirsiniz:

- Serbest oluşum enerjileri eşit olduğunda ürünler ve reaktifler dengededir.
- Reaksiyonun toplam Gibbs serbest enerjisi negatifse, redoks çifti ekzergoniktir –reaktiflerde ürünlerden daha fazla enerji olduğu için enerji verir. Biyolojik olarak, reaksiyonun yaşam için enerji üretmeye elverişli olduğu anlamına gelir. Gibbs serbest enerjisi pozitifse, ürünler reaktiflerden daha fazla enerji içerir. Bu, reaksiyonun endergonik olduğu anlamına gelir –ürünleri yapmak için enerji gerektirir ve organizmalar reaksiyonu gerçekleştirmek için bir miktar ATP kullanmadığı sürece genellikle yaşam için uygun değildir.

5.14.2 Gibbs Serbest Enerjisi: Bileşiklerin Konsantrasyonları

Gibbs serbest enerjisini hesaplamanın başka bir yolu daha vardır ve bu da ürünlerin ve reaktiflerin konsantrasyonlarını kullanmaktır.

$aA + bB \leftrightarrow cC + dD$ (burada büyük harfler bileşiklerdir ve küçük harfler her birinin nispi miktarlarıdır) reaksiyonunun standart Gibbs serbest enerjisi:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln([C]^c[D]^d/[A]^a[B]^b) \quad (5.3)$$

Burada köşeli parantezler her bir bileşiğin konsantrasyonlarını gösterir veya:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{eq} \quad (5.4)$$

Burada K_{eq}, $[C]^c[D]^d/[A]^a[B]^b$ olarak verilen, reaksiyon denge sabiti, T sıcaklık ve R tek yönlü gaz sabitidir. Denge sabiti, sadece ilerleyen reaksiyonun hızının ters reaksiyonun hızına oranıdır.

Örnek olarak, aerobik solunum durumunda Gibbs serbest enerjisi, bu işlem için aşağıdaki reaksiyon kullanılarak belirlenebilir:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

Bu, Gibbs serbest enerjisini verir:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln([CO_2]^6[H_2O]^6 / [C_6H_{12}O_6][O_2]^6)$$

5.14.3 Gibbs Serbest Enerjisi: Redoks Reaksiyonlarını Kullanma

Bu iki yaklaşımın dezavantajları vardır. En dikkat çekici şekilde, reaksiyona katılan her bileşiğin oluşumunun Gibbs serbest enerjisini hesaplamak zahmetlidir. Aynı zamanda, özellikle biyolojik reaksiyonlar için, herhangi bir reaksiyonda farklı reaktiflerin ve ürünlerin tam konsantrasyonunu her zaman bilmiyoruz. Bu yüzden reaksiyonlardaki enerjiyi hesaplamanın alternatif bir yolunu düşünmeliyiz.

Reaksiyonları farklı bir şekilde düşünebiliriz: redoks reaksiyonları olarak. Bu reaksiyonların, yarı reaksiyon olarak yazılabileceğini hatırlayacaksınız:

Oksidasyon, elektronların çıkarılmasıdır ($S_d \rightarrow P_d + e^-$), yani elektron vericisinin reaksiyonudur (burada, ürün, P_d, haline gelmek için bir elektron veren substrat, S_d, gösterilir).

Redüksiyon, elektronların eklenmesidir ($S_a + e^- \rightarrow P_a$), yani elektron alıcısının reaksiyonudur (burada, substrat, ürün, P_a, haline gelmek için bir elektron alan substrat, S_a, gösterilir).

Enerji üretmek için canlılar tarafından kullanılan bir redoks reaksiyonu, indirgeyici ve oksitleyici bir yarım reaksiyona ihtiyaç duyar. Redoks reaksiyonlarının enerjisi, bu iki 'yarım reaksiyonun' birleşik elektriksel potansiyelleri olarak düşünülebilir.

Ayrıca, potansiyelleriyle ilgili çeşitli yarı tepkimeleri gösteren bir 'elektron kulesinde' kavramsallaştırabileceğimizi hatırlayacaksınız. Elektronları bırakma eğilimi daha güçlü olan reaksiyonlar kulede daha yüksektedir (daha negatif).

Tam bir reaksiyon için potansiyeli bulmak istiyorsak, iki yarım reaksiyonun elektrot potansiyeli arasındaki toplam farkı hesaplayabiliriz.

Ancak, toplam potansiyel farkının, ölçeğin negatif değerlerden pozitif olanlara gittiğini dikkate almamız gerektiğini unutmayın! Dolayısıyla, bir yarı reaksiyonun potansiyeli −1,2 V ve diğeri de −0,5 V ise, toplam reaksiyon potansiyeli bu iki yarı reaksiyon arasındaki fark olacaktır, yani 0,7 V. Ancak, bir reaksiyon −1,2 V ve diğeri +0,3 V ise, o zaman toplam reaksiyon potansiyeli 1,5 V'dur (sıfırın bir tarafında −1,2 V ve diğer tarafta +0,3 V; bu noktadan emin olmak için Şekil 5.6'ya bakın).

Bu fark E° olarak adlandırılır ve yarı reaksiyonların elektrot potansiyelindeki farktır.

Daha sonra Gibbs serbest enerjisinin aşağıdaki denklem tarafından verildiğini söyleyebiliriz:

$$\Delta G^\circ = -nFE^\circ \qquad (5.5)$$

ΔG° standart Gibbs serbest enerji değişimi, n mol cinsinden transfer edilen elektron sayısıdır (genellikle tablolarda bir mol olarak verilir). F Faraday sa-

biti (96,48 J $(V \cdot mol)^{-1}$] ve E° standart koşullar altında (25 °C) redoks potansiyel farkıdır.

E°'ı elektron aktivitesi veya pE° olarak da ifade edebiliriz. Standart metinlerdeki tablolarda sıklıkla verilen budur ve bazen p(ε)° olarak da gösterilir.

Elektron aktivitesi pH'a benzer. Ayrıca reaksiyon sabiti açısından şu şekilde ifade edilebilir:

$$\log K_{eq} = n(pE^\circ) \tag{5.6}$$

Ancak, Gibbs serbest enerjisinin şu şekilde ifade edilebileceğini söylediğimizi unutmayın:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{eq} \tag{5.7}$$

Böylece Gibbs serbest enerjisini şöyle ifade edebiliriz:

$$\Delta G^\circ = -2{,}303\, nRT(pE^\circ) \tag{5.8}$$

Burada 2,303 sabiti, doğal bir logaritmanın log'a dönüştürülmesinden gelir.

Bu özel denklem önemlidir, çünkü tablolarda yarı reaksiyonlar için verilen elektron aktivitelerini kullanarak ve standart koşullar altında olduğunu varsayarak Gibbs serbest enerjisini basitçe hesaplamamızı sağlar.

25 °C'de glukozun aerobik solunum örneğini düşünün. Yayımlanmış bir tablodan elde edilen ilgili iki yarı reaksiyonun (glukoz oksidasyonu ve oksijen redüksiyonu) pE° değerleri aşağıda verilmiştir (bunların Şekil 5.6'da gösterilen E^{o-} değerleriyle aynı olmadığını unutmayın):

Glukoz oksidasyonu

$$0{,}25CH_2O + 0{,}25H_2O = 0{,}25CO_2 + H^+ + e^- - 8{,}20 \tag{5.9}$$

Oksijen redüksiyonu

$$0{,}5O_2 + H^+ + e^- = 0{,}5H_2O + 13{,}75 \tag{5.10}$$

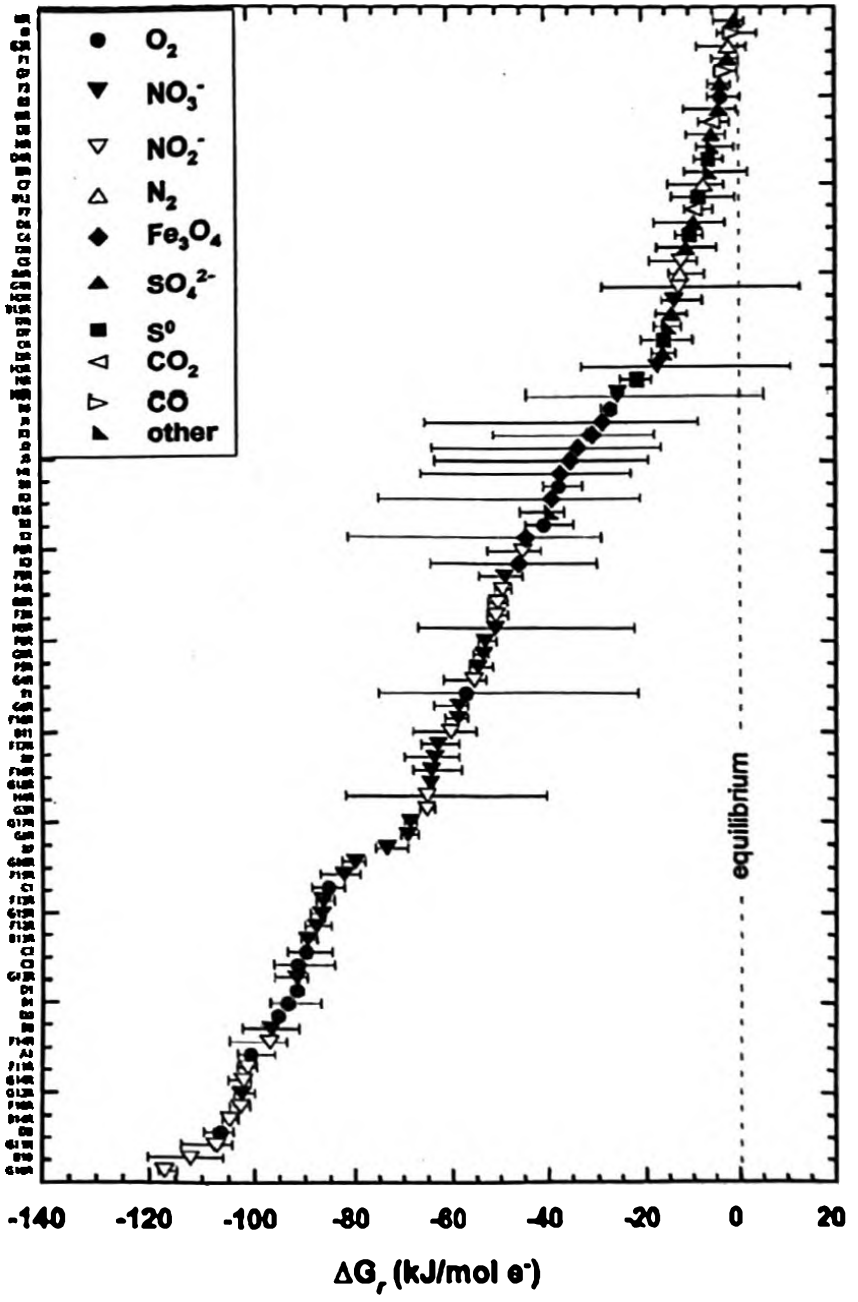
Reaksiyonların her biri bir mol elektron (e^-) için gösterilmiştir. Dolayısıyla, glukozun oksijenle toplam reaksiyonu için pE° değeri 13,75+ 8,20 = 21,95'tir (değerler elektron kulesindeki sıfır değerini aşar ve böylece iki reaksiyon arasında toplam pE° elde etmek için bu değerleri toplarız).

Reaksiyon için ΔG°, Denklem (5.8) kullanılarak −125 kJ mol^{-1} elektron olarak hesaplanabilir. Bir glukoz molekülü oksitlenmiş her molekül için 24 elektron sağladığı için, bunu 3000 kJ mol^{-1} glukoz değeri verecek bir mol glukoz tüketimi için Gibbs serbest enerjisi olarak da ifade edebiliriz.

Bu yaklaşım bize nicel tahminler verir. Örneğin, aerobik solunumla ilişkili Gibbs serbest enerjisini glukoz ile sülfat redüksiyonu (yaklaşık −25 kJ mol^{-1} elektron) ve glukoz ile demir redüksiyonuyla (yaklaşık −40 kJ mol^{-1} elektron) karşılaştırabiliriz. Bu sayılar, aerobik solunumun anaerobik metabolizma türlerinden nasıl daha fazla enerji ürettiğini nicel olarak gösterir.

5.15 Uçlarda Yaşam

Bu yaklaşımlar, aşırı ortamlarda enerji kullanılabilirliğini tahmin etmek için kullanılabilir. Volkanik sistemlerde hangi metabolizmaların uygun olabileceğini tahmin etmek için termodinamiğin kullanılması, bu duruma mükemmel bir örnektir. Bu, İtalya'da Vulcano hidrotermal sistemi için yapıldı (Şekil 5.21), burada çeşitli teorik metabolizmalar incelendi ve Gibbs serbest enerjisi doğrudan sahada jeokimyasal koşullar altında hesaplandı. Daha sonra araştırmacıların bu bölgelerden elde edilen DNA dizilerinde bu metabolizmaları araştırması ve teorik olarak bu reaksiyonları gerçekleştirebilen organizmaların varlığını doğrulaması mümkün oldu. Bu tür bir çalışma, Gibbs serbest enerji hesaplamalarının, farklı ortamlarda enerji kazanımı hakkında hipotezler oluşturmak için



Şekil 5.21 İtalya'daki Vulcano hidrotermal sistemi için tahmini Gibbs serbest enerji verimi örnekleri. Gibbs serbest enerjisinin değerleri (kJ mol^{-1} e^{-1}), Vulcano hidrotermal sistemindeki dokuz bölgede ortalama 90 kemolitotrofik reaksiyon için gösterilmiştir. Yatay çubuklar, bölgeler arasındaki her reaksiyon için değer aralığını gösterir. Reaksiyonlar, azalan enerji verimi (sol alttan sağ üste) sırasıyla düzenlenir ve terminal elektron alıcısına (lejandda) göre düzenlenir. y eksenindeki reaksiyon sayıları, Rogers vd. (2007) yayınındaki verilere tekabül etmektedir.

nasıl kullanılabileceğini gösterir; bu daha sonra bu metabolizmalarla mikroplar aranarak test edilebilir.

Gibbs serbest enerjilerinin hesaplanmasındaki bir karışıklık, sadece termodinamiği dikkate almalarıdır. Reaksiyonlar kinetik olarak sınırlandırılabilir. Örneğin, bir demir indirgeyici mikrop, tanımlanan bir demir oksitten belirli bir miktarda enerji elde edebilir, ancak bu demir bir kaya içindeki mineral formunda sıkıştırılırsa, bu enerjinin serbest bırakılması veya organizmanın ona erişmesi kinetik olarak zor olabilir. Bu nedenle, termodinamik hesaplamaların belirli bir metabolik yolağın herhangi bir doğal ortamda meydana gelip gelmeyeceğine dair güvenilir bir tahmin sağlaması her zaman geçerli değildir. En azından önemli olan, mevcut elektron vericilerinin veya alıcılarının teorik konsantrasyonlarının erişilebilir bir durumda olup olmadığıdır.

5.16 Sonuç

Bu bölümde, yaşamda var olan enerji üreten reaksiyonların bazılarını araştırdık. Birçok olası enerji türü yaşam tarafından sömürüldü ve Dünyada iyi karakterize edilen birincil fototrofik ve kemotrofik türlere baktık. Büyük çeşitliliğe rağmen, hepsi ortak temel özellikleri paylaşırlar, sadece ATP üretmek için kullanılan proton gradyanlarını üretmek için elektron transferinin kullanılması. Çoğu mikroorganizmanın aracılık ettiği bu dönüşümlerin önemsiz olmadığını gördük -gezegen ölçeğinde biyojeokimyasal döngülerden sorumlular. Son olarak, farklı reaksiyonlardan teorik enerji verimlerini hesaplamak için alabileceğimiz yaklaşımlardan sadece bazılarını gördük. Bu, Dünyadaki ve diğer gezegenimsi ortamların yaşanabilirliğini en azından enerji kullanılabilirliği açısından değerlendirebileceğimiz bir araçtır. Bu bölüm yeterince vurgulandığı gibi, yaşam, özellikle mikrobiyal yaşam, türlerine ve metabolik yeteneklerine bağlı olarak çok sayıda gruba ayrılabilir. Bir sonraki bölümde astrobiyologların bu çeşitliliği nasıl anlamlandırabileceklerini ve Dünyadaki canlı topluluğu hakkında sahip olduğumuz bilgileri nasıl düzene koyabileceklerini göreceğiz.

İleri Okumalar

Kitaplar

Gorman, H.S. (2013) *The Story of N: The Social History of the Nitrogen Cycle and the Challenge of Sustainability*. Rutgers Üniversitesi Yayınları, Chapel Hill.

Morton, O. (2009) *Eating the Sun: How Plants Power the Planet*. Fourth Estate, London.

Yayınlar

Coates, J.D., Achenbach, L.A. (2004) Microbial perchlorate reduction: rocket-fuelled metabolism. *Nature* 2, 569–580.

Cotner, J.B., Biddanda, B.A. (2002) Small players, large role: microbial influence

on biogeochemical processes in pelagic aquatic ecosystems. *Ecosystems* 5, 105–121.

Hoehler, T.M. (2004) Biological energy requirements as quantitative boundary conditions for life in the subsurface. *Geobiology* 2, 205–215.

Hoehler, T.M., Jørgensen, B.B. (2013) Microbial life under extreme energy limitation. *Nature Reviews Microbiology* 11, 83–94.

Mitchell, P. (1961) The chemiosmotic hypothesis. *Nature* 191, 144–148.

Nitschke, W., McGlynn, S.E., Milner-White, E.J., Russell, M.J. (2013) On the antiquity of metalloenzymes and their substrates in bioenergetics. *Biochimica et Biophysica Acta* 1827, 871–881.

Petersen, J.M., Zielinski, F.U., Pape, T., Seifert, R., Moraru, C., Amann, R., Hourdez, S., Girguis, P.R., Wankel, S.D., Barbe, V., Pelletier, E., Fink, D., Borowski, C., Bach, W., Dubilier, N. (2011) Hydrogen is an energy source for hydrothermal vent symbioses. *Nature* 476, 176–180.

Rogers, K.L., Amend, J.P., Gurrieri, S. (2007) Temporal changes in fluid chemistry and energy profiles in the Vulcano Island Hydrothermal System. *Astrobiology* 7, 905–932.

Seager, S., Schrenk, M., Bains, W. (2012) An astrophysical view of Earth-based metabolic biosignature gases. *Astrobiology*, 12: 61–82.

Shively, J.M., van Keulen, G., Meijer, W.G. (1998) Something from almost nothing: carbon dioxide fixation in chemoautotrophs. *Annual Reviews in Microbiology* 52, 191–230.

Spear, J.R., Walker, J.J., McCollom, T.M., Pace, N.R. (2005) Hydrogen and bioenergetics in the Yellowstone geothermal ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 2555–2560.

Suzuki, Y., Sasaki, T., Suzuki, M., Nogi, Y., Miwa, T., Takai, K., Nealson, K.H., Horikoshi, K. (2005) Novel chemoautotrophic endosymbiosis between a member of the Epsilonproteobacteria and the hydrothermal-vent gastropod Alviniconcha aff. hessleri (Gastropoda: Provannidae) from the Indian Ocean. *Applied and Environmental Microbiology* 71, 5440–5450.

6

YAŞAM AĞACI

Öğrenme Çıktıları

- Filogenetik ağaç kavramını anlamak.
- Filogenetik ağaçların yorumlanmasındaki bazı problemleri tanımlayabilmek ve açıklayabilmek.
- Filogenetik ağaçlar oluşturmak için ribozomal RNA'nın nasıl kullanıldığını ve organizmalar arasındaki evrimsel uzaklığı ölçmek için filogenetik ağaçları nasıl kullanabileceğimizi anlamak.
- Filogenetik basamaklama kavramını anlamak.
- Filogenetik ağaçların bilimsel hipotezleri test etmek için nasıl kullanılabileceğini açıklamak.
- Son Evrensel Ortak Ata (LUCA) kavramını açıklamak.

6.1 Canlıların Muazzam Çeşitliliği

Bölüm 5'te, Dünyadaki canlıların sahip olduğu muazzam çeşitlilikteki metabolizmaları ve enerji elde etme yollarını araştırdık. Bu çeşitlilik benzer şekilde Dünyadaki çok sayıda türe de yansır. Sayının tam olarak ne olduğunu bilmiyoruz, ancak sadece ökaryotlar için yaklaşık 10 milyon olabilir. Yeryüzündeki yaşam hakkında sınırlı bilgiye sahip olsaydınız, muhtemelen kendinizi bu kocaman canlı topluluğu hakkında oldukça temel sorular sorarken bulurdunuz. Örneğin: Birbirleriyle nasıl ilişkililer? Bir organizma diğeriyle ne kadar yakından ilişkili? Birbirleriyle gerçekten ilişkililer mi yoksa Dünya üzerindeki canlılar farklı yaşam kökenlerinden gelebilir mi? Dünyadaki tüm canlıların atalarının doğası neydi? Bu soruları ancak organizmaları sınıflandırmak ve birbirleriyle olan ilişkilerini incelemek için sistematik bir yol geliştirerek cevaplayabiliriz.

Bazı cevaplar hakkında zaten bir fikrimiz var. Bölüm 4'te amino asitleri kodlayan, kodon tablosunda ortaya çıkan, genetik kodun Dünyada bildiğimiz tüm canlılarda nasıl benzer olduğunu öğrendik ve bunun sonucunda Dünyadaki tüm canlıların biyokimyasının ortak bir kaynaktan geldiğini ileri sürdük. Fakat bu ilk olaylardan bu yana canlılar arasındaki evrimsel ilişkileri nasıl açığa çıkarabiliriz?

Dünya üzerindeki organizmalar arasındaki ilişkilerin temelini oluşturan şey evrimdir, özellikle de Darwinci evrim. Organizmaların kendilerinden önce var olan organizmalardan evrimleştiği fikri ilk olarak Charles Darwin (1809–1882) tarafından tasarlanmamıştı. Yunan filozof Anaksimandros (yaklaşık MÖ 611–546) insanların balıklardan ortaya çıktığını öne sürdü, ancak bu ilk fikirlerin ne ölçüde masallardan veya gözlemlerden doğduğunu bilmek zor. Darwin mekanizma için ilk açıklamayı, HMS *Beagle*'la yaptığı küresel yolculuk sırasında elde ettiği çok sayıdaki gözlemin bir araya getirilmesiyle ortaya koydu. Bir organizma popülasyonundaki küçük değişiklikler, onları çevre koşullarıyla başa çıkmak için daha çok veya daha az donanımlı hale getiriyor. Daha uygun özelliklere sahip olanların hayatta kalma, üreme ve bu özellikleri bir sonraki nesle aktarma şansı daha yüksektir. Çevresel koşullar değiştikçe farklı uyarlanımlara gerek duyulur, bu da popülasyonların içindeki farklı varyasyonlar üzerinde değişen seçilim baskıları uygular. Sonuç olarak evrim geçirirler. Bu fikir, organizmaların yaşamları boyunca çevrelerine tepki olarak özellikler kazandıklarını ve bu özellikleri yavrularına aktardıklarını öne süren Jean-Baptiste Lamarck (1744–1829) tarafından savunulan düşüncenin tam tersiydi. Darwin'in 1859'da yayınlanan ve genellikle sadece *The Origin of Species* [Türlerin Kökeni] olarak bilinen *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* [Doğal Seçilim Yoluyla Türlerin Kökeni Üzerine veya Yaşam Mücadelesinde Tercih Edilen Irkların Korunması] kitabında anlatılan Darwinci doğal seçilim mekanizması evrim süreçleri için, ayrıntılı olmamakla birlikte, geniş anlamda doğru mekanizma olarak görülür. Gerçekten de Darwinci anlamda evrimsel değişimin çoğu zaman yaşamın belirleyici bir özelliği olduğu söylenmektedir (Bölüm 1).

Darwin, elbette DNA'yı bilmiyordu ve bu nedenle bu sürecin biyokimyasal düzeyde nasıl çalışacağını açıklayacak bir mekanizması yoktu. DNA'nın keşfinden önceki dönemde, çeşitliliğin nesiller boyunca üretilip aktarılabileceğiyle ilgili temel ilkeler, bezelye bitkileri arasında çok sayıda fertilizasyon deneyi yapan bir rahip olan Gregor Mendel (1822–1884) tarafından deneysel olarak araştırıldı. Bezelye bitkilerinin boyları, çiçek rengi ve tohum şekli gibi özelliklerini gözlemleyerek kalıtım yasalarını belirleyebildi. Bu gözlemler, bilginin bir nesilden diğerine dikey olarak aktarılması, bazı özelliklerin baskın ve çekinik doğası ve bu bilginin yavruların özelliklerini oluşturmak adına ebeveynler arasında 'karıştırıldığı' görüşüyle ilgili deneysel kanıtlar sağlamıştır. Ne yazık ki, o ve Darwin birbirlerinin çalışmalarından habersizlerdi.

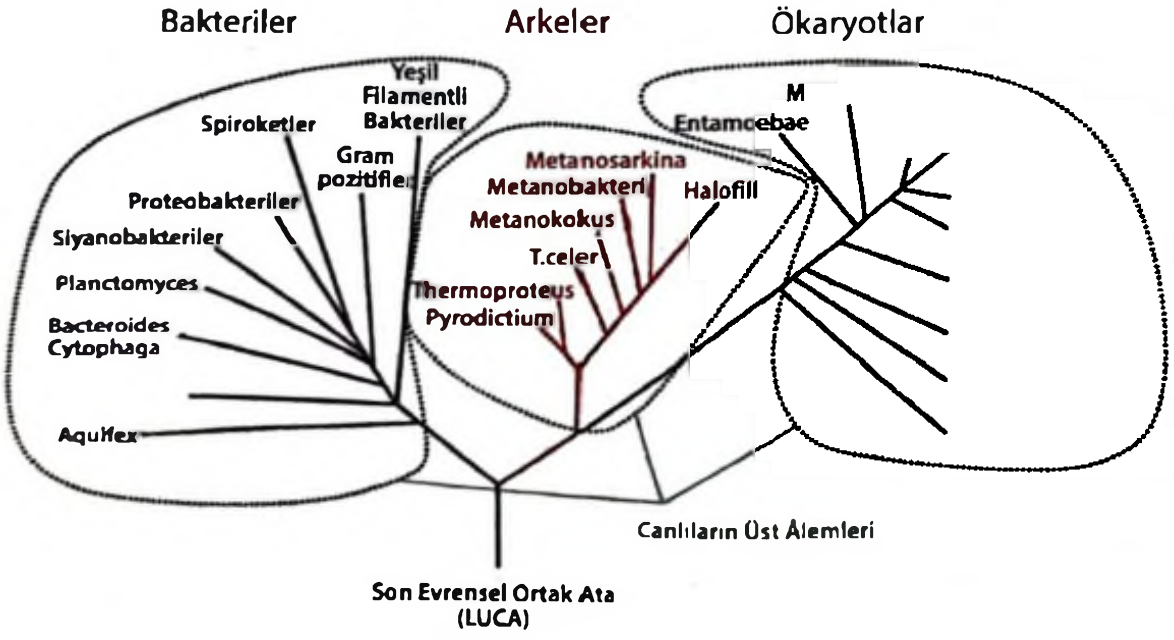
Darwin'in ve Mendel'in sezgilerinin, Dünyadaki organizmaların nasıl ve neden ilişkili olduğunu ve hangi süreçlerin yeni evrimsel yolları ve dolayısıyla birbirine bağlı bir 'yaşam ağacına' yol açan değişkenliği yönlendirdiğini anlamak için teorik ve deneysel aşamayı hazırladıkları söylenebilir. Moleküler genetik ve biyokimya dönemi, genetik kodun kendisini okumamıza ve böylece Dünyadaki canlılar arasındaki ilişkileri çok daha doğru bir şekilde sınıflandırmamıza izin vererek bu atılımı ileriye götürecektir.

6.2 Yaşam Ağacı

Bu bölüm boyunca ilerlerken filogenetik ağaçların nasıl yapıldığının ayrıntılarını incelesek de, bazı temel konularla başlamak faydalı olacaktır.

Genel olarak, Dünya üzerindeki canlılar üç 'üst âleme' ayrılabilir. Üst âlemler, Dünya üzerindeki yaşamın mümkün olan en büyük ölçekli bölümü olarak düşünülebilir. Bu üç üst âlem, bağırsaklarınızda, toprağınızda ve Dünya üzerindeki hemen hemen tüm diğer yerleşik ortamlarda yaşayan birçok organizmayı içeren **bakteriler**; farklı ortamlarda yaşayan çok çeşitli mikroorganizmaları kapsayan, bununla birlikte zorlu ortamları seven ve ya bu ortamlara dayanıklı olan organizmaları içermesiyle ünlü olan **arkeler**; ve son olarak bitkiler ve hayvanları içeren hücresel çekirdeğe sahip organizmalar olan **ökaryotlardır**. Ökaryotların karmaşık çok hücreli organizmalarla ilişkili olma eğiliminde olmalarına rağmen, yosun ve bazı mantarlar gibi birçok tek hücreli organizmayı da içerdiklerinin farkında olmak önemlidir. Bakteriler ve arkeler bazen 'prokaryotlar' grubu olarak bir araya getirilirler (Bölüm 4).

Şekil 6.1, bu üst âlemler arasındaki bazı varsayımsal ilişkilerle birlikte temel bir filogenetik ağacı göstermektedir. Her çizgi, gösterilen gruplar arasındaki ortak bir atadan ayrıldıklarından bu yana geçen zamanı yansıtan evrimsel bir 'uzaklığı' gösterir. Gösterilen grupların özel bir önemi yoktur. Sadece bazı örnekleri gösterirler. Ağacın tek bir atadan 'kökenlendiğini' göreceksiniz. Buna genellikle **Son Evrensel Ortak Ata** veya LUCA denir.



Şekil 6.1 Hayatın üç üst âleminden her biriyle ilişkili çeşitli organizma gruplarını gösteren bir filogenetik yaşam ağacı. Bu ağaç, ribozomal RNA dizilerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır.

6.3 Bazı Tanımlar

Bu noktada, ağaçların oluşturulmasında önemli olan bazı tanımları anlamamız gerekiyor. **Filogeni**, bir türün veya belirli tür gruplarının evrimsel tarihiyle ilgilidir. Şekil 6.1'de gösterilen ağaç bir filogeni örneğidir. **Sistematik** disiplini organizmaları sınıflandırır, isimlerini belirler, tanımlar ve evrimsel ilişkilerini anlamaya çalışır. Sistematikçiler, organizmalar arasındaki evrimsel ilişkileri ortaya çıkarmak için fosil, moleküler ve genetik verileri kullanırlar. **Taksonomi**, sistematiğin bir alt kümesi olarak görülebilir ve bilimin özellikle bölümlerin düzenlenmesi ve organizmaların adlandırılmasıyla ilgilenen, evrimsel ilişkilere odaklanmayan kısmıdır.

6.4 Organizmaları Sınıflandırmak

On sekizinci yüzyılda, İsveçli doğa tarihçisi Carolus Linnaeus (1707–1778) benzerliklere dayanan bir taksonomi sistemi yayınladı. Bu, organizmaları akılcı bir şekilde sınıflandırmak için yapılan ilk girişimdi. Benzerlikler birçok organizmanın ortak özellikleri paylaştığını kabul eder. Bu, genetiğin doğuşundan önce ilişkileri ortaya çıkarmanın yararlı bir yoluydu. Şekil 6.2'de, hepsi oldukça benzer görünen dört farklı hayvana ait bir örnek görebilirsiniz. Benzerlikleri gerçekten paylaşılan ortak bir kökeni temsil ediyor. Hepsi Felidae (kediler) ailesinin üyeleridir. Erken dönem doğa tarihçileri, uzuvların sayısı ve boyutları, kürk gibi özelliklerin varlığı veya bir organizmanın yavrusunu yumurtlayarak mı yoksa doğurarak mı Dünyaya getirdiği gibi özellikleri sistematik olarak karşılaştırarak organizmalar arasındaki ilişki üzerine sistematik bir çalışma yapmaya başlayabildiler.

Linnaeus'un sisteminin iki temel özelliği günümüzde faydalı olmaya devam etmektedir: türler için iki bölümlü isimler ve hiyerarşik sınıflandırma.

Linnaeus sınıflandırma sistemi, bir türün binomiyal adı verilen iki bölümlü bilimsel bir adının üretilmesini içerir. İsmin ilk bölümü cins (türlerin üzerindeki hiyerarşi seviyesi) adıdır. Spesifik epitet olarak adlandırılan ikinci bölüm, cins içindeki her tür için benzersizdir. Cinsin ilk harfi büyük yazılırken tüm türün adı italik veya altı çizili olarak yazılır. Her iki kısım birlikte türü adlandırır. Örneğin kurt, *Canis lupus* olarak adlandırılır. *Canis* cins ve *lupus* spesifik epitettir. Bazen, bir türün ırkı veya varyantı varsa üçüncü bir isim verilebilir. Kurtlardan evrimleşen evcil köpeklerin tür ismi olan *Canis lupus familiaris* buna özellikle iyi bir örnek.

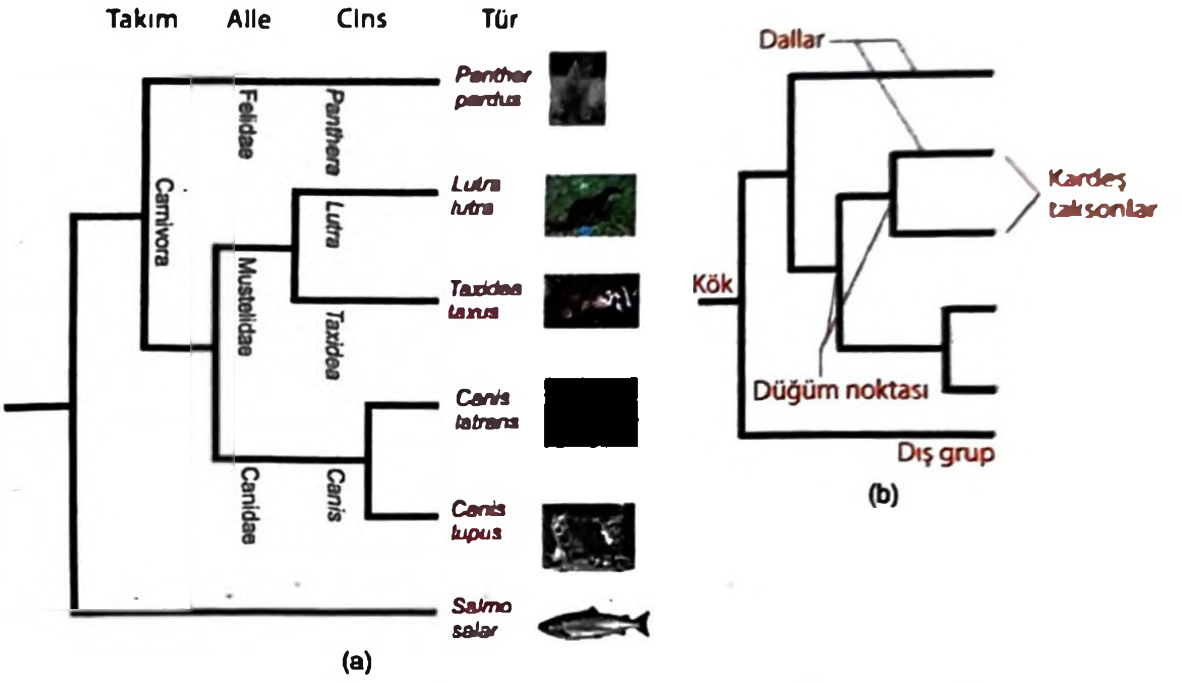
Türleri bu şekilde sınıflandırmanın yanı sıra, Linnaeus türleri giderek daha dar kategorilerde gruplandırmak için bir sistem geliştirmiştir. Genişten dara doğru sıralanan taksonomik gruplar; üst âlem, âlem, şube, sınıf, takım, aile, cins ve türdür. Herhangi bir hiyerarşi seviyesindeki taksonomik birime **takson** (çoğulu taksa) denir. Türlerin bu hiyerarşik sınıflandırması zamana yenik düşmeyerek bugün türleri sınıflandırma şeklimizin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 6.2 Bazı büyük organizmalar için bu dört kedinin sahip olduğu özellikleri gibi benzerlikler ortak köken sonucunu çıkarmak için kullanılabilir. Sol üstten sağa doğru: leopar (Panthera pardus pardus; Kaynak: wikicommons, JanErkamp), *aslan* (Panthera leo bleyenberghi; Kaynak: wikicommons, Appaloosa), *ev kedisi* (Felis silvestris catus; Kaynak: wikicommons, Panther), *jaguar* (Panthera onca; Kaynak: wikicommons, 663highland).

Sistematikçiler, Şekil 6.3'te gösterilen dallanan filogenetik ağaçlardaki gerçek evrimsel ilişkileri tanımlar.

Filogenetik ağaçlar bize ne gösterir? Filogenetik ağaçlar köken bağlantılarını gösterir. Yatay çizgiler, iki grup veya türün ayrışmasından bu yana geçen zamana ya da farklı gruplar veya türler arasındaki genetik değişiklik miktarına karşılık gelebilir. Bu, ağacı oluşturmak için hangi verilerin kullanıldığına bağlıdır.



Şekil 6.3 (a) Bazı büyük memelilerin filogenetik ağacı. (b) Filogenetik ağaçlarla ilgili birkaç terminoloji (Kaynak: Charles Cockell).

Şekil 6.3a'da büyük memelilerin filogenetik ağacının bir örneğini görebilirsiniz. Ağaç aynı zamanda alt kısımda bir somon balığını da içerir. Bu, ilgilendiklerimizle uzaktan ilişkili bir tür olan ve ağacı köklendirmemize yardımcı olan bir **dış gruptur**. Uzaktan ilişkili olduğu için, ilgilendiğimiz organizmaların tek bir grupta toplanma eğiliminde olmasına neden olur. Soldan başlayarak, ağaçta gösterilen tüm organizmaların (balık dışında) Carnivora (etoburlar) takımında ortak bir ata paylaştığını görüyoruz. Daha sonra bir **düğüm noktasında** bölünürler, bu da uyumlu bir popülasyonun genetik olarak farklı iki popülasyona bölündüğü noktayı (zamanı) tanımlar. Bu ayrımlar, daha sonra bağımsız olarak gelişen iki popülasyonun coğrafi olarak ayrılması ya da aynı coğrafi konumda iki farklı yaşam tarzını benimseyen iki popülasyonun, sonuçta evrim yoluyla farklı **taksonlar** haline gelmesine yol açan etkilerden kaynaklanmaktadır.

Şekil 6.3'te aile düzeyinde birbirinden ayrılan üç grup, Felidae (kediler), Mustelidae (porsuk ve gelincikleri içeren bir grup) ve Canidae (köpekler), görebiliyoruz. Dikey çizgiler, farklı gruplar arasında ayrışmaların nerede meydana geldiğini gösterir. Sağa doğru ilerlerken, ağacın üstünde Felidae'nin bir temsilcisini, *Panther pardus* (leopar), görüyoruz. Bunun altında, Mustelidae ailesi içinde, *Lutra lutra* (Avrupa su samuru) ve *Taxidea taksisi* (Amerikan porsuğu) olarak adlandırılan, *Lutra* (su samurları) ve *Taxidea* (porsuklar) arasında cins düzeyinde bir ayrılma örneği görüyoruz. Ağacın alt kısmında ise tür düzeyinde bir ayrılma örneği görüyoruz. *Canis* cinsinde *Canis latrans* (çakal) ve *Canis lupus*'a (kurt) ayrılma vardır.

Şekil 6.3b'de ağaç isimlerden arındırılmış ve bir filogenetik ağacın farklı bölümlerinin bazı tanımları gösterilmiştir: **kök**, **düğüm noktaları**, 'dallar' ve **kardeş taksonlar**. Herhangi bir ağacın genel düzeni veya şekli **topoloji** olarak adlandırılır ve ağaçların kendilerine bazen **dendrogramlar** da denir.

6.5 Homoloji ve Analoji

Bir ağaç oluştururken ve organizmalar arasındaki benzerlikleri belirlerken çok dikkatli olmamız gereken faktörlerden biri homoloji ve analoji problemidir. Homoloji, bir kurt ve bir köpek arasındaki ortak soydan ileri gelen benzerliktir. Bu iki takson arasında gözlenen benzerlikler, erken dönem taksonomistlerin bu iki türün ilişkili olduğu sonucuna varmalarına neden olmuştur. Bu doğru bir varsayımdı, ama sadece şansla. Analoji, ortak bir atayı paylaşmayan iki organizmada benzer koşullara veya uyarlanım baskılarına maruz kalınması sonucu ortaya çıkan evrimsel baskıların neden olduğu benzerliktir. Analojiler aynı zamanda **homoplazi** (Yunanca 'aynı şekilde biçimlendirmek') olarak da bilinir.

Bu nedenle, Linnaeus sınıflandırması ve gerçek filogeni bazen birbirinden farklı olabilir, çünkü benzerliklere dayanarak bir şeyler isimlendirebilsek de, bu mutlaka doğru yolda olduğumuz anlamına gelmez! İki organizma aynı görünebilir, ancak genetik olarak farklı olabilirler. Linnaeus bile benzerlikler nedeniyle sorun yaşadı. Canlılar arasındaki bağlantıları tanımlayan *Systema Naturae*'nin ilk baskısında balinaları balıklarla gruplandırdı. 23 yıl sonra, 1758'deki 10. baskıda bu hata düzeltildi –balinalar memelilerle gruplandırıldı.



Şekil 6.4 Analoji, organizmaların aynı çevresel baskılara maruz kalması sonucu oluşan yapılardan kaynaklanır. Burada bu durum köstebekler üzerinden gösterilmiştir. Üstte 'gerçek' bir köstebek vardır (Talpa europaea; Kaynak: wikicommons, Hunde-halter). *Altında Avustralya'dan keseli bir köstebek* (Notoryctes typhlops; Kaynak: wikicommons, Bartus. malec). *Köstebeklerin uzunluğu birkaç santimetredir.*

Avustralya ve Kuzey Amerika köstebekleri analojiye iyi bir örnektir. Bu organizmaların her ikisi de küçük yer altı hayvanları için tipik özelliklere sahiptir. Silindiriktirler, küçük gözleri vardır, arka ayakları kısadır ve kazı için kısa güçlü ön ayakları vardır. Kuzey Amerika köstebekleri, Talpidae ailesine ('gerçek köstebekler') aittir. Avustralya köstebekleri ise, Talpidae köstebeklerine kıyasla kanguru ve koalalarla daha yakından ilişkili olan keseli memeliler ailesine aittir. Aynı çevresel baskılara (yeraltındaki oyuklar için en uygun şekilde uyarlanmayla ilişkili baskılar) maruz kalma sonucu oluşan benzerlikler yakınsak evrim olarak bilinir (Şekil 6.4).

Homoloji, fosil kanıtlar karşılaştırılarak analojiden ayırt edilebilir. Örneğin, köstebekler söz konusu olduğunda, Avustralya keseli memelileri ve onların günümüze kadar gelen yeraltında yaşayan torunları arasında, Talpidae köstebeklerinden farklı bir evrimsel ataya sahip olduklarını gösteren ara aşamalar olduğu fosil kanıtlarla gösterilebilir.

Başka bir yaklaşım ise karmaşıklığı karşılaştırmaktır. İki organizma arasında ne kadar çok karmaşıklık olursa, homolog olmaları da o kadar olasıdır. Bu yöntem istatistiksel bir değerlendirmeye dayanmaktadır. Benzer görünümlü iki organizmanın ortak bir atadan gelme şansı, genellikle paylaşılan özelliklerin sayısı arttıkça artacaktır.

6.6 Filogenetik Ağaç Oluşturmak

Filogenetik ağaçlar benzerlikler kullanılarak oluşturulabilir. Kediler gibi büyük organizmalarda bu yaklaşım iyi sonuç verebilir. Birçok niteliğe, yapıya ve yüzey özelliğine sahip büyük organizmaların en yakın akrabalarını doğru şekilde saptama olasılığı daha yüksektir. Bununla birlikte, çok daha basit organizmaların evrimsel ilişkilerini belirlemeye başladığımızda benzerlikleri kullanmak başarısızlıkla sonuçlanır. Bölüm 4'te gördüğümüz gibi çok sınırlı bir şekil yelpazesine sahip olan mikroorganizmalar için filogenetik ağaçların oluşturulması, bu sorunun bariz bir örneğidir. Flagellanın farklı yapılar oluşturması bazı mikrop gruplarını kategorize etmek için kullanılabilmesine rağmen sadece birkaçının ayırt edici yüzey özellikleri vardır. Binlerce mikrop türünü benzerliklere göre kategorize etmek imkansız olacaktır.

Filogenetik ağaçların oluşturulmasındaki soruna ilişkin çok daha iyi bir yaklaşım genetik bilgiye bakmaktır. Dünyada bilinen tüm hücresel organizmalar, DNA'nın bilgi depolama sistemi olması ve RNA'yı proteine çevirmekten sorumlu moleküller olarak ribozomların (kendileri RNA içeren) kullanımı gibi bazı genetik özellikleri paylaşırlar (Bölüm 4). Bundan dolayı, bu genetik düzeneğin yüksek oranda korunmuş bir kısmını, yani zamanla fazla değişmeyen DNA'yı bulmak bir ağaç oluşturmaya yönelik bir yaklaşım olacaktır. Bununla birlikte, bu düzeneğin bir kısmının biraz değişmesini istiyoruz, böylece bir ağaç oluşturmak ve bu değişiklikleri evrimsel uzaklıkla ilişkilendirmek için bu

değişiklikleri kullanabiliriz. İki organizma akraba olarak ne kadar yakınsa mutasyonla meydana gelecek değişiklik sayısı o kadar az olur. Aralarındaki evrimsel uzaklık ne kadar büyük olursa (yani ortak atalarından ayrıldıkları zaman da o kadar büyük olur), moleküllerde daha fazla değişiklik görmeyi bekleriz.

Bölüm 4'te tanıtılan ribozomal RNA (rRNA), uzun zaman sürelerinde nadiren değişen tipte bir nükleik asittir. En temel süreçlerden birinde (RNA'yı proteine çevirmek) rol oynadığından ribozomal RNA'yı önemli ölçüde değiştiren herhangi bir radikal mutasyon, tüm hücrede ciddi bozulmaya neden olacak ve bu da çoğalmayı durduracaktır. Değişikliklerin en aza indirilmesi için çok güçlü evrimsel baskılar vardır. Ribozomal RNA'yı kodlayan DNA dizileri, bilim insanlarının milyarlarca yıllık zaman dilimleri boyunca evrimsel ilişkileri yansıtan filogenetik ağaçlar oluşturmalarına izin verir.

Ribozomal RNA genleri Dünya üzerindeki yaşamın en önemli filogenetik ağaçlarından bazılarını (bu bölümün başındaki gibi) oluşturmak için kullanılmıştır. Böyle bir gene örnek olarak, prokaryotlarda 16S ribozomunu kodlayan 16S ribozomal RNA geni (16S rRNA) verilebilir. 16S rRNA, prokaryotlardaki ribozomun 30S 'küçük alt biriminin' bir parçasıdır. İşlevi, ribozomal proteinlerin pozisyonunu belirlemek ve mRNA'ya protein sentezi için amino asit getiren tRNA'nın etkileşimini sabitlemek için bir iskele görevi görmektir (eğer bu tanıdık gelmediyse Bölüm 4'ü inceleyin). Bakteri ve arke'ye ait filogenetik ağaçlar, farklı organizmalardan elde edilen 16S rRNA genlerinin dizilenmesiyle oluşturulur.

Yine bir başka ribozomal gen olan 18S rRNA, ökaryotların bir ribozomal alt birimi, yosun veya mantar gibi birçok ökaryotun filogenetik ağaçlarını oluşturmak için kullanılır.

Ağaçlar çok sayıda farklı genden meydana gelmektedir. Örneğin, biyosfer için önemli olan belirli işlevlerin evrimsel ilişkileriyle ilgileniyorsak, atmosferik azot gazının canlılar tarafından kullanılabilir olan amonyak ve nitrat gibi azot bileşiklerine biyolojik olarak sabitlenmesinde (azot fiksasyonu) rol oynayan *nif* genleri gibi fonksiyonel genleri dizileyebiliriz. Kükürt ve karbon döngülerinde ve biyosferdeki diğer tüm önemli süreçlerde rol oynayan genler dizilenebilir ve evrimsel ilişkilerini anlamak için ağaçlar oluşturulabilir (Tablo 6.1).

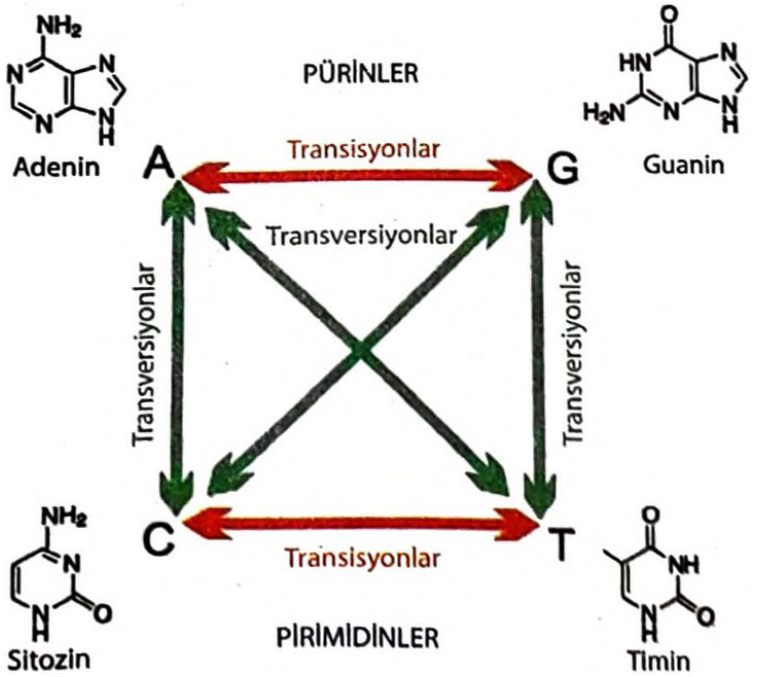
Tablo 6.1 Organizmalardaki metabolizmaların veya diğer biyokimyasal süreçlerin filogenetik ağaçlarını oluşturmak için dizilenebilen ve kullanılabilen bazı gen örnekleri.

Gen	Kodlanan gen	İşlev
dsrAB	Dissimilatuar sülfat redüktaz	Sülfat redüksiyonu
msr	Metil-koenzim M redüktaz	Metanogenez
nif	Azot fiksasyonu genleri	Azot fiksasyonu
amo	Amonyak monooksijenaz	Amonyak oksidasyonu

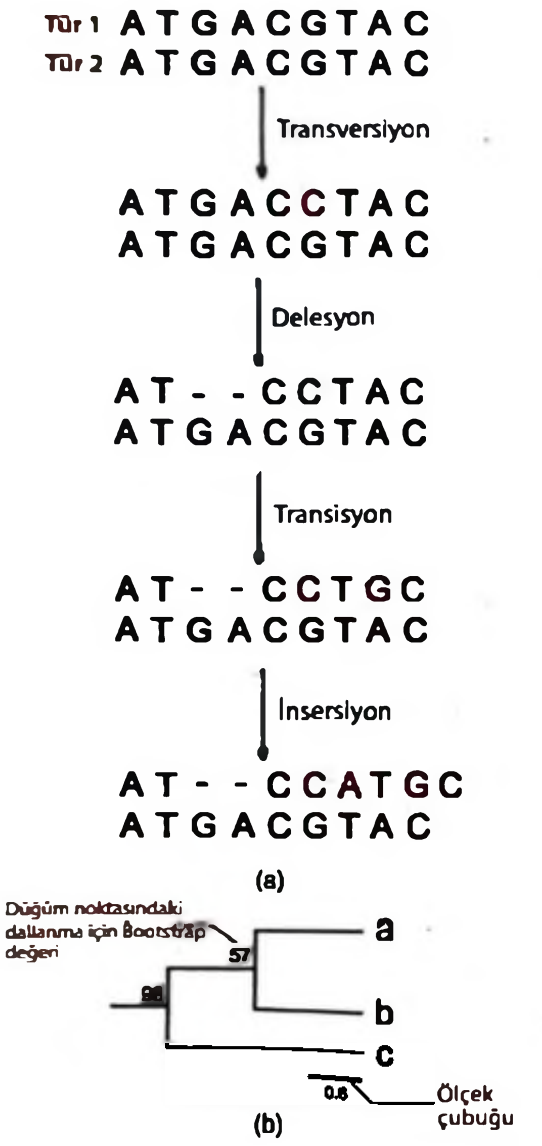
Gen dizileri, bilinen organizmalardan DNA izole edilerek ve daha sonra genden tüm nükleotid dizisini elde etmek için modern dizileme yöntemleri uygulanarak elde edilir. 16S rRNA geni söz konusu olduğunda, toplam uzunluk 1500–1600 nükleotiddir.

Filogenetik ağaçları oluşturmak için DNA veya diğer moleküllerin verilerini kullanma işlemine **moleküler sistematik** denir. Sistematikçiler, farklı organizmalardan karşılaştırılabilir DNA parçalarını analiz ederken bilgisayar programlarını ve matematiksel araçları kullanırlar. Açık bir biçimde, genin dizilimi ve karşılaştırılması ne kadar uzun olursa, özellikle çok yakından ilişkili türler karşılaştırılırken daha fazla baz küçük farklılıkları görmede daha fazla güven sağladığından, daha iyi bir ağaç oluşturma olasılığı daha yüksektir. En iyi filogenetik ağaçlar, bir genin en büyük parçalarının dizilenmesiyle oluşturulur, böylece 16S rRNA ağaçları örneğinde, bilim insanları tüm geni dizilemeye çalışacaktır.

Genetik kodda bu değişiklikleri üreten mutasyonlar nasıl oluşur? DNA dizilerinde çeşitlilik oluşturan mutasyonlar, bir dizi doğal sürecin sonucudur. DNA replikasyonu sırasında meydana gelen hatalar (hiçbir işlem %100 doğru değildir) kodda değişikliklere neden olabilir. Örneğin yoğun radyasyon veya özellikle mutajenik veya mutasyona neden olan zararlı kimyasallar gibi DNA'ya zarar veren ajanlara maruz kalmak mutasyonlara neden olabilir. Ortaya çıkan mutasyonlar birkaç şekilde olabilir. Bir pürin (A veya G) bir pirimidine (C veya T) dönüşürse, buna transversiyon denir. Bir pürinin başka bir pürine (bir A, bir G'ye veya tam tersine) veya bir pirimidinin (bir T bir bir C'ye veya tam tersine) başka bir pirimidine dönüşmesi transisyon (Şekil 6.5) olarak adlandırılır. Farklı organizmaların DNA'ları arasındaki farklılıklara neden olan diğer mutasyon



Şekil 6.5 Transversiyonlar ve transisyonlar, DNA dizilerinin farklılaşmasına neden olan mutasyon biçimlerinden sadece iki tanesidir (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 6.6 Filogenetik ağaçlar oluşturmak için DNA dizilerinin kullanılması. (a) Çeşitli mutasyonlar (kırmızı), evrimsel uzaklığın ortaya çıkmasına ve filogenetik ağaçların oluşturulmasına izin veren genetik dizi farklılıklarına neden olur. Burada, aynı atadan gelen tür 2'nin değişmemiş dizisiyle karşılaştırıldığında, sadece bir türdeki (tür 1) bazı değişiklikler gösterilmektedir. Bu rakamdan da anlaşılacağı gibi, elde edilen genetik dizi ne kadar uzun olursa, farklılaşma süresi hakkında istatistiksel olarak sağlam çıkarımların elde edilmesi daha olasıdır. (b) Filogenetik ağaçlar genellikle yatay dalların ölçülmesini sağlayan bir ölçek çubuğuna sahiptir. Genetik bilgi kullanılarak yapılan ağaçlar için, genellikle belirli bir pozisyonda bu mesafe boyunca ortalama nükleotid değişim sayısına karşılık gelir. Düğüm noktalarındaki sayılar bu dallanma için güvenilirlik düzeyleridir. Bunlar Bootstrap Yöntemi kullanılarak hesaplanır (Kaynak: Charles Cockell).

tipleri, insersiyon ve delesyonları içerir (Şekil 6.6). İnsersiyonlara tek bir baz ve hatta gen dizileri arasına sokulan baz dizileri neden olurken delesyonlar bir veya daha fazla bazın kaybı sonucu oluşur.

Her ne kadar aralarında daha fazla genetik farklılık bulunan iki organizmanın evrimsel uzaklıklarının da daha fazla olması genel anlama doğru olsa da (Şekil 6.6a) sistematikçiler homolojiyi analojiden ayırmak zorundadır. DNA mutasyon geçirebilir, örneğin bir organizmanın DNA dizisinin bir noktasında meydana gelen C–T transisyonu, bu organizmanın kendisiyle ilişkili olmayan bir başka türe ait bir organizmayla DNA dizilerinin aynı pozisyonunda T bazı taşımalarına neden olabilir. Verilerin analizi bir bilim insanının, aslında iki DNA dizisi analog (homoplazi) olmasına rağmen homolog olduklarını düşünmesine sebep olabilir. Matematiksel araçlar, özellikle mutasyon oranları tüm nükleobazlar arasında aynı olmadığından moleküler homoplazileri veya tesadüfleri tanımlamaya yardımcı olur.

Şekil 6.6b, filogenetik ağaçların genellikle bir araştırmacının türler arasındaki farklılıkları ölçmesine izin veren bir ölçek çubuğuna sahip olduklarını göstermektedir. Genetik bilgi kullanılarak oluşturulan ağaçlar için bu ölçek çubuğu genellikle herhangi bir pozisyondaki ortalama nükleotid değişim sayısına karşılık gelir. Ağaçlar düğüm noktalarında genellikle ilgili düğümün doğruluğuna ilişkin güven veren sayılar içerir (Şekil 6.6b). Bu

sayılar, düğüm noktalarının farklı düzenlemeleri kullanılarak farklı ağaçların oluşturulduğu bir süreç olan bootstrap yöntemiyle hesaplanır ve birçok kez tekrarlanır. Verilerin doğruluğu en olası yorumunu yansıtan tüm bu ağaçlardan bir 'konsensus' ağacı oluşturulur. Daha sonra, tüm tekrarlarda bulunan düğüm noktasındaki sayılar konsensus ağacıyla karşılaştırılarak hesaplanır (örneğin yüzde cinsinden). Böylece, söz konusu düğüm noktasında bir güvenilirlik seviyesi sağlanır. Genel bir kural olarak, belirli bir düğüm noktası için Bootstrap değeri %95 veya daha yüksekse, o daldaki topoloji 'doğru' olarak kabul edilir.

6.7 Bazı Tanımlar ve Filogenetik Ağaçlar

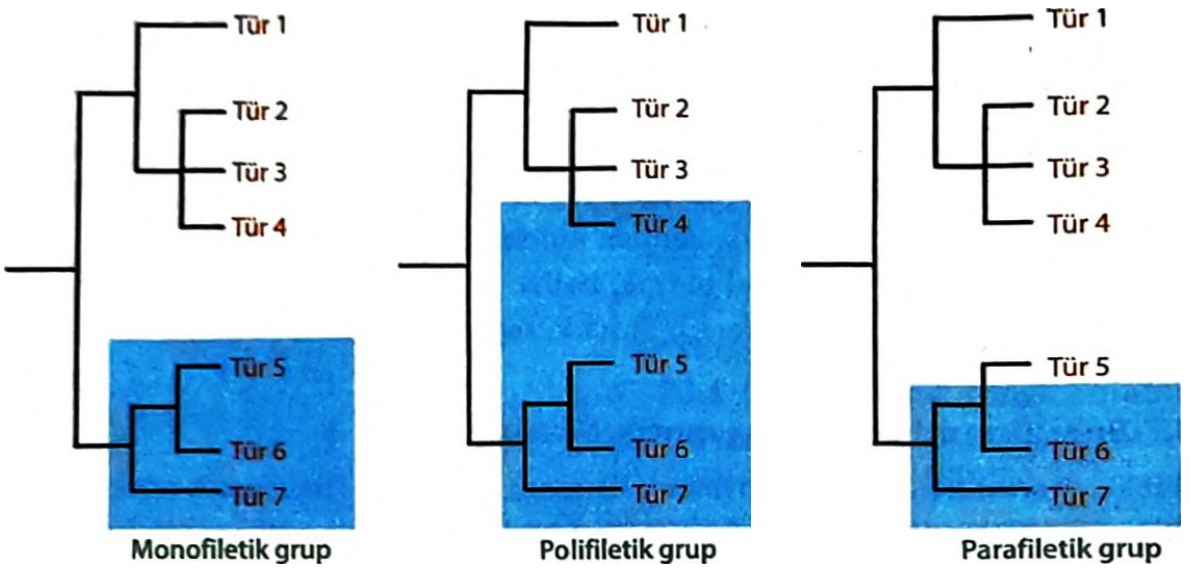
Başka tanımları gözden geçirmenin zamanı geldi. Bir filogenetik ağacımız olduğunda, bunun farklı kısımlarını sınıflandırabilir ve genel ağacın bazı özelliklerini tanımlayabiliriz.

Genellikle bir ağacın bir çeşit 'kök'e ihtiyacı vardır. Bununla kastettiğimiz şey, çalıştığımız tüm organizmalar için ortak bir ata görevi görecek olan, incelediklerimizden çok farklı bir organizmaya ihtiyacımız var. Örneğin, farelerden gelen genetik bilgilere dayanarak bir filogenetik ağaç çizersek ve ağaca bir balıktan elde edilen aynı genetik bilgiyi eklersek, farelerden gelen DNA dizileri kümelenme eğilimi gösterirken balığın diğer tüm fare dizileriyle onların kendi aralarında olduğundan çok daha uzaktan ilişkili olduğu için ayrı durduğunu görürüz. Bu, ağacı köklendirir. Daha önce açıklandığı gibi, **dış grup** gibi bir organizmadan yararlanırız ve bunu Şekil 6.3'te görebilirsiniz. Araştırmacıyı ilgilendiren diğer tüm organizmalara iç grup denir. Sistematikçiler, özellikleri ayırt etmek için her bir iç grup türünü dış grupla karşılaştırırlar. Dış grup ve iç grup tarafından paylaşılan homolojiler, her iki grubun ortak bir atadan sapmasını belirleyen atasal özelliklerdir.

Kladistik, organizmaları ortak soya göre gruplandıran taksonominin bir parçasıdır.

Klad, atasal bir tür ve onun tüm soylarını içeren bir grup türüdür. Klad için kullanılan bir başka terim, atasal türleri ve o türün *tüm* soylarını tanımlayan **monofiletiktir**. En basit şekilde klad (monofiletik bir grup), evrimsel biyolog Robert O'Hara tarafından şu şekilde özetlenmiştir: "Eğer bir ağacı herhangi bir noktada tutar ve tuttuğunuz yerin hemen altından keserseniz, elinizde kalan ağaç parçası, tanımı gereği bir klad olurdu".

Bir ağacı incelersek, içindeki diğer grup türlerini de tanımlayabildiğimizi görebiliriz. Polifiletik bir grup benzer özelliklere sahip çeşitli türlerden oluşur, ancak bu grup ortak bir atadan yoksundur (Şekil 6.7). Parafiletik bir grup, atasal bir türden ve bu türün bazı, hepsi değil, soylarından oluşur (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Filogenetik ağaçlarda kladistikler tarafından tanımlanan bazı gruplar (Kaynak: Charles Cockell).

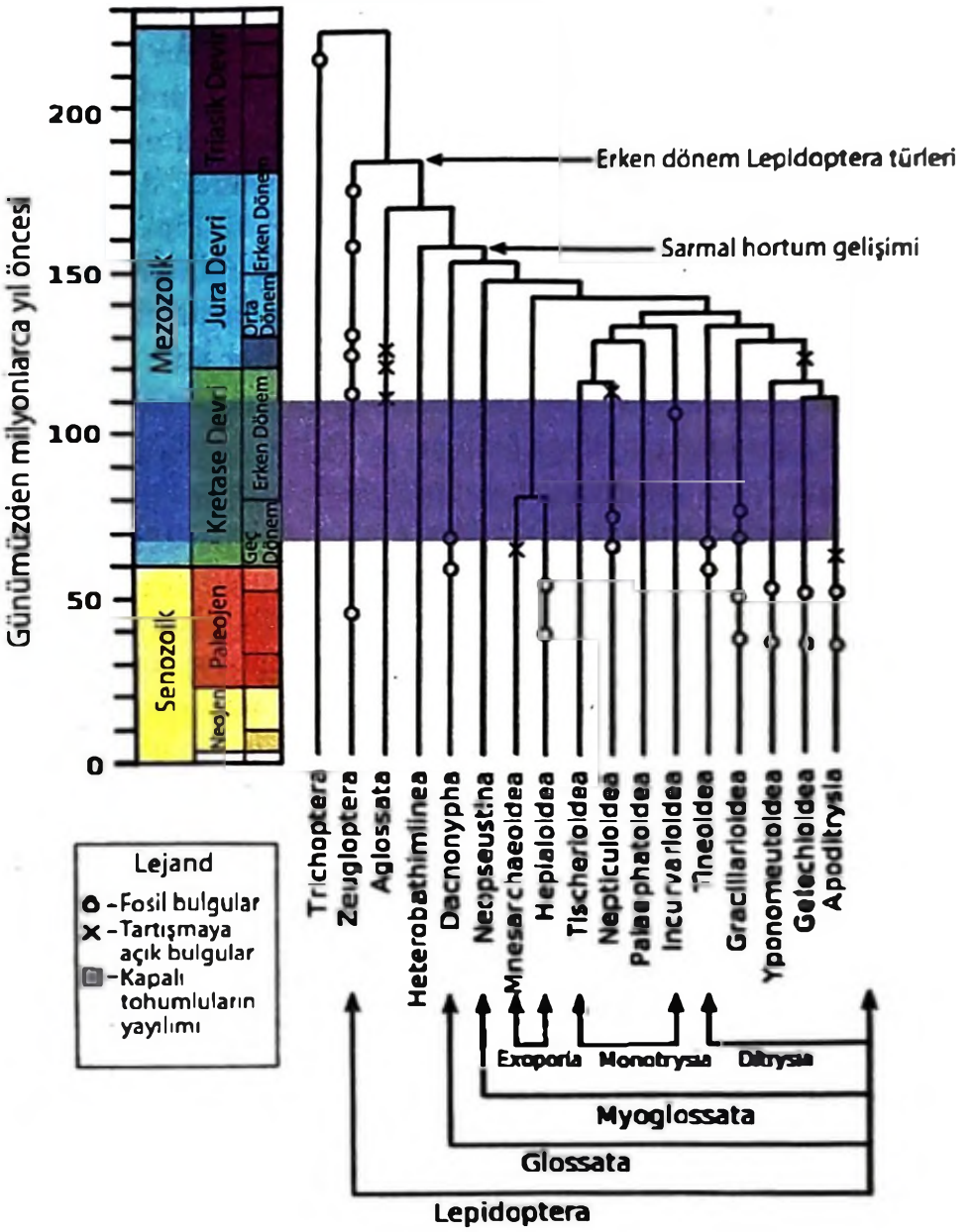
6.8 Filogenetik Ağaç Türleri

Farklı filogenetik ağaçlar vardır. Bazı ağaçlarda bir dalın uzunluğu, o soydaki belirli bir DNA dizisinde meydana gelen genetik değişikliklerin sayısını yansıtabilir. Diğer ağaçlarda dal uzunluğu kronolojik zamanı temsil edebilir (Şekil 6.8) ve dallanma noktaları fosil kayıtlardan belirlenebilir. Bu ağaçlar farklı bilgileri veya birleşik bilgileri aktarmak için tasarlanmıştır. Ağaç seçimi, bir araştırmacının aktarmak istediği bilgilere bağlı olacaktır. Farklı şekillerde çizilen ağaçlarla da karşılaşacaksınız; bazılarında diyagonal dallar (Şekil 6.1) veya kavisli dallar kullanır. Bu ağaçların birçoğu, düğüm noktalarında yatay dallar ve dikey çizgilerle çizilen ağaçlarla tamamen aynı bilgileri taşır (esas olarak bu bölümde kullanılır), bunlar sadece farklı sunum yöntemleridir.

Sistematikçiler asla büyük bir veri kümesinde en iyi ağacı bulacağından emin olamazlar, bu nedenle maksimum tutumluluk ve maksimum benzerlik ilkelerini uygulayarak olasılıkları daraltırlar.

Maksimum tutumluluk (parsimoni), en az evrimsel olaya (paylaşılan karakterlerin görünümü) ihtiyaç duyan ağacın doğru olma olasılığı en yüksek ağaç olduğunu varsayar.

Maksimum benzerlik ilkesi, DNA'nın zamanla nasıl değiştiği hakkında belirli kurallar verildiğinde, evrimsel olayların en olası sırasını yansıtan bir ağacın bulunabileceğini belirtir. Örneğin, transversiyonlar veya transisyonlar gibi mutasyonların oranı, DNA dizisinden ve kimyasal bilgiden doğru bir şekilde tanımlanabilir. Bu kurallar, dizilerde belirli değişikliklerin meydana gelme olasılığını tahmin etmek için modellere dâhil edilebilir.



Şekil 6.8 Soldaki jeolojik zamanla hizalanmış bir filogenetik ağaç örneği. Bu ağaç jeolojik zamana göre hizalanmış büyük Lepidoptera (kelebek ve güve) taksonlarını göstermektedir. Mor blok kapalı tohumlu bitkilerin ne zaman yayıldığını gösterir. Ağaç dikey olarak yönlendirilir (Kaynak: wikicommons, Jerry A Powell, Conrad Labandeira).

6.9 Hipotezleri Test Etmek için Filogenetik Ağaçları Kullanmak

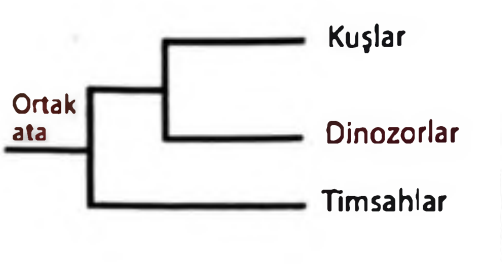
Filogenetik ağaçlar sınıflandırma ve düzenleme için yararlıdır, ancak sadece yaşamın bir 'pul koleksiyonunu' yapmak ve organizmalar arasındaki ilişkilerle ilgili bilgileri düzenlemek için kullanılan bir araç değildir. Bunların yanı sıra bilimsel hipotezleri test etmek için de kullanılabilirler. Bu alanda, Dünyadaki canlıların nasıl ilişkili olduğunu ve gelecekte nasıl gelişebileceğini anlamaya çalışmak için faydalı olurlar. Filogenetik ağaçlar için en iyi hipotezler en fazla morfolojik, moleküler ve fosil veriye sahip olanlardır.

Filogenetik ağaçlar kullanılarak yapılan hipotez testlerinin bir örneği **filogenetik basamaklamadır**. Bu, bir atanın özelliklerini onun soyundan gelenlerin özelliklerine bakarak anlamamıza izin veren bir yaklaşımdır. Buna iyi bir örnek dinozorlardır. Dinozorlar günümüzde yaşamıyorlar ama ortak bir atayı paylaştıkları diğer akrabaları mevcut. Kuşlar ve timsahlar, dinozorlarla 'ilişkilidir' (Şekil 6.9) ve bunların günümüz dünyasında canlı olarak birçok örneği var. Hem kuşlar hem de timsahlar kılsızdır, bu yüzden birçok dinozorun da öyle olduğunu söyleyebiliriz. Kuşlar ve timsahlar yumurta bırakırlar ve dinozorların da bunu yaptığını söyleyebiliriz. Bu çıkarımların her ikisi de fosil kayıtlar tarafından desteklenmektedir. Dinozor yumurtalarına ait fosiller defalarca bulunmuştur ve iyi korunmuş dinozor fosilleri kıl için bir kanıt göstermemektedir. Bu yolla, fosil kanıtları anlamak ve fosil gözlemleri yeniden doğrulamak için filogenetik ağaçları kullanabiliriz. Ek olarak, fosillerde bu kadar kolay korunamayan fizyolojik veriler de ortaya çıkarabiliriz.

Filogenetik basamaklamaya dayalı olarak geliştirilebilecek üç tür çıkarım vardır. Dinozorların yumurta bırakabileceği sonucuna varmak, tip I çıkarım olarak adlandırılır, çünkü dinozorlarla ilişkili her iki ata da bu özelliğe sahiptir. Mevcut akrabalardan biri özelliğe sahipken diğeri sahip olmadığında tip II çıkarım yapılır. Dinozorlar söz konusu olduğunda, bazı dinozorların kuş gibi tüyleri olabileceği sonucuna varmak bir tip II çıkarımdır, çünkü timsahların tüyleri yoktur. Bu çıkarımın doğruluğu tüylerin ne zaman geliştiğine bağlıdır. Sadece filogenetik basamaklamadan, dinozorların timsah benzeri bir cilde sahip olduğu sonucuna da varılabilir. Tip III çıkarımlar, mevcut akrabalardan hiçbiri belli bir özelliğe sahip olmamasına rağmen yapılanlardır. Dinozorların kılları olduğu sonucuna varmak, günümüzde var olan kuşlar veya timsahlar bu özelliği sergilemediği için bir tip III çıkarım olacaktır. Tip III çıkarımlar günümüzde hala var olan ilişkili organizmalar ilgili özelliğe sahip olmamasına rağmen, yalnızca nesli tükenmiş organizmanın bu özelliğe sahip olduğuna dair güçlü bir pozitif kanıt (örneğin, katı fosil kanıtı gibi) varsa garanti edilir.

Filogenetik ağaçlar, türlerin evrimine ve hatta coğrafi kökenlerine bakmak için çok güçlü bir şekilde kullanılmıştır.

İnsanın evrimini araştırmak buna bir örnektir. İnsanlar nereden geldi? Daha önce 16S rRNA'nın ne kadar korunmuş ve Dünyada bir filogenetik yaşam ağacı oluşturmak için mükemmel olduğunu gördük. Fakat insanları incelemek



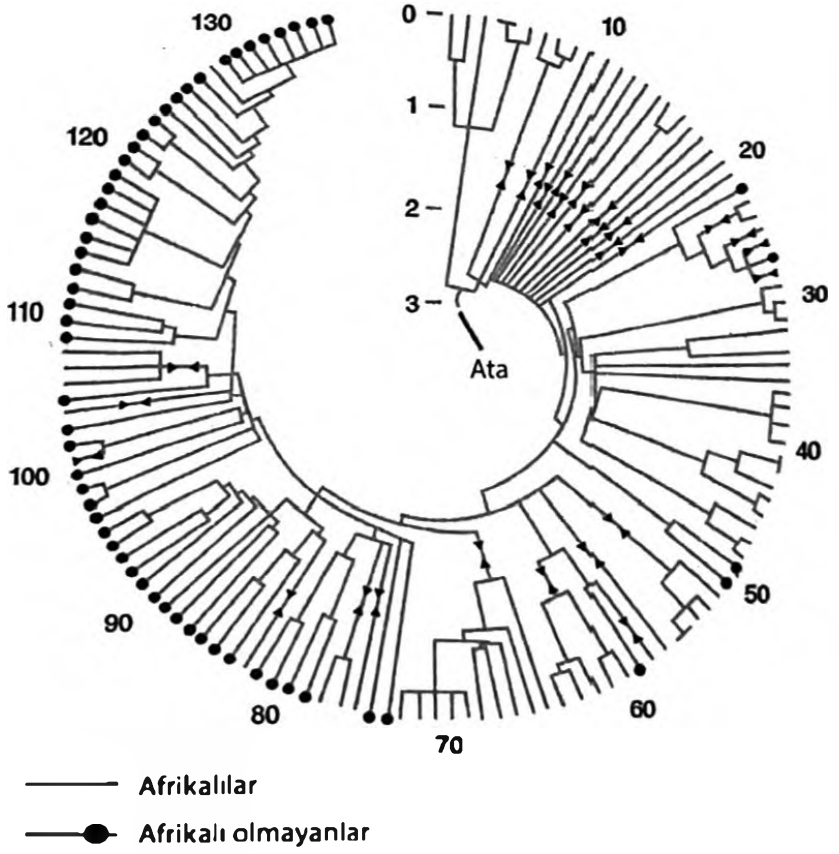
Şekil 6.9 Filogenetik basamaklama uzun zaman önce yok olan organizmaların özelliklerini ortaya çıkarmak için kullanılabilir, burada dinozorlarla ortak bir atayı paylaşan mevcut organizmalar (kuşlar ve timsahlar gibi) gösterilmiştir (Kaynak: Charles Cockell).

istiyorsak, rRNA'daki değişiklikler insan evriminin son üç milyon yılında genellikle çok azdır. Bunun yerine, daha hızlı değişen ve son birkaç milyon yılda insan soyundaki değişiklikleri çözmek için kullanılabilecek genleri seçiyoruz. Mitokondriyal DNA bu işlevi iyi bir şekilde yerine getirir.

Şekil 6.10'da gösterilen filogenetik ağacın her ucu, 189 kişi arasında bulunan 135 farklı mitokondriyal DNA (mtDNA) türünden biridir. Ağaç üzerinde Afrikalı mtDNA tipleri açıkça temeldir, Afrikalı olmalayan türler onlardan türemiştir. Bu, insanların Afrika'dan geldiğini göstermektedir (Şekil 6.10).

6.10 Evrensel Bir Yaşam Ağacı Oluşturmadaki Zorluklar

Bu bölüm şimdiye kadar DNA da dâhil olmak üzere özellikleri karşılaştırarak ve farklılıkları ölçerek bir filogenetik ağaç oluşturabileceğimiz izlenimini verdi. Bu genel olarak doğru. Bununla birlikte, bu varsayımın temelinde, bilginin sadece dikey olarak iletildiği fikri vardır –başka bir deyişle, DNA ve nihai **fenotipik** (fiziksel) göstergeleri sadece bir nesilden diğerine daha sonra bir filogenetik ağaç oluşturmak için kullanabileceğimiz küçük değişikliklerle aktarılır. Değişikliklerin kapsamı esasen evrimsel mesafeyle ilişkilidir. Bununla birlikte, yaşam ağacının bu basit görünümü tamamen doğru değildir. Bir filogenetik ağaç yapımında burada tartışılan en az iki pürüz vardır.



Şekil 6.10 Bir mitokondriyal DNA filogenetik ağacının evrimsel değişiklikleri ve dolayısıyla insanların kökenlerini ortaya çıkarmak için kullanılması. Afrikalı olmayanlar, insan evrimi ağacına daha yakın bir zamanda eklenmiştir. Kaynak: Vigilant ve ark. 1991. Amerikan Bilimin Gelişimi Derneğinin izniyle çoğaltılmıştır.

6.10.1 Endosimbiyoz

Endosimbiyoz, hücrelerdeki bazı organellerin hücrelere sonradan dâhil olan bağımsız organizmalardan köken aldığı fikridir. Örneğin siyanobakterilerin ökaryotik fotosentetik organizmalar, algler ve bitkiler içindeki kloroplastların öncüsü olduğu düşünülmektedir. Bu, Bölüm 4'te daha ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bazı genetik bilgilerin (kloroplast ve mitokondriyal DNA gibi) farklı bir organizmanın DNA'sından gelmesi ve birleştiği organizmanın nükleer genomundan farklı bir evrimsel yol benimseme olasılığı gibi sebepler sonucu endosimyoz, filogenetik ağaçlar yapmak için açıkça bir problem yaratmaktadır. Bu organel DNA'sı, insan evriminin filogenetik ağaçlarını oluşturmak için kullanılan mitokondriyal DNA gibi evrimsel değişiklikleri izlemek için yararlı olsa da endosimbiyoz, filogenetik ağaçlar oluşturmak için kullanılan genetik bilgilerin kökenine dikkat etmemizi sağlar.

6.10.2 Yatay Gen Aktarımı

Genetik materyalin organizmalar arasındaki hareketi yaşam ağacını karmaşık hale getirir. Bu hareket prokaryotlarda çok yaygındır. Bilginin bir nesilden diğerine ardışık olarak aktarıldığı 'dikey' bilgi iletiminden farklı olarak, 'yatay' gen aktarımı, iki mevcut organizma arasında nükleik asidin doğrudan iletimini ifade eder. Yatay gen aktarımı (HGT*) organizmalara bazı önemli potansiyel avantajlar sağlar. Çevreye uyum sağlamak için kullanılabilecek bilgilerin, önceki nesillerden ufak değişikliklerle yeni özellikler kazanma sürecine kıyasla daha hızlı kazanılmasına olanak sağlar. Bununla birlikte HGT, nükleik asitte gözlenen değişikliklerin her zaman o belirli organizmanın önceki nesillerinden meydana gelen mutasyonlar olduğunu veya DNA ve kodlanmış fonksiyonunun bulunduğu soyda geliştiğini varsayamadıklarından, filogenetikçiler için işleri zorlaştırır. İşlem bazen dikey gen aktarımı (LGT') olarak adlandırılır. Prokaryotların yatay gen aktarımını gerçekleştirmesinin üç ana yolu vardır.

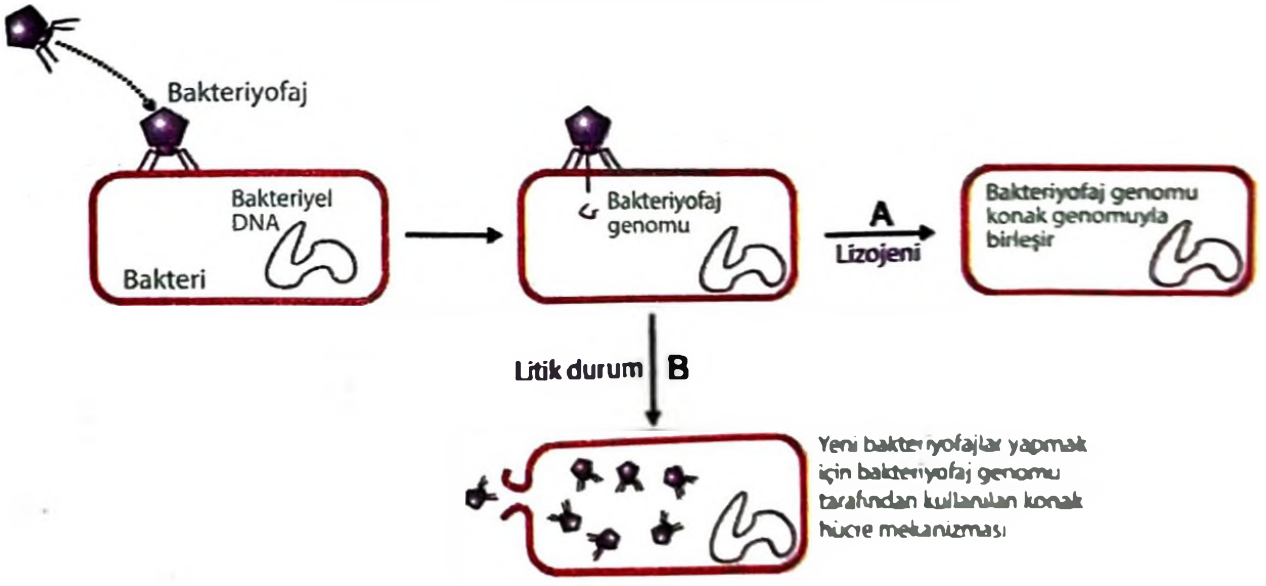
1. *Transformasyon* Prokaryotlar çıplak DNA'yı ortamdan alabilir. Bu, hücrelerin bir yeterlilik durumuna girmesini gerektiren dikkate çekici bir kapasitedir. Hücrelerin büyümenin durağan evresine girdiklerinde tranformasyonlara daha duyarlı oldukları düşünülmektedir. Bu sürecin evrimsel nedenleri hala tam olarak anlaşılamamıştır. Bir hipotez, hücreler durağan fazda ve genomlarının daha az kopyasına sahipken DNA hasarını onarmak için bir araç olarak bu sürecin geliştiğidir. Hücre dışındaki serbest DNA hataları düzeltir. Biyokimyasal süreç basit değildir. *Bacillus subtilis* bakterisinde 40'tan fazla gen, bir hücrenin dışarıdan DNA almaya yeterli hale getirilmesinde rol oynar. Aynı veya farklı türlerin organizmaları arasında transformasyon meydana gelebilir. Hücreler, onları daha

* [İng.] Horizontal Gene Transfer –çn.

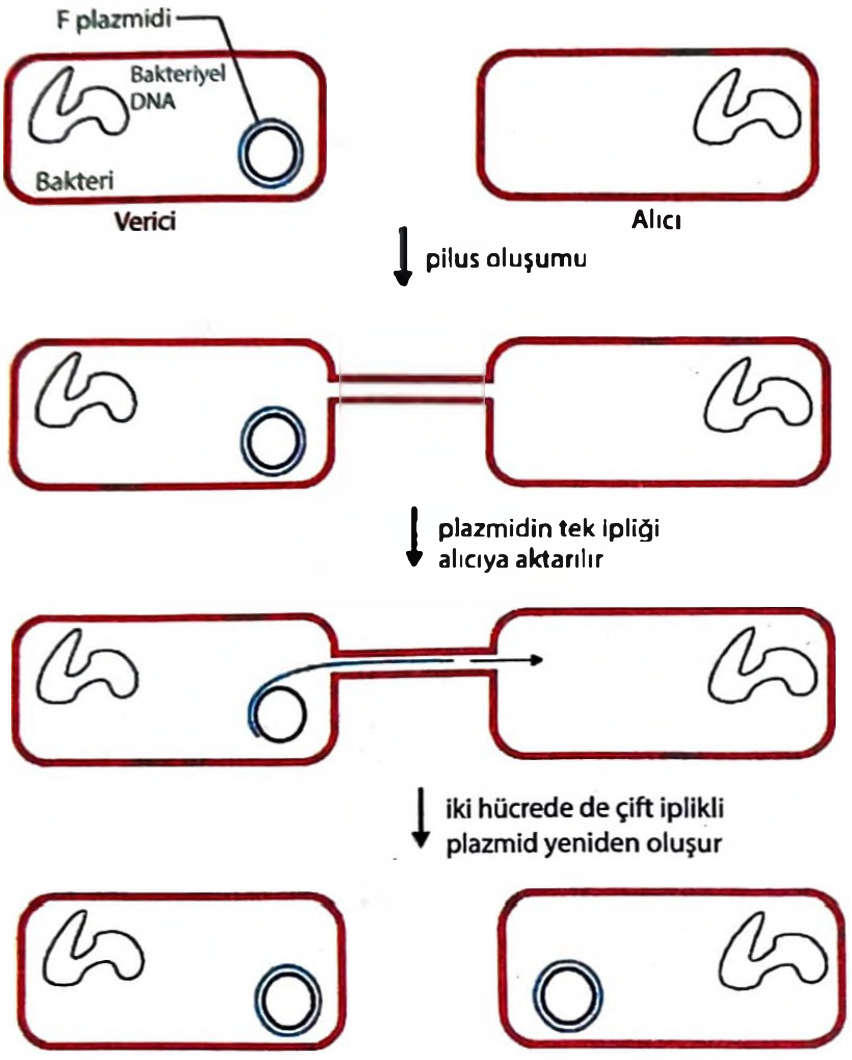
' [İng.] Lateral Gene Transfer –çn.

'geçirgen' ve çevrelerinden DNA almaya daha müsait hale getirmek için $CaCl_2$'yle muamele gibi kimyasal yöntemlerle transformasyon için yeterli hale getirilebilir. Bu yöntem genetik mühendisliğinde DNA'yı hücrelere dâhil etmenin ve ilgili bir bileşik (ilaç gibi) üretmek için bu hücreleri 'fabrikalara' dönüştürmenin bir yolu olarak kullanmıştır.

2. *Transdüksiyon* DNA, bakterileri enfekte eden bir virüs olan bakteriyofaj gibi bir ajan aracılığıyla mikroplara aktarılabilir (Şekil 6.11). Virüs parçacığı hücreyi ele geçirebilir ve hücrenin genetik mekanizmasını kendi kopyalarını üretmek için kullanabilir veya lizojeni durumuna girebilir, böylece nükleik asit konak hücrenin genomuna dâhil edilir ve yüzlerce veya binlerce nesil boyunca taşınır. Transformasyon gibi, transdüksiyon da bir hücreye genetik bilgi vermek için yapay olarak kullanılır.
3. *Konjugasyon* Konjugasyon sürecinde genetik bilgiler mikroorganizmalar arasında aktarılabilir (Şekil 6.12). Bir verici hücre, **pilus** adı verilen özel bir yapı aracılığıyla bilgileri alıcı bir hücreye aktarır. Bilgiler genellikle küçük dairesel DNA parçaları olan **plazmidler** (Bölüm 4) veya doğrusal hareketli genetik elementler olan transpozonlarla aktarılır. Plazmidler yaşamın üç üst âleminde de bulunur ve konak hücre içinde otonom olarak çoğalabilir. Bununla birlikte, bir plazmidin bir hücreden diğerine konjugasyon yoluyla aktarılması için pilusu ve DNA'nın aktarılması için gerekli olan diğer faktörleri kodlayan *tra* genlerini taşıyan bir plazmide ihtiyaç vardır. Bu plazmidlere Fertilite plazmidleri veya F plazmidleri denir.



Şekil 6.11 *Transdüksiyon bir bakteriyofaj kendi DNA'sını bir bakteriye enjekte ettiğinde meydana gelir. DNA, konak genomuna dâhil edilebilir ve lizojenik durum olarak bilinen süreçle organizma bölündükçe kendini çoğaltabilir (A yolu) veya litik durumda kalarak hücre mekanizmasını kendisinin yeni kopyalarını yapmaya yönlendirebilir (B yolu)* (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 6.12 Konjugasyon, genetik materyalin bir mikroorganizmadan diğerine aktarılmasıyla sonuçlanır. Alıcı organizma daha sonra yeni plazmidin diğer mikroorganizmalara aktarılması için kompetan (yeterli) hale gelir (Kaynak: Charles Cockell).

Size insanlara doğru yürüyüp onlara dokunarak, göz renklerini benim göz rengimle değiştirebileceğimi söylediğimi hayal edin. Konjugasyon tam olarak bu olağanüstü beceriye sahiptir. Konjugasyon, genetik bilginin üst âlemler arası aktarımını sağlayabilme özelliğiyle dikkat çekicidir. Örneğin, azot sabitleyici bakteri *Agrobacterium* kendi genlerini bitki hücrelerine aktarabilir ve böylece bitki hücreleri içinde bakterilerin yaşayabileceği habitatlar (safralar) oluşturacak şekilde bitki hücrelerinin büyümesini değiştirebilir, bu bir tür **simbiyoz**. Bitkiler tutuklanmış azottan yararlanırken bakteriler beslenebilecekleri bitkisel atıklar ve organik maddelerden yararlanır.

Bu HGT formları iki açıdan son derece önemlidir.

Birincisi, bakterilerdeki antibiyotik, ağır metal ve toksin direncinden sorumludurlar, bu da onları tıp ve çevre bilimleri için önemli kılar. Bakterilere ağır metal direncinin aktarılması veya ağır metale direnç geni taşıyan plazmid-

lere sahip bakterilerin seçimi biyoremediasyonda -ağır metallerle kirlenmiş alanların temizlenmesi- kullanılır.

İkincisi, yaşam ağacını karmaşıklaştırırlar. Bir filogenetik ağaçtaki büyük ve ilişkisiz bir organizma grubunda ağacın diğer dallarındaki organizmalarda olmayan bir grup gen bulursak, birkaç olasılık hakkında düşünmemiz gerekir. Genler eski bir ortak atadan mı geliyor? Bunlar başlangıçta birçok organizmada bulunan ama sonra bazılarında kaybolan genler mi? Bu genler HGT ile organizmalar arasında aktarıldı mı? HGT, bilginin yaşam ağacının dalları boyunca ve hatta üst âlemler arasında geniş çapta aktarılma olasılığıyla dikey bilgi aktarımını tanımlayan basit filogenetik ilişkilerin arttırılması gerektiğini göstererek bizleri, yaşam ağacını daha uygun bir tanımla bir yaşam ağı olarak görmeye davet ediyor.

6.11 Son Evrensel Ortak Ata

Yaşam ağacında bilinen tüm organizmaların ortak bir atayı paylaştığı açık. Filogenetikçiler ve astrobiyologlar için en önemli zorluklardan biri, son evrensel ortak atanın (LUCA*) doğasını belirlemek olmuştur.

Bunu yapmaya yönelik ilk girişim, paralog protein çiftlerinin analizine dayanıyordu. Bunlar duplike genler tarafından kodlanan proteinlerdir. Gen duplikasyonu üç üst âlemin hepsinde görülüyorsa bu, duplikasyon olayının üst âlemlerin birbirinden ayrılmasından önce gerçekleştiği anlamına gelir. Bu nedenle, çeşitli paralog genlerin dağılımı incelenerek, üst âlemlerin birbirinden ne zaman ayrıldığına yönelik bir çıkarım yapılabilir. Bu, Carl Woese (1928–2012) ve diğerlerinin yaşam ağacının kökeninde bakterilerin bulunduğunu ve daha sonra arkeler ile ökaryotlar arasında bir ayrılma meydana geldiğini ortaya çıkarmasına yol açtı. Yaşamın her üç üst âleminde bulunan genleri tanımlamak için dizilenen tüm genomlar kullanılarak yapılan daha yakın tarihli bir incelemede, daha sonra benzer sonuçlarla bir filogenetik ağaç oluşturmak için kullanılan yaklaşık 100 ortak gen ortaya çıkarılmıştır.

Bu görüşün aksine LUCA'yı bakteriler ve arkeler arasındaki ayrılmadan sonraya, ökaryotlara daha yakın bir yere yerleştiren bir görüş mevcuttur. Bu hipotez, Bölüm 11'de ele alınacak olan biyolojik varlıkların oluşumundan önceki RNA dünyasının kalıntısı olduğu varsayılan, RNA kırpılması da dâhil olmak üzere RNA'yı içeren birçok karmaşık sürecin ökaryotlarda bulunduğu fikrine dayanmaktadır.

Bu derin çıkarımların yapılmasıyla oluşan bir sorun, farklı türlerde farklı değerlere sahip olan evrimsel değişim oranları kullanılarak ağaç yeniden oluşturulurken sapmaların meydana gelmesidir. Örneğin, ribozomal RNA değişikliklerinin evrim oranları foraminiferlerde 100 kata kadar değişir. Analizde

* [İng.] Last Universal Common Ancestor –çn.

yapay olgular da mümkündür. Uzun dal çekimi (LBA*) olarak bilinen bir yapay olgu, gerçek filogenetik bağlantılarından bağımsız olarak en hızlı değişen dizilere karşılık gelen en uzun dalların kümelenmesine yol açar. Bu olgu, hızla evrim geçiren dizilerde bazı bazların diğer dizilere özdeş bazlara dönüşmesi nedeniyle oluşur. Böylece, dizileri yapay olarak filogenetik açıdan daha yakın gösterirler. Evrensel bir yaşam ağacı, sadece yavaş yavaş evrim geçiren genleri kullanmak için özel çaba sarf ederek oluşturulduğunda, yaşamın kökü bakteriler içinde o kadar net bir şekilde oturmaz ve bunun yerine bakteri soyundaki köklenmenin bir kalıntısı olabileceğini gösterir.

Ağacın gerçek evrimsel kökünü tanımlama probleminin bir kısmı, dikkate alınan gen sayısının düşük olmasıdır. Daha fazla sayıda organizma genomu dizilendikçe, kökü belirlemek için kullanılabilecek bilgi miktarıyla birlikte çıkarımların doğruluğu da artar.

LUCA'nın işlevsel yeteneklerinin ne olduğu özellikle ilgi çekici bir sorudur. TCA döngüsü ve elektron taşıma zincirlerinin bileşenleri gibi bazı biyokimyasal yolaklar, yaşamın üç üst âleminde de yaygın olarak dağılmış ve mevcuttur, bu da eski olduklarını ve LUCA'da mevcut olabileceklerini düşündürmektedir.

Yaşam ağacının bir erken dönem analizi, en derine dallanan organizmaların sıcağı sevenler olduğunu gösterdi (termofiller ve hipertermofiller; Bölüm 7). Bu, gözlemleri açıklamak için çok sayıda hipotezin ortaya çıkmasına neden oldu. Örneğin, Dünyanın erken dönemlerindeki yoğun çarpışma bombardımanının, yüksek sıcaklığa toleranslı organizmalar için evrimsel bir darboğaz oluşturduğu ileri sürülmüştür. Bombardımanın ardından etkiler daha seyrek ve Dünya daha serin olduğunda, yaşam daha düşük sıcaklıklarda büyümeye uyarlanan daha fazla çeşitlilikte mikroorganizmalara yayılmış olabilir.

Yine de sıcak ortamdaki yaşamın atası sorgulandı. Sıcağı seven bakteriler, genlerinin neredeyse %24'ünü yatay gen aktarımıyla arkelerden almıştır. DNA'ya süper sarmal ekleyen, gevşemeyi zorlaştıran ve görünüşe göre yüksek sıcaklıklara direnç kazandıran bir enzimi kodlayan DNA ters giraz geni, arkelerden yatay gen aktarımıyla geçmesi muhtemel bir gen örneğidir. Bu gen, yüksek sıcaklıktaki ortamlarda yaşayan *Thermatoga* ve *Aquifex* gibi bakterilerde bulunur. Yaşam bakteri kökenli olsa bile bu genler başka organizmalardan bakterilere geçtiği için, mevcut veriler yaşamın sıcak ortamlardan kökenlendiği görüşüne karşı çıkabilir. LUCA'nın işlevsel yeteneklerini ortaya çıkarmada birkaç karmaşıklık vardır. İlk olarak yaşam ağacının nereden köken aldığına dair havada kalan soru, ancak yüksek sıcaklığa uyarlanımın öncelikli olarak kalıtılan bir özellik olup olmadığı belirlenebildiği zaman cevaplanmalıdır. İkincisi, yaşam ağacı yüksek sıcaklıklarda yaşama uyarlanan organizmalardan kökenlenmemiş olsa bile bu, yaşamın kökeni ile günümüzdeki organizmalar tarafından tanımlanan ağacın kökü arasında önemli bir zaman dilimi ve soyu

* [İng.] Long branch attraction –çn.

tükenmiş organizmalar bulunacağından, yaşamın sıcak ortamlardaki kökenini reddetmez.

Erken dönem organizmaların yeteneklerini bulmak için ilgi çekici bir yaklaşım, onlarda var olabilecek proteinleri yeniden yaratmaktır. Bir çalışmada, protein sentezi için tRNA'ların ribozom içine getirilmesinde rol oynayan elongasyon faktörleri (EF'ler) araştırıldı. Şu anda mevcut olan geniş genom dizilimi kullanılarak, yaklaşık iki milyar yıl önce var olabilecek atalardan kalma, eski EF dizilerini bulmak mümkün oldu. Bu EF'ler, antik olduğu varsayılan dizilere göre sentezlenmiş DNA dizileri kullanılarak laboratuvarda yeniden oluşturulduklarında, en iyi ~65 °C'de çalıştıkları bulundu ve bu proteinler için bir termofilik köken önerildi.

Son olarak, elbette, LUCA'nın yeteneklerinin ve özelliklerinin bugünkü üç üst âlem tarafından tanımlandığını varsayıyoruz. Yaşamın erken dönemlerinde yok olan üst âlemler ve onlarla birlikte kaybolan önemli bilgiler olmadığından emin olamayız.

6.12 Moleküler Saatler

Filogenetik ağaçlar, belirli yapılarda veya moleküllerde zamanla oluşan küçük evrimsel değişiklikler fikrine dayanır. Bununla ilgili olarak ortaya **moleküler saatler** kavramı çıktı. 1960'ların başında Linus Pauling (1901-1994) ve Emile Zuckerkandl (1922-2013) hemoglobindeki amino asit farklılıklarının sayısının zamanla aşağı yukarı doğrusal olarak değiştiğini fark ettiler. Daha sonra, mitokondride enerji kazanımının (elektron taşınması) (Bölüm 4) bir bileşeni olan sitokrom *c*'nin amino asitlerindeki farklılıkların, başka bir türden ayrılmasından bu yana geçen süreyle ilişkili olduğu fark edildi. Gözlemler, proteinlerde bulunan amino asit bileşimlerindeki değişikliklerin (ve sonuç olarak bunları kodlayan kodonların) zamanla sabit olduğu fikrine yol açtı.

Bu gözlemlerden bu yana, değişim oranlarının sabit olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca, moleküler değişim oranları taksonlar arasında büyük farklılıklar göstermektedir. Kaplumbağalar, birçok memeliden oranın onda biri kadar daha yavaş çalışan moleküler saatlere sahiptir. Nüfus boyutları, farklı metabolizmalar ve diğer faktörlerin hepsi moleküler saatlerin oranını etkiler. Bununla birlikte, fosil kanıtlarıyla ilişkilendirildiğinde, moleküler saat kavramının moleküler sistematik için yararlı olduğu kanıtlanmıştır ve moleküler olayların zamanlamasının belirlenmesini ve filogenetik ağaçların oluşturulmasını kolaylaştırmıştır.

Tartışma Noktası: Gölge biyosferler?

Filogenetik ağaç, Dünya üzerinde bilinen tüm organizmalar arasındaki evrimsel ilişkiyi temsil eder. Ortaya çıkan ilgi çekici bir soru, birden fazla yaşam kaynağı olsaydı, Dünyadaki yaşam ağacında temsil edilmeyen tamamen farklı genetik yapıya sahip

başka organizmaların olup olamayacağıdır. Gölge biyosferler olarak adlandırılan bu organizmalar, tespit edilmemiş uç bir ortamda bir yerde saklanabilecek bağımsız biyokimyaları (örneğin, farklı bir protein veya şeker kiralitesi kullanan organizmalar) oluşturacaktır. Bu öneri hakkında ne düşünüyorsunuz? Dünyada zaten bildiğimiz yaşamda farklı bir biyokimyası olan organizmaları tespit etmek için hangi yöntemleri düşünebilirsiniz? Bir gölge biyosferin, canlıları karakterize etmek için kullandığımız çeşitli mikrobiyal ve moleküler araçlarla dikkatimizi çekeceğini düşünüyor musunuz? Davies, P.C.W., Benner, S.A., Cleland, C.E., Lineweaver, C.H., McKay, C.P., Wolfe-Simon, F. (2009) Signatures of a shadow biosphere. *Astrobiology* **9**, 241-249.

6.13 Yabancı Yaşam

Eğer evrende Dünya üzerindeki yaşamdan bağımsız kökene sahip bir yaşam keşfedilmiş olsaydı, bu yaşamın kendi evrimsel kökenlerine ve kendi genetik bilgilerine dayanan tamamen farklı bir yaşam ağacına sahip olmasını beklerdik. Bundan dolayı Dünyanın filogenetik ağacının oluşturulması, Dünyadaki canlılar arasındaki ilişkiyi, eğer bulursak, diğer yaşam ağaçlarıyla eninde sonunda karşılaştırmalar yaparak tek bir diyagramda eşsiz bir biçimde tanımlamamıza izin verir.

Bir başka varsayımsal senaryo, kendi Güneş Sistemimiz içerisinde başka bir yerde var olan bir yaşamın keşfi olurdu. Ancak keşfedilen bu yaşam, astreoit ya da kuyruklu yıldız etkisiyle gezegenimizin yüzeyinden kopan kayalar aracılığıyla başka bir gezegenimsiye taşındığı veya Dünya üzerindeki yaşam aslında başka bir yerden köken aldığı için bir şekilde Dünyadaki yaşamla ilişkili olacaktır. Bu uzak ilişkili yaşam, muhtemelen bildiğimiz yaşam ağacında kendine yer bulacak, ancak yaşamın oraya ne zaman geçiş yaptığına bağlı olarak çok derinden kök salmış olacaktı. Böyle bir yaşam varsa, LUCA'nın doğasını belirlemek için ek bilgilerin toplanabileceği bir yol sağlayacaktır. En azından, bu teorik yabancı yaşam senaryolarını düşünmek bize yeryüzündeki yaşam ağacını daha iyi anlamamız için bir bakış açısı kazandırır.

6.14 Sonuç

Dünyadaki canlı çeşitliliği çok büyük. Toplam tür sayısını bilmiyoruz, ancak bu organizmaların sistematik olarak nasıl adlandırılabileceğini, evrimsel ilişkilerini nasıl tanımlayabileceğimizi ve hangi ortak atadan kökenlendiklerini anlamak istiyoruz. Bu bölümde filogenetik ağaçların oluşturulmasına yönelik bazı yaklaşımları ve bunu yapmaya çalışırken ortaya çıkan bazı problemleri, özellikle de yatay gen transferinin meydana gelebileceği farklı yolları inceledik. Filogenetik ağaçlar oluşturmak sadece organizmaları sınıflandırmak ve Dünyada bir canlı listesi oluşturmak için bir araç değildir. Ayrıca bize yaşamın evrimiyle ilgili bilimsel hipotezleri test etmenin bir yolunu sunarlar ve sonuçta yabancı yaşamı incelememiz için bir yol bile sağlayabilirler.

İleri Okumalar

Kitaplar

Gould, S.J. (2000) *Wonderful Life: Burgess Shale and the Nature of History.* Vintage, New York.

Wilson, E.O. (1999) *The Diversity of Life.* Norton and Co.,New York.

Yayınlar

Baldauf, S.L. (2003) Phylogeny for the faint of heart: a tutorial. *Trends in Genetics* 19, 345–351.

Bousseau, B., Blanquart, S., Necsulea, A., Lartillot, N., Gouy, M. (2008) Parallel adaptations to high temperatures in the Archaean eon. *Nature* 456, 942–945.

Ciccarelli, F.D., Doerks, T., Von Mering, C., Creevey, C.J., Snel, B., Bork, P. (2006) Toward automatic reconstruction of a highly resolved tree of life. *Science* 311, 1283–1287.

Delsuc, F., Brinkmann, H., Philippe, H. (2005) Phylogenomics and the reconstruction of the tree of life. *Nature Reviews Genetics* 6, 361–375.

Gregory, T.R. (2008) Understanding evolutionary trees. *Evolution, Education and Outreach* 1, 121–137.

Hedges, S.B., Blair, J.E., Venturi, M.L., Shoe, J.L. (2004) A molecular timescale of eukaryote evolution and the rise of complex multicellular life. *BMC Evolutionary Biology* 4, 2–12.

Mora, C., Tittensor, D.P., Adl, S., Simpson, A.G.B., Worm, B. (2011) How many species are there on Earth and in the Ocean? *PLoS Biol* 9, e1001127; doi:10.1371/journal.pbio.1001127.

Pace, N.R. (1997) A molecular view of microbial diversity and the biosphere. *Science* 276, 734–740.

Pace, N.R. (2009) Mapping the tree of life: progress and prospects. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 73, 565–576.

Puigbò, P., Wolf, Y.I., Koonin, E.V. (2013) Seeing the Tree of Life behind the phylogenetic forest. *BMC Biology* 11, 46–49.

Sanderson, M.J., Driskell, A.C. (2003) The challenge of constructing large phylogenetic trees. *Trends in Planet Sciences* 8, 374–379.

Vigilant, L., Stoneking, M., Harpending, H., Hawkes, K., Wilson, A.C. (1991) African populations and the evolution of human mitochondrial DNA. *Science* 153, 1503–1507.

Woese, C.R. (1998) The universal ancestor. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95, 6854–6859.

Woese, C.R., Kandler, O., Wheelis, M.L. (1990) Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87, 4576–4579.

7

BİYO-UZAYIN SINIRLARI

Öğrenme Çıktıları

- Biyo-uzay kavramını ve bu kavramın astrobiyologlar için neden önemli olduğunu anlamak.
- Farklı ekstremofillerin uyarlanımlarını tanımlayabilmek ve açıklayabilmek.
- Ekstremofiller üzerindeki araştırmaların pratik kullanımlarını kavramak.
- Habitatların zorlu koşullardan korunmadaki rolünü anlamak.
- Birden fazla zorluğun ve çoklu-ekstremofillerin önemini açıklamak.
- Zorlu bir ortam olarak yeraltı derinliklerinin önemini kavramak.

7.1 Biyo-uzay

Dünyadaki yaşam üzerine düşünmenin yollarından biri, çok sayıda türün evrimsel olarak nasıl ilişkili olduğu hakkında düşünmektir. Bölüm 6'da benimsediğimiz yaklaşım budur. Biyosferi kavramsallaştırmanın bir başka yolu da, bu katmandaki canlıların fiziksel ve kimyasal zorluklara karşı dayanıklılıklarını göz önünde bulundurmaktır. Tüm organizmalar, ötesinde canlıların uyum sağlayamayacağı bir dizi fiziksel ve kimyasal zorluk bulunan bir çitle –yaşamı ölümden ayıran bir çit– çevrili muazzam bir biyolojik hayvanat bahçesi içinde görülebilir. Şekil 7.1 bu durumun iki boyutlu olarak nasıl göründüğünü kavramsal yolla göstermektedir. Buna *biyo-uzay* diyebiliriz. Bu sınırlar, seçilen durumun sınırlarına bağlı olarak farklı şekillerde belirlenebilirler. Üreme sınırları, metabolik aktivitenin sınırları veya hayatta kalma sınırları olarak tanımlanabilirler. Bu durumların her biri için sınırların genellikle art arda daha büyük olmasını bekleriz (organizmalar genellikle başarılı bir şekilde çoğalmak için ihtiyaç duydukları koşullardan daha zor koşullarda hayatta kalabilirler). Bu nedenle araştırılan belirli biyolojik davranışa göre bir biyo-uzay tanımlamak gerekir.



Şekil 7.1 Biyo-uzay'ın basitleştirilmiş bir gösterimi, yaşamın var olabileceği fiziksel ve kimyasal zorluklar tarafından tanımlanan alan. Yaşamın sınırlarını tanımlayan, burada gösterilenlerden başka daha birçok zorluk var. Bu sınırlar sağkalım, metabolik aktivite (büyüme) veya üreme için tanımlanabilir (Kaynak: Charles Cockell).

7.2 Biyo-uzay'ın Astrobiyoloji için Önemi

Yaşamın sınırlarını araştırmak astrobiyoloji için önemlidir, çünkü diğer gezegenimsiler üzerinde belirlediğimiz koşulları biyo-uzayla karşılaştırmamıza ve şu soruyu sormamıza olanak sağlar: 'Bu Dünya dışı koşullar, Dünyadaki yaşama uygun olduğunu bildiğimiz koşullarla örtüşüyor mu?'. Tabi ki yaşamın, daha önce gördüğümüz gibi, uygun fiziksel ve kimyasal koşullar dışında başka birçok şeye daha ihtiyacı var. Bununla birlikte biyo-uzay bize diğer gezegenimsilerin yaşanabilirliğinin birinci dereceden bir değerlendirmesi için bir temel verir. Fiziksel ve kimyasal koşullar tanımladığımız biyo-uzayın dışındaysa, yaşanabilirlik için diğer gereksinimlerin karşılanması gerçeği önemsiz hale gelebilir. Tersine, yaşama uygun fiziksel ve kimyasal koşulları olan bir gezegen ortamı bulursak sıvı su, enerji kaynakları ve temel elementler olan CHNOPS'un burada var olup olmadığını görmek üzere onu daha fazla incelemek için motive oluruz.

Biyo-uzay, ister istemez, Dünyadaki yaşam hakkında anladıklarımızla sınırlıdır. Bu, sınırları genişletebilecek zorlu ortamlardaki yaşamın araştırılmasında gelecekteki gelişmeleri hesaba katmayan muhafazakar bir sınırdır. Dahası, yalnızca çözücü olarak su kullanan karbon bazlı Dünya benzeri yaşam üzerine odaklanır. Eğer Bölüm 3'te tartışılanlar gibi alternatif kimyalar mevcutsa, bunlar şu anda yaşam için uygun fiziksel ve kimyasal koşullar olarak değerlendirdiklerimizin dışında kalan tamamen ayrı bir biyo-uzay oluşturacaklar. Açık fikirli olmalı ve biyo-uzayın kapsamı hakkındaki fikirlerimizi genişletmeye hazır olmalıyız. Bununla birlikte, diğer deneysel veriler olmadan, bu kabul etmemiz gereken bir sınırdır ve bize yararlı, işlevsel bir başlangıç noktası sağlar.

7.3 Biyo-uzay'ın Sınırlarına Mikroplar Hakimdir

Biyo-uzay sınırları içinde yaşam, etçil kangurulardan bir metre kanat genişliğine sahip yusufçuklara ve günümüzde yaşayan veya fosil kayıtlarla ortaya çıkarılan diğer tüm canlı türlerine kadar çok çeşitli, harika ve garip formlara

sahip olabilir. Ancak astrobiyologlar olarak bizi en çok biyo-uzayın uçları ilgilendiriyor, çünkü burada yaşamın sınırlarına karşı geliyoruz.

Biyo-uzayın uçlarında mikropların baskın olduğunu görüyoruz. Koşullar zorlaştıkça, karmaşık çok hücreli organizmaların sahip oldukları çoklu hücre tipleriyle birlikte tüm biyokimyalarını değiştirmesi gittikçe zorlaşır, bu da tek hücreli mikroplara bir avantaj sağlar. Zorlu koşulların genellikle canlı çeşitliliğinde bir azalmaya neden olduğunu gözlemliyoruz. Bu kavramsal olarak önemli bir noktadır. Bazı insanlar, 'zorlu koşullarda yaşam' ifadesinin *antroposentrik* olduğunu ve mikropların görüşlerini ifade etme şansları olsa bizim yaşam koşullarımıza zorlu diyebileceklerini söylüyorlar. Bu görüş kanıtlarla desteklenmemektedir. Canlıların bolluğunun ve çeşitliliğinin bu ortamların gerektirdikleri nedeniyle önemli ölçüde azaldığı fiziksel ve kimyasal 'zorlukları' gerçekten tanımlayabiliriz.

Zorlu ortamlarda yaşayan organizmalar genellikle iki kategoriye ayrılır. Bunlardan ilki *ekstremofil* (Yunanca *philos*–aşk) organizmalardır. Bunlar zorlu koşullarla sadece başa çıkmayan, aynı zamanda zorlu koşullar altında büyümelerini zorunlu kılan biyokimyasal uyarlanımlara sahip organizmalardır. Örnek olarak, büyümek için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyan birçok mikrop olabilir. İkinci olarak, *ekstremotolerant* organizmalar vardır. Bunlar, zorlu koşullarda büyümeye uyarlanmamış, ancak bu koşullarda büyüme kapasitesine sahip olan organizmalardır. Örneğin, Kuzey Kutbundaki birçok siyanobakteri normal kutup sıcaklıklarının çok üzerinde ideal büyüme sıcaklıklarına sahiptir, ancak orada yavaş ve sürekli büyümeyle yaşamlarını sürdürebilirler.

Farklı ekstremofil ve ekstremotolerant organizmaları, ihtiyaç duydukları veya tolere edebilecekleri farklı fiziksel veya kimyasal koşullara göre sınıflandırınız. Bazı örnekler Tablo 7.1'de gösterilmiştir.

Ekstremofil organizmaların çoğunluğunu arkeler oluşturur, ancak bakteriler arasında da ekstremofiller bulunur ve ökaryotlarda da bazı önemli hayatta kalma stratejileri geliştirenler vardır; ekstremofiller yaşamın her üç üst âleminde de bulunur.

Zorlu koşulların geniş bir listesini oluşturmak ve bunlara yönelik biyokimyasal uyarlanımları tanımlamak çok faydalı bir öğrenme alıştırması değildir. Bununla birlikte aşağıdaki bölümlerde, organizmaların zorlu ortamlara uyum sağlayabileceği ilkeleri araştırmak ve astrobiyoloji için önemli bazı anahtar bilgiler sunmak amacıyla bazı özel örneklere bakacağız.

7.4 Yüksek Sıcaklıklarda Yaşam

Pek çok organizma Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Yellowstone Milli Parkındaki kaplıcalar, derin deniz hidrotermal bacaları (Şekil 7.2a) ve yerkabuğunun derin bölgeleri gibi yüksek sıcaklıktaki ortamlarda yaşar. Büyümek için bu uç noktalarda yaşaması gereken organizmalara, uygun büyüme sıcaklığı

Tablo 7.1 Bazı mikrobiyal ekstremofil (italik) ve ekstremotolerant (kalın) organizmalara ve habitatlarına örnekler. Her durumda karşılaştıkları zorlukların bir örneği ve buna yönelik bir uyarlanım gösterilmiştir.

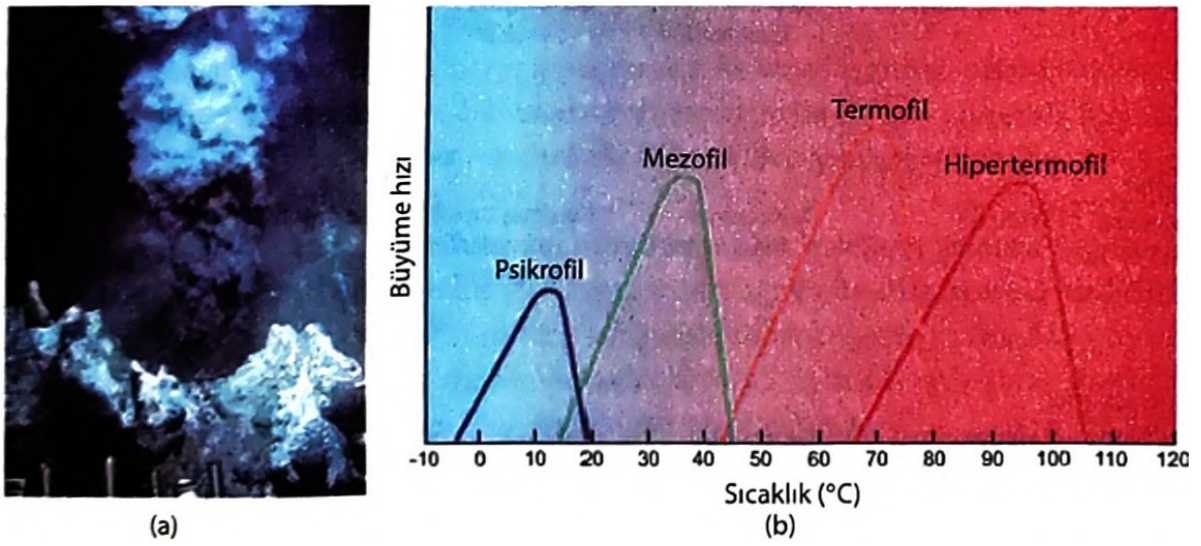
Zorluk türü ve ekstremofil/ ekstremotolerant organizmanın adı	Büyümeye izin veren (yeşil) veya tolere edilebilen (kırmızı) koşullar	Mikroorganizma örneği	Habitat örneği	Zorluk örneği	Uyarlanım örneği
Aşırı Sıcaklıklar					
Hipertermofil	>80 °C	*Pyrolobus fumarii* (Arke)	Hidrotermal bacalar	Moleküllerin termal yıkımı	Isıl kararlı enzimler
Termofil	45-80°C	*Thermus aquaticus* (Bakteri)	Kaplıcalar		Isıl kararlı enzimler
Psikrofil	<15°C	Ökaryotik maya	Buz tabakaları, buzullar	Zar akışkanlığının kaybı	Zarda daha fazla doymamış bağ
Aşırı Ph					
Asidofil	Düşük pH (<pH3)	*Acidithiobacillus ferrooxidans*	Kükürt bakımından zengin asit nehirleri ve kaplıcaları	Hücre içinin asidifikasyonu	Etkili proton pompaları
Alkalifil	pH>9	*Natronobacterium magadii*	Karbonat bakımından zengin göller	Hücre içinde hidroksit iyonları	Negatif yüklü dış hücre duvarı/ zarı
Aşırı basınç					
Barofil (piezofil) veya barotolerant	Atmosferik basınçtan daha yüksek basınçlar	*Halomonas salaria*	Okyanusların derinlikleri Yerkabuğunun derinlikleri	Hücre içine ve dışına maddelerin pompalanma kapasitesinde azalma	Daha etkili zar taşıyıcılarının üretimi
Aşırı Tuzluluk					
Halofil	2-5 M NaCl	*Haloferax lucentensis*	Buharlaştırıcı havuzlar	Aşırı ozmotik stres	İyonlar veya uyumlu çözünenler kullanılarak ozmotik stresin eşitlenmesi
Aşırı radyasyon					
Radyotolerant (Radyasyona toleranslı)	Yüksek ~>10 Gy	*Deinococcus radiodurans*	Kurumuş topraklar ve kayalar (metne bakınız)	Serbest radikallerin moleküllerde neden olduğu hasar	Serbest oksijen radikallerini ortadan kaldıran moleküller, DNA gibi molekülleri onarmak
Aşırı metal konsantrasyonu					
Metalotolerant	Yüksek metal konsantrasyonuna dayanıklılık	*Cupriavidus metallidurans*	Volkanik ortamlar Kirli alanlar	Yüksek metal iyonu konsantrasyonlarının zararlı etkileri	Metal iyonlarını uzaklaştırmak için etkili pompalar
Aşırı kuruluk					
Kserotolerant	Kuruluğa Dayanıklılık	*Sphingomonas desiccabilis*	Çöller	Moleküllerin yıkımı	Hücre koruyucu şekerlerin sentezi

aralıkları 45-80 °C ise *termofiller* ve 80 °C'nin üzerinde uygun büyüme sıcaklığına sahiplerse *hipertermofiller* denir. Bu organizmaların sahip olduğu uygun büyüme sıcaklığı aralıkları, yaklaşık 15 ila 45 °C arasındaki sıcaklıklarda büyüyen *mezofillere* kıyasla, Şekil 7.2b'de şematik olarak gösterilmiştir.

Termofillerle ilgili ilk çalışmalar 1970'lerde Thomas Brock tarafından Yellowstone Milli Parkında gerçekleştirildi ve burada 70 °C civarındaki sıcaklıklarda büyüyen organizmaları inceledi. O zamandan beri, 70 °C ve çok daha yüksek sıcaklıklarda büyüyen çok çeşitli organizmalar tanımlanmış ve kültürlenmiştir.

Derin okyanus hidrotermal bacaları hipertermofiller için önemli bir yaşam alanıdır (Şekil 7.2). Derin okyanuslardaki yüksek basınçlar suyun kaynama noktasını 100 °C'nin üzerine çıkarır (Bölüm 2'deki faz diyagramlarıyla ilgili bölüme bakın) ve böylece bu eşiğin üzerinde büyüme sıcaklığına sahip organizmaların burada yaşamasına olanak sağlar. 122 °C'de büyüyen ve çoğalan *Methanopyrus kandleri* siyah duman bacalarında yaşar ve yaşam için bilinen en üst sıcaklık sınırında yaşayan arkeondur (arke üst âlemi üyesi). Bir başka hipertermofil olan *Pyrolobus fumarii*, bir siyah duman bacasından izole edilen ve 90–113 °C aralığında büyüme sıcaklığına sahip bir arkeondur.

Mikroorganizmalar, iç sıcaklıklarını dış sıcaklığa göre ayarlamak için çok küçüktür ve bu nedenle yüksek çevre sıcaklığında çalışabilen bir biyokimyaya sahip olmak onlar için bir gerekliliktir. Bu organizmalar için zorluk, biyomoleküllerin termal olarak parçalanması ve termal olarak uyarılan zar bozulmasının neden olduğu sorunların üstesinden gelmeyi içerir. Organizmalar ayrıca



Şekil 7.2 (a) Atlantik Okyanusunda, sıvılar soğuk deniz suyuyla temas ettiğinde üretilen dumanlı siyah sülfür mineralleri nedeniyle 'siyah duman' olarak adlandırılan bir hidrotermal baca (Kaynak: NOAA). *(b)* Mezofiller *ve soğuğa uyarlanmış* psikrofillerle *karşılaştırıldığında yüksek sıcaklıklara uyarlanmış örnek organizmaların uygun büyüme sıcaklığı aralıklarını gösteren şema.*

hasarlı molekülleri onarmak ve yenilerini sentezlemek için yeteri kadar enerji toplamalıdır.

Yüksek sıcaklıklarda yaşayan organizmalar, ısıl kararlı proteinlerin ve enzimlerin evrimi de dâhil olmak üzere bir dizi uyarlanım geliştirmiştir. Isıl kararlılık, temelde amino asit zincirlerini daha etkili bir şekilde birbirine bağlayan ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında denatürasyona daha az yatkın hale getiren yeni iyonik veya kovalent bağların proteinlere eklenmesiyle elde edilebilir.

Kaçınılmaz olarak bu uyarlanımlar mükemmel değildir ve protein hasarı meydana gelir. Bu sorunu hafifletmenin bir yolu hasar gören proteinin yerini alacak daha fazla yeni protein sentezlemektir. Başka bir yol ise, proteinlerin yüksek sıcaklıklarda bozulmasın önlemek veya bu bozulmayı tersine çevirmektir. Yüksek sıcaklıklarda yaşama uyum sağlayan organizmalar, diğer proteinlere bağlanan, onların kararlılığını koruyan veya denatüre proteinlerin yeniden katlanmasına yardımcı olan çeşitli *ısı şoku proteinlerine* ve *şaperon proteinlerine* sahiptir. Böylece karmaşık ve karşılıklı olarak güçlendirici bir biyokimyasal uyarlanım takımı, hücrenin yüksek sıcaklıklarda yaşamasına olanak sağlamak için birlikte çalışır.

7.4.1 Isıl Kararlı Moleküllerin Kullanım Alanları

Birçok ısıl kararlı enzim endüstriyel ve günlük uygulamalarda muazzam bir kullanım alanı bulmuştur. *Selülozu* parçalayabilen ısıya dayanıklı enzimlerin kullanıldığı kağıt yapımı gibi yüksek sıcaklıklar gerektiren çok sayıda işlem ve ürün vardır.

Belki de en iyi bilineni, *polimeraz zincir reaksiyonunda (PZR)* kullanılan enzimdir. Polimeraz enzimleri DNA'nın çoğaltılmasında rol oynar (Bölüm 4). PZR moleküler biyolojide (filogenetik ağaçlar yapmak için), adli tıpta (suçluyu bulmak için) veya babalık testinde (gerçek babanızın kim olduğunu bulmak için) analiz edilecek binlerce ila milyonlarca kopya üretmek için az miktarda DNA dizisinin çoğaltılabildiği bir laboratuvar yöntemidir.

Ancak, çift iplikli DNA'nın çoğaltılabilesi için 'eritmek' veya parçalamak amacıyla önce ısıtılması gerekir. Moleküler biyolojinin ilk zamanlarında, polimerazın denatüre olacağı yüksek sıcaklıklara duyarlılığı nedeniyle oda sıcaklığında kullanılması gerekiyordu. Her bir replikasyon adımında yeni enzim eklenmesini gerektiren bu durum süreci çok zahmetli bir hale getirdi. Bununla birlikte, *Taq polimerazın* Thomas Brock ve Hudson Freeze tarafından Yellowstone Milli Parkındaki bir volkanik kaplıcadan izole edilen termofil bakteri *Thermus aquaticus*'tan izole edilmesi, DNA replikasyonunun yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesine izin verdi, PZR'yi oldukça basitleştirdi ve sürecin çok daha büyük oranda otomasyonuna olanak sağladı.

Bu örnekler, astrobiyologların zorlu ortamları inceleyerek toplum için pratik önemi olan keşifleri nasıl yaptığını göstermektedir. Tablo 7.2, farklı ekstremofillerden elde edilen faydalı bileşik sınıflarının bazı örneklerini göstermektedir.

Tablo 7.2 Bazı ürün örnekleri (çoğunlukla enzimler) ve ekstremofil veya ekstremotolerant organizmaları içeren süreçler.

Ekstremofil	Enzim veya tüm organizma	Uygulama
Termofiller	Amilazlar, Ksilanazlar, Proteazlar, DNA	Kağıt ağartma, gıda tatlandırıcılar, PZR
Psikrofiller	Polimerazlar Dehidrogenazlar	Süt ürünleri üretimi, çevre kirleticileri tespit etmek için biyosensörler
Asidofiller	Whole organisms	Kömürün kükürtten arındırılması, ekonomik metallerin biyolojik madenciliği (biyoliç)
Alkalifiller	Selülazlar	Deterjanlarda polimer degredasyonu
Halofiller	Tüm organizma	Polimer üretimi
Metalotolerant	Tüm organizma	Kirlenmiş endüstriyel bölgelerin biyoremediyasyonu
Radyasyona toleranslı organizmalar	Tüm organizma	Radyasyona maruz kalmış bölgelerin biyoremediyasyonu

7.5 Düşük Sıcaklıklarda Yaşam

Dünyanın yaklaşık %20'si kalıcı olarak donmuş topraktan oluşan donmuş bir zemini barındırır. Derin okyanusların çoğunun sıcaklığı yaklaşık 4 °C'dir. Okyanuslar Dünyanın %71'ini kapladığından, düşük sıcaklıkta yaşayan organizmalar için muazzam yaşam alanları mevcuttur. Kalıcı olarak donmuş toprakların yanı sıra, düşük sıcaklıklar genellikle Dünya gezegeninin çoğunda yaygındır ve bu nedenle birçok organizmanın bu koşullarda yaşamaya uyum sağlamış olması şaşırtıcı değildir (Şekil 7.3). Bunlar, uygun büyüme sıcaklığı 15 °C'nin altında olan, *psikrofilik* veya bazen 'kriyofilik' organizmalar olarak bilinen soğuk seven mikroorganizmalardır. Bazı organizmalar, bu eşiğin altında büyüyen, ancak büyümek için düşük sıcaklıklara ihtiyaç duymayan soğuğa duyarlı (psikrotolerant) organizmalardır. Bu organizmaların yaşam alanları arasında kutup bölgeleri, sürekli kar altında kalan araziler ve buzullar bulunur.

Bu organizmalar, astrobiyologlar tarafından her zaman büyük bir ilgi görmüştür, çünkü en azından Güneş Sistemimizde yaşanabilir koşullara ev sahipliği yapabilen gezegenimsilerin (Mars, Jüpiter'in uydusu Europa ve Satürn'ün uydusu Enceladus gibi) çoğu soğuktur.

Psikrofil örneklerinden biri, kutup bölgelerinde yaşayan *Arthrobacter*'ın cinsi bakterilerin bazı üyeleridir. Belki de daha tanınmış olanları, kar altında kalan arazilerde yaşayan ve ürettikleri *karotenoidler* nedeniyle morötesi radyasyonu yansıtan ve *serbest oksijen radikallerini* baskılayan pigmentler nedeniyle UV radyasyonuna maruz kaldıklarında sıklıkla sarı, kırmızı ve turuncu renk veren bir ökaryot grubu olan kar algleridir.



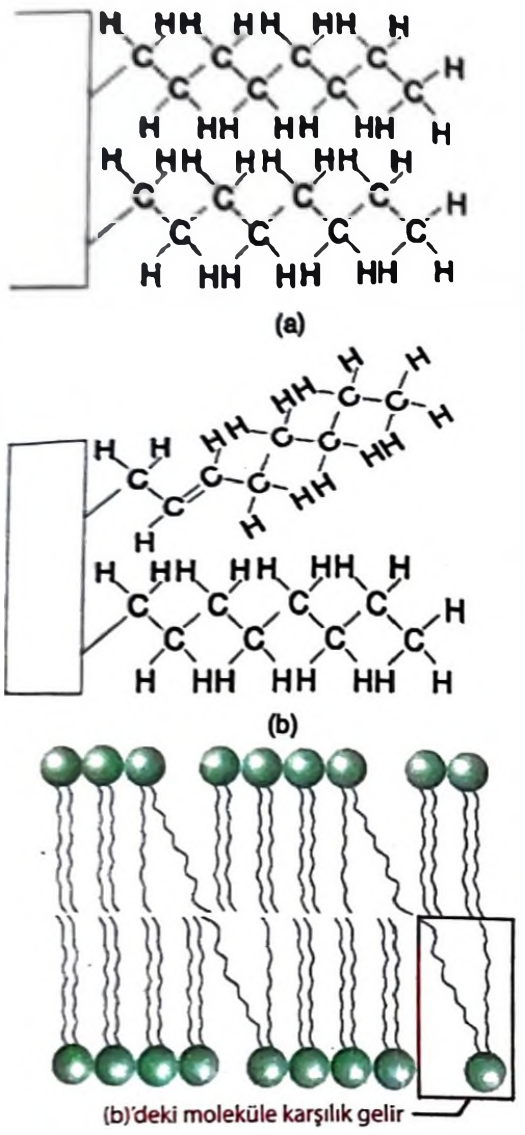
Şekil 7.3 Psikrofillerin habitatları: Baffin Adası, Nunavut, Kanada'daki Qaviqtarjuaq ve Cape Dyer arasındaki buz tabakası (Kaynak: wikicommons, Mike Beauregard).

Düşük sıcaklıklarda yaşam için en büyük zorluk zar akışkanlığının kaybıdır. Zar akışkanlığı, besin maddeleri gibi moleküllerin hücrenin dışından içeriye, atıkların ise hücrenin içinden dışarıya aktarılmasını sağlamak ve zardaki proteinler ile diğer moleküllerin hareketini sağlamak için önemlidir. Zarlar uzun yağ asidi zincirlerine sahip lipidlerden meydana geldiğinden, bu durumu anlamak için yapılacak en iyi benzetme, tereyağı gibi yağ asitlerini içeren bir maddeyi düşünmektir. Tereyağını mutfak masanızda bıraktığınızda yumuşar, ancak buzdolabına koyduğunuzda sertleşir. Aynı şekilde, soğuk ortamlardaki mikroplar zarlarındaki akışkanlığı kaybederler ve katılaşmaya başlarlar.

Organizmaların düşük sıcaklıklara uyum sağlayabileceği dikkat çekici yollardan biri, zarlarına *doymamış yağ asitleri* sokmaktır. Çift bağların eklenmesi, yağ asitlerinde bükülmeler yaratır (Şekil 7.4) ve sonuç olarak zar daha az sıkı bir şekilde paketlenir. Bu duruma örnek verebileceğimiz madde, yaklaşık %60 doymamış yağ asidi içeren zeytinyağıdır. Zeytinyağı oda sıcaklığında sıvıdır. Buzdolabınıza koyduğunuzda, daha yüksek oranda doymuş yağ asidi içeren tereyağından farklı olarak, doymamış yağ asitlerinin akışkanlığı nasıl artırabileceğini gösterecek şekilde sıvı halde kalır.

Bu uyarlanmayı dikkate değer görüyorum, çünkü iki karbon atomu arasına tek bir ek bağın girişi gibi çok basit bir kimyasal değişimin, organizmaların bir gezegen ortamına uyum sağlamasına yardımcı olan zar davranışında derin bir değişikliğe neden olduğunu gösteriyor. Bu örnek, çoğu canlının gezegen ortamına uyum sağlamasının temellerinde kimyasal fiziğin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Düşük sıcaklıklarda canlılar tarafından kullanılan diğer uyarlanımlar arasında, hücrelerin zarlarını bozan ve makromolekülleri tahrip eden buz kristallerinin zararlı etkilerini hafifletmesini sağlayan trehaloz gibi şekerlerin üretimi vardır. Şekerlerin sentezlenmesiyle donma noktası düşürülebilir ve buz kristali oluşumu önlenir.



Şekil 7.4 Düşük sıcaklıklara uyum sağlama örneği. Zar fosfolipidlerine doymamış yağ asitlerinin sokulması [(a)'dan (b)'ye], yağ asidinde bir bükülmeye neden olur (b), bunun sonucunda zar daha az paketlenir ve daha akışkan hale gelir (c) (Kaynak: Charles Cockell).

Bu tür biyokimyasal uyarlanımlar, canlıların bir dizi soğuk ortama uyum sağlamasına izin verir. Bu canlıların sayıları Güney Kutup bölgesindeki buzda oldukça az miktarda sayılabilecek olan yaklaşık 200 hücre/ml'den, donmuş toprakta 10^8 hücre/ml'ye kadar geniş ölçüde değişiklik gösterir. Buzullarda yaşayan canlıların sayısı yaklaşık 10^7 hücre/ml kadardır.

Düşük sıcaklığın yarattığı biyolojik zorluk, kısmen magnezyum klorür gibi moleküllerde düzensizliğe neden olabilen *kaotropik* bileşiklerle de dengelenebilir. Bu bileşikler zar lipidleri gibi molekülleri hafifçe bozarak, düşük sıcaklıklarla moleküllerin hareketsiz veya etkin olmayan hale getirilme derecesini azaltırlar.

Soğuğa uyum sağlamış organizmaların yaşayabileceği özellikle ilginç bir habitat buz tabakalarındaki buz tanelerinin sınırları arasında bulunur. Buz tabakaları ve buzullarda buz donarken, tuzlu su buzdan çıkarılır ve buz tanelerinin sınırlarında kanallar oluşturur. NaCl'nin *ötektik noktası* –21,2 °C (suyla birlikte çözeltinin içinde donacağı olası en düşük sıcaklık) olduğundan, taneler arası alanlarda tuz bulunması, 0 °C'nin altında bile sıvı su habitatlarının kullanılabilirliğini artırabilir. Bu tuzlu su gözenekleri ve kanallarının –15 °C sıcaklığa kadar birbirlerine bağlandığı gösterilmiştir, bu da buzun canlılara potansiyel olarak geniş bir yaşam alanı sunduğunu gösterir. Böyle bir çevrede yaşamak beraberinde zorluklar da getirir. Soğuk ve kısıtlı ortamlar daha büyük yırtıcıları dışlayabilse de, bazı deniz buzu habitatlarının, küçük kapalı gözenek alanlarında yoğunlaşan, çok sayıda virüse (yaklaşık 10^8 virüs/ml) sahip oldukları gösterilmiştir. Virüs saldırısı, bu ortamlardaki birçok mikroorganizma için ciddi bir sorundur.

Buz tabakası habitatı, bu ortamlardaki gibi düşük sıcaklıklarda büyümek için mikropların da yüksek tuz konsantrasyonlarına uyum sağlamış olmaları

gerektiğini göstermektedir. Bu tür ortamlar nadiren tek bir zorluğa ev sahipliği yaparlar.

Canlıların yaşayabileceği alt sıcaklık sınırı kesin olarak bilinmemektedir. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda mikrobiyal üreme ve metabolik aktivite için çok sayıda iddia ve karşı iddiada bulunulmuştur. Mevcut sınırın ikrobiyal üreme için −15 °C, metabolik aktivite içinse −25 °C olduğuna dair raporlar bulunmaktadır. Ayrıca, yaşamın alt sınırı için kriterleri tanımlamak önemlidir. Metabolik aktivitenin mutlak alt limiti (örn. bazı enzimlerin aktivitesi), birçok biyokimyasal işlemin etkileşimini ve aktivitesini gerektiren hücre bölünmesinin sıcaklık sınırından daha düşüktür.

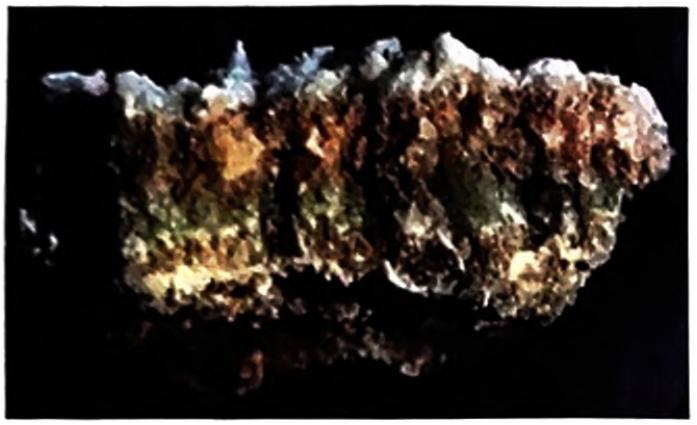
Odak Noktası: Astrobiyolog. Christopher McKay

Hangi konu üzerinde çalışıyorsunuz? Zorlu ortamların fiziksel ekolojisini inceliyorum.
Nerede çalışıyorsunuz? NASA Ames Araştırma Merkezi.
İlk uzmanlık alanınız neydi? Fizik.
Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz? Ortamdaki fiziksel faktörlerin mikrobiyal yaşamı nasıl sınırlandırıp şekillendirdiğine odaklanarak zorlu ortamlarda saha araştırması yapıyorum. Odak noktam kuru ve soğuk ortamlar. Yeryüzündeki bu verilerden hareketle diğer dünyalardaki kuru ve soğuk çevreyi tahmin ediyoruz.
Astrobiyoloji alanında sizi heyecanlandıran nedir? Güneş sisteminde bir yerde ikinci bir yaşam oluşumunu bulma ihtimali.



7.6 Tuzlu Ortam Seven Organizmalar

Dünyada bulunan çeşitli ortamlarda yüksek tuz konsantrasyonları vardır. Son bölümde tanıştığımız buz tanesi sınırlarında tuz yoğunluğu artar. Daha sıcak ortamlarda, su buharlaşma oranlarının yüksek olduğu tuz göllerinin ve denizlerin kenarlarında mikropların yüksek tuz konsantrasyonlarına, özellikle kaya tuzuna (NaCl), uyum sağlaması gerekir. Tuzcul (halofilik) organizmaların %15'ten %37'ye kadar NaCl içeren tuzlu ortamlarda büyümeleri gerekir. Bu organizmalardan bazıları, doğal habitatların kenarlarında biriken evaporitler olarak bilinen katı tuz kabuklarında yaşar. Doğal evaporit habitatlarının örnekleri İsrail ve Ürdün sınırındaki Ölü Deniz, Baja California'nın tuz düzlükleri ve Utah Büyük Tuz Gölüdür (Şekil 7.5). Tüm tuz kabukları kaya tuzundan oluşmamıştır. Mikroplar ayrıca alçıtaşı ($CaSO_4$) evaporitleri ve buharlaşma sonucu çökelen tuzlardan oluşan diğer kabukları da içeren alanlarda da yaşarlar.



Şekil 7.5 Kaliforniya'dan bir evaporit içinde yeşil bir tabaka oluşturan siyanobakteriler. Örnek yaklaşık 3 cm kalınlığındadır (Kaynak: Lynn Rothschild).

Bu ortamlarda yaşamanın zorluğu ozmotik stresle başa çıkmaktır. Su, az tuzlu bir bölgeden çok tuzlu bir bölgeye geçme eğiliminde olacaktır, bu nedenle bir mikrop yüksek oranda tuz derişimine sahip suyun içindeyken, suyun mikropun içinden dışarıya doğru akma eğilimi olacak ve mikrop yaşamsal faaliyetlerini sürdürmek için ihtiyaç duyduğu temel çözücüden yoksun kalacaktır. Mikroplar bu zorlukla başa çıkmak için, genel olarak tuzu içeri alma ve tuzu dışarı atma olmak üzere iki kategoriye ayrılan yollar geliştirmiştir.

7.6.1 Tuzu İçeri Alma Stratejisi

Salt-in stratejisini kullanan mikroplar, yüksek konsantrasyonda iyonların hücrenin içinde toplanmasına izin verir, böylece hücre içinde ozmotik olarak dış çevreyle dengede olan bir çözelti oluşturur. Bu genellikle K^+ iyonlarının hücreye pompalanmasıyla elde edilir. Bununla birlikte, hücre içindeki yüksek iyon konsantrasyonu, proteinlerin ve diğer biyokimyasal süreçlerin yüksek tuz konsantrasyonlarına uyarlanmasını gerektirir. Bu, daha fazla sayıda iyonik köprüye sahip proteinleri içerir. Başlangıçta Ölü Deniz'den izole edilmiş bir bakteri olan *Haloferax volcanii*, salt-in stratejisini kullanan bir organizmaya örnektir. Bu organizmaların çoğu *zorunlu* halofillerdir.

7.6.2 Tuzu Dışarı Atma Stratejisi

Bu stratejiyi kullanan mikroplar, hücrenin iç kısmına zarar vermelerini önlemek için tuzları dışarı pompalar. O zaman soru şu: organizmalar hücre içindeki ve dışındaki tuz farkının neden olabileceği dev ozmotik stresle nasıl başa çıkıyor? Bu, ozmotik basıncın eşitlenmesini sağlayarak ozmotik basıncın hücre zarı boyunca gelişmesini önleyen *uyumlu çözücülerin* üretimiyle sağlanıyor. Bu bileşiklerin çoğu, ozmotik basıncı eşitlemelerine rağmen, küçük iyonlardan daha az zararlıdır.

Uyumlu çözünenler iki sınıfa ayrılır: (i) Glisin betain, glutamin, glutamat, prolin, ektoin gibi amino asitler ile (ii) trehaloz, gliserol, di-*myo*-inositol-1,1'-fosfat (DIP) veya sülfotrehaloz gibi şeker ve polioller (şeker alkolleri). Bu çözünenler dış ortamın ozmotik potansiyeline karşı yeterli konsantrasyona ulaşana kadar sentezlenir.

Pek çok bakteri de dâhil olmak üzere orta derecede veya değişken tuz konsantrasyonlarında yaşayan organizmalar salt-out stratejisini kullanır. Bu grup çok sayıda fakültatif halofilden oluşur.

7.6.3 Düşük Su Aktivitesi

Düşük *su aktivitesi* (a_w olarak adlandırılır) yüksek tuz (ve kuraklık) stresiyle ilişkilidir. Su aktivitesi, suyun varlığının bir ölçüsüdür. Resmi olarak bir maddenin buhar basıncının saf suyun buhar basıncına oranı olarak tanımlanır. Damıtılmış su bu nedenle 1 su aktivitesine sahiptir. Su aktivitesi ne kadar düşük olursa, suyun kullanılabilirliği o kadar az olur. Yaşamın düşük su aktivite sınırı, kuraklığa dirençli çeşitli mantarlar tarafından belirlenmiş ve yaklaşık olarak 0,6'dır. Bununla birlikte, çoğu organizma büyümek için ~0,9'dan büyük bir su aktivitesi gerektirir. Doymuş tuz içinde yaşayan çeşitli mikropların varlığı bilinmesine rağmen doymuş bir NaCl çözeltisi, mikroplara karşı bir zorluk oluşturduğunu gösteren 0,75'lik bir su aktivitesine sahiptir. Birçok gıda düşük su aktivitesine sahiptir, örneğin bal tipik olarak 0,5 ila 0,7 arasında su aktivitelerine sahiptir ve bu balın neden nadiren mikroorganizmalarla kontamine olduğunu açıklar.

Tartışma Noktası: Evrendeki Tuzlar

Astrobiyolojideki zorluklardan biri, Dünya üzerindeki uç noktalarda canlılığı incelemenin bize başka bir yerde yaşam için olası koşulları nasıl anlatabileceğini düşünmektir. Tuzlar evrende her yerde bulunur. Örneğin Mars'ta ve Jüpiter'in uydusu Europa'nın yüzeyinde tuz tespit edilmiştir. Dünya üzerinde yapılan çalışmaların çoğu sodyum klorür bakımından zengin ortamlara odaklanmıştır ve bu nedenle mikrobiyal uyarlanım anlayışımız bu tuzlara odaklanmıştır. Bununla birlikte, diğer gezegenimsilerde sülfat bileşikleri gibi tuzlar baskındır. Diğer gezegenimsilerde bulunan tuzlarla ilgili bilgi kaynaklarını keşfedin. Dünyanın aşırı tuzlu ortamlarındaki yaşama dair bilgimiz, bu Dünya dışı tuzların yaşanabilirliği hakkındaki bilgilerimizi nasıl şekillendirebilir? Bilgimizin sınırlamaları neler olabilir?

Martínez, G.M., Rennó, N.O. (2013) Water and brines on Mars: Current evidence and implications for MSL. *Space Science Reviews* **175**, 29–51.

McKinnon, W.B., Zolensky, M.E. (2003) Sulfate content of Europa's ocean and shell: evolutionary considerations and some geological and astrobiological implications. *Astrobiology* **3**, 879–897.

7.7 Aşırı pH

pH, bir çözeltinin asitliğinin veya alkalinitesinin ölçüsüdür. Matematiksel olarak pH, hidronyum iyonunun (H_3O^+) aktivitesinin negatif logaritmasıdır, daha sıklıkla hidronyum iyonu konsantrasyonunun ölçüsü olarak ifade edilir. Hidronyum protonlu su olduğundan protonların (H^+) konsantrasyonu olarak da

düşünülebilir. Asidik çözeltiler daha yüksek proton konsantrasyonlarına ve dolayısıyla daha düşük pH'a sahiptir.

Aşırı pH'da yaşayan organizmalara *asidofiller* (genellikle pH 3'ün altında) ve *alkalifiller* (genellikle pH 9'un üzerinde) denir. Çok çeşitli doğal ortamlar aşırı pH'lara sahiptir. Pirit (demir sülfür) suda reaksiyona girdiğinde, içindeki sülfür sülfürik aside oksitlenir ve bunun sonucunda, 2 civarında bir pH değeriyle binlerce yıldır doğal bir düşük pH ortamına sahip olan İspanya'daki Rio-Tinto (Şekil 7.6) gibi aşırı asidik bir nehir oluşur. Kuzey Kaliforniya, Amerika Birleşik Devletleri, Kuzey Kaliforniya'daki Iron Dağı, 0 ila 1 pH değerine sahip suya sahiptir. Diğer doğal asidik ortamlar, suyun volkanik aktiviteden kaynaklanan kükürtle temas ettiği volkanik kaplıcaları içerir. Suyun belirli volkanik kayalarla temas ettiği yerlerde yüksek pH'lı ortamlar bulunur. Amerika Birleşik Devletleri, Kaliforniya'daki Mono Gölü (Şekil 7.6), yaklaşık 760.000 yıl önce oluşan kapalı bir göldür. Tuzlar kapalı gölde birikir ve pH'ı 10 olan sığ bir su ortamı oluşur.

Organizmalar aşırı pH değerlerine uyum sağlamalarına rağmen, çoğu hücre kendi içinde neredeyse nötr bir pH değerini muhafaza eder.

Asidofiller, ortamdaki yüksek proton konsantrasyonunu aktif olarak dışarı pompalayarak hücreden çıkarır. Bu, bazen hücre zarı boyunca proton pompalamanın verimliliğini artıran çok sayıda proton pompası ve diğer zar taşıyıcıların üretilmesiyle meydana gelir. Sitoplazma içindeki yüksek asidik koşullar protein denatürasyonuna (katlanmış proteinlerin yapısının bozulmasına) yol açar, bu da asidofillerin içsel hücre hasarını önlemek için hücre zarlarında düşük proton geçirgenlikleri geliştirmeler, için bir seçilim baskısına neden olur. Tüm protonların hücreye girmesini tamamen kısıtlamak her zaman mümkün değildir. Bazı asidofiller, asit-kararlı proteinlerin evrimi de dâhil olmak üzere düşük pH'ı tolere edecek uyarlanımlara sahiptir. Asit-kararlı birçok proteinde, bir karboksil grubu (–COOH) taşıyan ve hücre içindeki pH'da proton kaybede-



Şekil 7.6 Aşırı pH değerlerinde yaşam. Sol: Asidik Rio Tinto Nehri, İspanya (Kaynak: wikicommons, Carol Stoker). *Sağ: Alkalin Mono Gölü, Amerika Birleşik Devletleri* (Kaynak: wikicommons, Brocken Inaglory).

rek negatif yüklü ($-COO^-$) hale gelme eğiliminde olan iki asidik amino asitin (aspartik ve glutamik asit) bolluğu daha fazladır. Bu, düşük pH'da protein üzerinde pozitif yük birikmesinin neden olduğu protein kararsızlığını en aza indirir. Özel bir asit kararlılığı durumunda, *Nocardiopsis alba* bakterisinden elde edilen NAPaz proteininin (uzun zincirli protein bileşiği keratini parçalayan bir enzim), protein denatürasyonunu önlemek için aside duyarlı iyonik bağları aside maruz kalan bölgelerden daha az aside maruz kalan bölgelere taşıdığı gösterilmiştir.

Yüksek pH değerlerini tolere eden organizmalar hakkındaki bilgilerimiz daha sınırlıdır, ancak bu organizmalar hücre dışındaki düşük proton konsantrasyonları probleminden muzdariptir, bu da hücre zarı boyunca etkili bir proton değişimini sürdürmeyi zorlaştırdığı için hücre zarı boyunca etkili proton taşıma mekanizmalarının evrimini gerektirir. Yüksek pH'da üretilen hidroksit iyonu (OH^-), moleküllere zarar verir ve bu organizmaların birçoğu, bu iyonların hücreye girmesini önleyen negatif yüklü hücre duvarlarına sahiptir. *Bacillus* cinsine ait bazı bakteriler, pH 12'de büyüyebilen *Bacillus alcalophilus* gibi alkalifillerdir.

7.8 Yüksek Basınç Altında Yaşam

Habitatın açık ara en büyük fiziksel alanı Dünyanın yüzeyinin altında ve okyanusların derinliklerindedir. Okyanuslarda, basınç her 10 m derinlik için yaklaşık bir atmosfer artar, böylece Mariana Çukurunda (Pasifik Okyanusunda 10.970 m; Şekil 7.7) basınçlar 1000 atm'yi aşar. *Piezofilik* veya *barofilik* ('basınç seven') mikroorganizmalar yüksek basınçlı ortamlarda yaşarlar. Yeraltındaki organizmalar için yüksek basınç her yerde bulunur. Bu ortamlardaki organizmaların gerçekten yüksek basınca ne ölçüde ihtiyaç duydukları veya çoğunun sadece basınca toleranslı olup olmadıkları konusunda hala tartışmalar devam etmektedir. Basınca toleranslı bir organizmaya örnek olarak 1000 atm (100 MPa) basınçta ve 3 °C sıcaklıkta büyüyebilen *Halomonas salaria* bakterisi verilebilir.



Şekil 7.7 Challenger Deep, Mariana Çukuru (10.900 m derinlik), Pasifik Okyanusunun tek kişilik Deepsea Challenger denizaltısı tarafından keşfedilen yüksek basınçlı habitatı (Kaynak: Deep Sea Challenger projesi).

Yüksek basınçta yaşamın karşılaştığı zorluklardan biri, basınç kaynaklı moleküllerin paketlenmesi ve zardaki akışkanlık kaybıdır. İlginç bir şekilde, hücrelerin yüksek basınçlara uyum sağlamasının bir yolu, daha önce tartışılan düşük sıcaklıklara uyarlanım gibi, doymamış yağ asitleriyle zar akışkanlığını arttırmaktır. Bu, bazı uç noktalara uyumun sinerjik olabileceği genel bir ilkeyi işaret etmektedir. Yaşamın herhangi bir ortamda karşılaşabileceği her bir uç noktaya uyum sağlamak yerine, bazı durumlarda bir biyokimyasal uyarlanım, başka bir uç nokta için gerekli değişiklikleri sağlamaya yardımcı olacaktır. Yüksek basınçlı derin okyanus ortamları genellikle soğuk olduğundan, bu iki stres aynı yerde bulunur.

Yüksek basınçlı ortamlara karşı bir diğer uyarlanım, hücre zarında bulunan ve besin maddeleri gibi küçük moleküllerin alımına ve atıkların hücrelerden uzaklaştırılmasına yardımcı olan transmembran proteinlerinin üretilmesidir.

Tesis Odağı: Yeraltı Laboratuvarları

Bilim insanlarının uç noktaları incelemeye gitmesinin bir yolu, yaşamı inceleyebilecekleri ortamlarda kalıcı tesisler kurmak, orada hangi mikroorganizmaların büyüdüğünü ve nasıl uyum sağladıklarını ortaya çıkarmaktır. Dünya yüzeyinde bu, esas olarak bir bina inşa etmek için bir yer bulmak, doğru izinleri almak ve laboratuvarınızı inşa etme meselesidir. Ama çalışmak istediğiniz ortam yerin 1 km altında olduğunda ne olur? Bilim insanları kalıcı yeraltı laboratuvarları kurabilirler. Bu tür tesislerden biri, İngiltere Bilim ve Teknoloji Tesisleri Konseyi (STFC) tarafından yönetilen sahil kasabası Whitby'nin kuzeyindeki Boulby Yeraltı Bilim Tesisidir. Boulby Madeni, gübre için kalya taşı ve yolların tuzlanması için kaya tuzu çıkartan aktif bir madendir. On yıldan uzun bir süredir, kozmik radyasyonu kesmek ve evrendeki Kara Madde işaretlerini aramak için 1 km'nin üzerinde tuz kullanan bir *Kara Madde* laboratuvarına ev sahipliği yapmıştır. Laboratuvar internete bağlı ve klimalıdır. Tesis aynı zamanda astrobiyologlar tarafından derin, karanlık tuzlu sularda yaşamı incelemek için kullanılan Boulby Uluslararası Yeraltı Astrobiyoloji Laboratuvarına (BISAL) da ev sahipliği



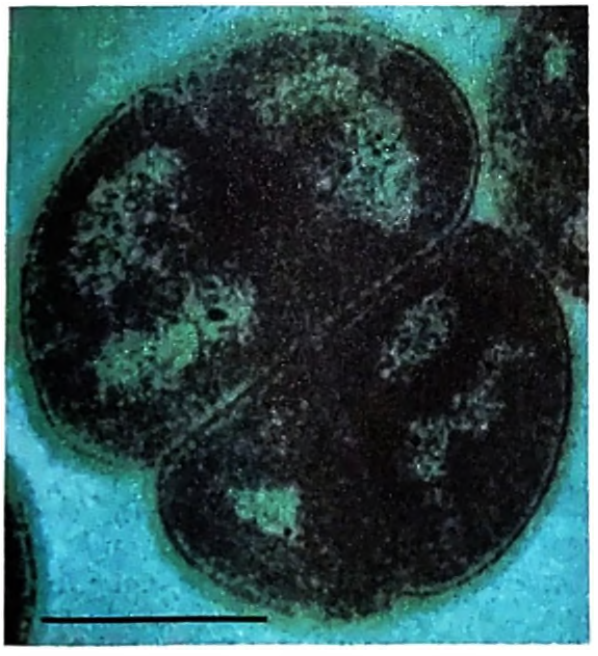
Şekil 7.8 Bilim insanları, derin, koyu tuzlu su sızıntılarında (sağda) yaşayan mikroorganizmaları örneklemek için derin bir yeraltı astrobiyoloji laboratuvarı (sol ve orta) kullanırlar.

yapmaktadır (Şekil 7.8). Yaşam burada fotosentez olmadan nasıl geçiyor? Ne tür organizmalar yeraltında yaşar? Laboratuvarlar, bilim insanlarının aşırı ortamlarda kalıcı bir varlık kurmaları ve böylece uzun yıllar boyunca araştırma yapmaları için bir yol sağlayabilir. BISAL, derin karanlık biyosfere erişmek için madendeki 500 km'den fazla yolu kullanarak uç noktalardaki yaşamı incelemek için bir üs olmasının yanı sıra, bilim insanlarının Mars ve diğer gezegenlerin keşfi için gerekli olan teknolojiyi test etmeleri için bir üs. Yalıtılmış çevre ve antik tuzlar, araştırma ekiplerinin bir araya gelip teknolojilerini test etmeleri için ideal bir yol sağlar.

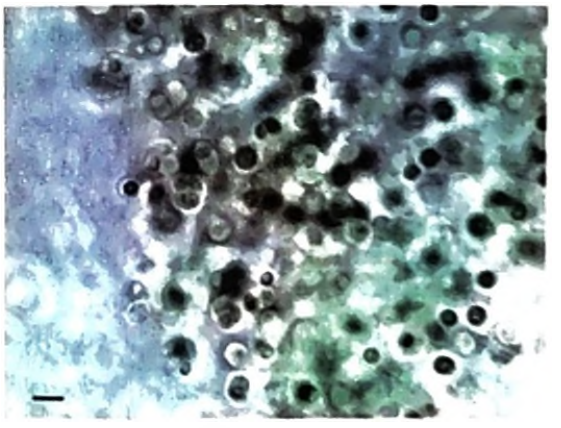
7.9 Yüksek Radyasyona Tolerans

Bazı organizmalar, gama radyasyonu gibi iyonlaştırıcı radyasyon da dâhil olmak üzere çok yüksek radyasyon seviyeleriyle başa çıkma kapasitesine sahiptir. Örneğin, 10000 Gray (Gy) radyasyon dozu, *Deinococcus radioduran* bakterisi tarafından tolere edilebilir (Şekil 7.9). Soğuk ve sıcak çöllerdeki kayalarda ve diğer ortamlarda yaşayan fotosentetik bir siyanobakteri olan *Chroococcidiopsis* (Şekil 7.10) 15,000 Gy gama ışınını tolere edebilir. Bir bakış açısı elde etmek için, bir insanı öldürmek için 5 Gy eşdeğer iyonlaştırıcı radyasyon yeterlidir. Bu organizmalar radyasyona karşı dirençlidir, ancak bu durum mutlaka radyasyon varlığında büyümelerini gerektirmez. Yani *radyotoleranttırlar.*

Yüksek radyasyona uyarlanım genomun birden fazla kopyasına sahip olmayı içerir, böylece bir genomun zarar görmesi başka bir kopya tarafından aşılabilir. Etkili DNA onarım mekanizmaları, karotenoidler gibi pigmentler ve serbest radikallerini baskılayan yüksek manganez konsantrasyonları diğer uyarlanımlar arasındadır.



Şekil 7.9 Radyasyona dirençli Deinococcus radiodurans, *ölçek çubuğu 2 µm.*



Şekil 7.10 Chroococcidiopsis, *Dünyanın sıcak ve soğuk çöllerindeki kayaların üstünde, içinde ve altında yaşayan aşırı radyasyona dirençli bir siyanobakteri. Ölçek çubuğu 2 µm.*

Çok az doğal ortam yüksek radyasyon seviyelerine sahip olduğundan, yüksek radyasyon direnci hücreler için bir gizem gibi görünebilir. Bu direnç nerede ortaya çıktı? Bu muamma, bazı insanlar tarafından bu organizmaların bir kısmının uzaydan gelmiş olabileceği yönünde söylentilerin ortaya atılmasına yol açmıştır. Ancak, bir açıklama yapmak için bu hipotezlere başvurmak zorunda değiliz.

Hücrelerde ve hücreleri oluşturan moleküllerde doğrudan ve dolaylı hasara neden olan herhangi bir ortam, bu hasara dayanabilecek veya onarabilecek organizmalar üzerinde evrimsel bir seçilim baskısına neden olacaktır., DNA hasarı ve reaktif oksijen türlerinin oluşumu gibi hasarlara yol açan hücre kuruluğunun görüldüğü kurak topraklar ve kayalar böyle ortamlara bir örnektir. Keşfedilen radyasyona dirençli organizmaların birçoğu ayrıca çöllerde ve topraklarda yaşayan organizmalardır ve bu nedenle yüksek radyasyon direncinin, DNA dâhil biyolojik makromoleküllere zarar veren kurak ortamlara uyumun tesadüfî bir sonucu olabileceğini düşünmek mantıklı görünmektedir. Radyasyona dirençli organizmalar, organizmaların aynı zamanda yüksek sıcaklığa bağlı DNA hasarıyla başa çıkmak zorunda oldukları aşırı sıcak ortamlardan da izole edilmiştir.

7.10 Zehirli Ortamlarda Yaşam

1976'da, yüksek konsantrasyonlarda çinko ve insanlar için zararlı olan diğer ağır metalleri içeren zehirli bir ağır metal yığını içinde yaşayan olağanüstü bir bakteri olan *Cupriavidus metallidurans* (Şekil 7.11) keşfedildi. Daha sonra bu mikrobun küçük dairesel DNA parçaları veya plazmidler içerdiği bulundu (Bölüm 4). Plazmidlerden birinin, organizmanın kobalt ve nikele ek olarak çinko ve kadmiyumu da dışarı atmasına izin veren genleri kodladığı bulundu. Bu plazmidler hücrenin, aksi takdirde protein işlevini bozacak olan ağır metalleri düşük konsantrasyonlarda hücre içinde bulundurmasına izin verir.



Şekil 7.11 Cupriavidus metallidurans, *ağır metallere karşı dirençli bir organizmadır.*

Metallere dayanıklı bu organizmalar, sıcak sıvıların kayaların içinde dolaşımının toksik metallerin birikmesine yol açtığı volkanik kaplıcalar gibi bir dizi doğal ortamda yaşamaya uyum

sağlamışlardır. Özellikle önemli olan, bu genlerin plazmidler üzerinde kodlanmasıdır; zorlu koşullara uyum sağlamak için gerekli olan uyarlanımların, yatay gen transferine olanak sağlayan bir mekanizma olan konjugasyonla potansiyel olarak bir mikroptan diğerine aktarılabilen DNA üzerinde nasıl kodlanabileceğinin bir örneğini sunar (Bölüm 6). Bu organizmalar canlılıklarını sürdürmek için genellikle ağır metallerin varlığına ihtiyaç duymazlar, sadece bu koşullara karşı dayanıklılardır.

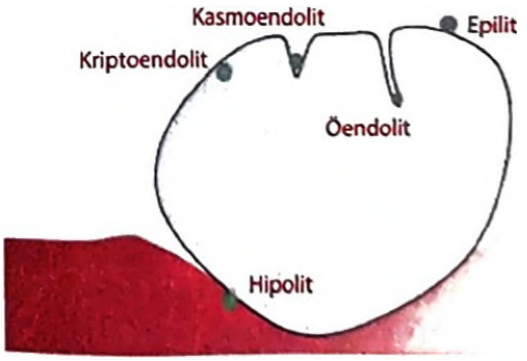
7.11 Kayaçlarda Yaşam

Önceki bölümlerde, belirli zorlu koşullara özgü bazı biyokimyasal uyarlanımlara ve farklı uyarlanımların uç noktalarda mikropların büyümesine ve üremesine nasıl olanak sağlayabileceğine baktık. Canlıların gezegen yüzeyindeki zorlu koşullarla başa çıkabilmesinin bir başka yolu, bu koşullarda barınmayı veya bu koşulların iyileştirilmesini sağlayan habitatlara sahip olmasıdır.

Kayaçlar bu tür habitatlara bir örnektir. Bu habitat astrobiyologlar tarafından özel bir ilgi görüyor çünkü, elbette, Dünya benzeri gezegenler kayalardan oluşmaktadır ve bu yüzden canlılığın gezegen kabuğunda birkaç milyar yıl boyunca nasıl devam edebileceğini anlamak istiyorsak, yaşam ve yerkabuğu arasındaki ilişkiyi araştırmak yararlıdır.

Kayaçların üzerindeki ve içindeki yaşam alanlarını tanımlamak için kapsamlı bir terminoloji bulunur (Şekil 7.12) ve tanımlarla çok fazla dikkat dağıtmamak gerekse de, burada kısaca özetlemek yararlı olabilir.

Kasmoendolitler, kayaların donması ve çözülmesi veya diğer fiziksel bozulmalar sonucu oluşan çatlaklar gibi kaya kırıklarında yaşayan mikroplardır. Bu uzun kelime Yunancadan türetilmiştir (*khasma* – çatlak; *endo* – iç; *lithos* – kaya). Kriptoendolitler, kaya boşluklarında –kaya içindeki gözenek boşlukları– yaşayan mikroplardır. Bu, kasmoendolitik habitattan biraz daha özeldir, çünkü sadece kayanın yüzeyindeki bir çatlak varlığından ziyade kayaların içinde birbirine bağlı gözenek boşluklarının varlığını gerektirir. Ön ek olan kripto (Yunanca, *kruptos* – gizli), bu organizmalar kayaların içinde büyüdükleri için kayayı kırıp açmazsanız onları yüzeyden göremeyeceğiniz gerçeğini yansıtır. Öendolitler aktif olarak kayalarda gömülü olan organizmalardır ve kıyı bölgelerindeki karbonatlarda yaşayan ve yaşadıkları kayaların içine doğru uzun ince bir tünel oluşturan siyanobakterileri içerirler (Yunanca *eu*, iyi veya mutlu anlamına gelir; bu açıklama biraz anlaşıl-

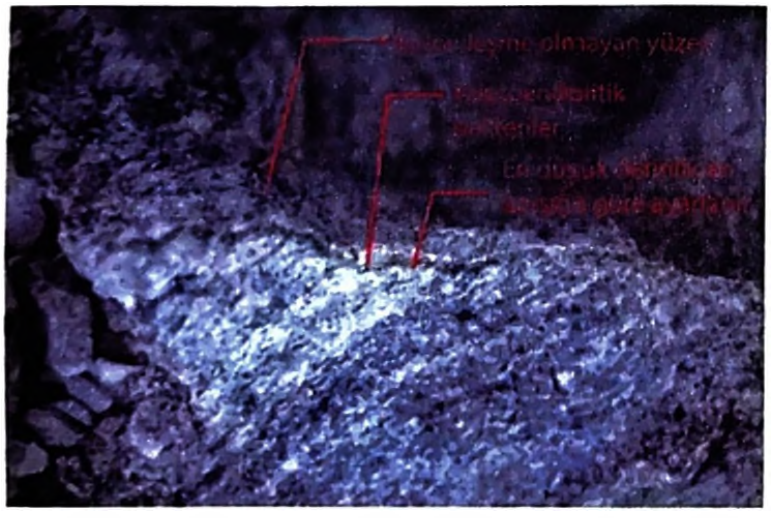


Şekil 7.12 Kayaçların içindeki ve üzerindeki habitat türleri (Kaynak: Charles Cockell).

maz olsa da, bu organizmaların kayalarda yaşamak konusunda iyi oldukları anlamına gelebilir). Epilitler kayaların yüzeyinde (Yunanca, *epi* – üzerinde) yaşarken, hipolitler toprak-kaya arayüzünde –başka bir deyişle bir kayanın altında (Yunanca, *hypo* – altında)– yaşarlar.

Kriptoendolitlerin bir örneği, bir asteroit veya kuyruklu yıldız etkisiyle oluşan kaya yarıklarında yaşayan organizmalardır (Şekil 7.13). Bir asteroit veya kuyruklu yıldız çarpmasıyla oluşan yoğun ısı ve basınçla birlikte bir kaya çok gözenekli bir materyale dönüştürülebilir. Bu kayaların gözenekliliği, çarpma etkisiyle değişime uğramayan kayalardan 25 kat daha fazladır. Çarpmanın yarattığı kırık ve keseciklerin içinde mikroplar kendilerine bir yuva yapabilirler. Şekil 7.13'te gösterilen örnek, 39 milyon yıl önce bir asteroit veya kuyruklu yıldız etkisiyle Kanada Yüksek Kutup bölgesinde oluşan Haughton çarpma kraterinden alınmıştır. Materyal, Bölüm 13'te ele alınacak olan bir tür *metamorfik* kayaç olan gnaystır. Kayada *Chroococcidiopsis* ve diğer mikroplar yaşarlar. Fotosentetik mikroplar kayanın içinde farklı bir yeşil bant oluştururlar. Kayanın yüzeyi kuru ve rüzgâr yüzünden aşınmış olduğundan mikroplar kayanın üzerinde büyüyemezler. Kaya içindeki bandın en düşük derinliği, fotosentez için gerekli olan minimum ışığın altına düştüğü derinliğe göre ayarlanır. Bu, asteroit veya kuyruklu yıldız etkisi gibi yıkıcı bir olayın bile canlılar için nasıl yeni bir yaşam alanı yaratabileceğinin bir örneğidir.

Bu kaya habitatlarının zorlu ortamlarda yaşamı anlamak açısından önemi, kayaların zorlu koşulları hafifletebilmesidir. Kaya katmanları, bu katmanlar tarafından emilen ve yayılan morötesi (UV*) radyasyonu hızla zayıflatır. Kayadaki gözenek boşlukları suyu tutar, böylece yağmur veya kar erimesinden sonra, su günlerce burada tutulabilir ve mikrobiyal büyüme için sulu bir ortam sağlar. Kayaçlar ayrıca termal bir avantaj sağlayabilir. Düşük yansıtabilirlikleri olan kayalar (koyu renkli oldukları veya koyu renkli mineraller içerdikleri için Güneşten gelen radyasyonu çok az yansıtan kayalar) Güneşten gelen radyasyonu emer ve kaya içindeki büyüme için gelişmiş bir termal



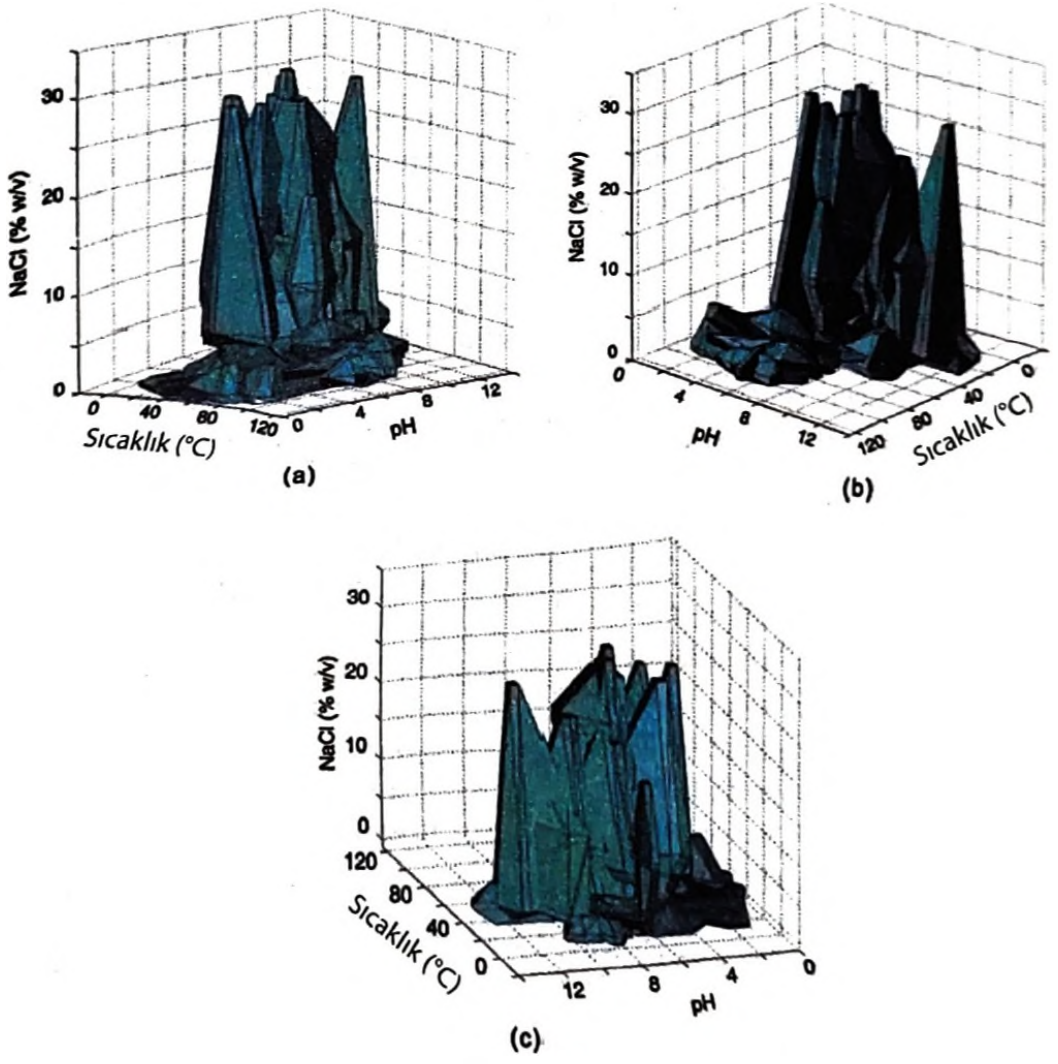
Şekil 7.13 Çarpma etkili gnays: asteroit ve kuyruklu yıldız kraterlerinde fotosentetik kriptoendolitik canlılar için bir yaşam alanı. Burada gösterilen kaya yaklaşık 6 cm çapındadır (Kaynak: Charles Cockell).

* [İng.] Ultraviolet –çn.

sisteme izin vererek hava sıcaklığından daha sıcak hale gelir. Bu, sıvı suyun varlığıyla birlikte kaya katmanlarında büyüme ve üremeye olanak sağlar.

7.12 Çoklu-ekstremofiller: Birden Fazla Zorlukla Başa Çıkma

Doğal ortamda, zorluklarla nadiren tek tek karşılaşılır. Derin okyanuslar soğuktur ve yüksek basınca sahiptir, sıcak volkanik ortamlar bazen asidiktir ve kayaların yüzeyleri genellikle kuraktır ve UV radyasyonuna maruz kalır. Bazı ortamlarda iki veya daha fazla zorlukla karşılaşılır. İki veya daha fazla zorluğa uyum sağlayan organizmalara *çoklu-ekstremofiller* denir. Yüksek radyasyon altında ve kayaların içinde karşılaştığımız *Chroococcidiopsis*, bir çoklu-ektremofil örneğidir. Bu bakteri cinsinin bazı ırkları kuraklığa ve radyasyona dayanıklıdır ve birçok ırk da tuz kabuklarında yetişir.



Şekil 7.14 pH, sıcaklık ve tuzluluk (a-c) biyo-uzay'ları çeşitli ekstremofillerin büyüme aralıkları kullanılarak hesaplanır ve yaşamın normal olarak maruz kaldığı birden fazla zorluğu gösterir (Kaynak: Harrison vd. 2013). *Eksenler, 3D alanı görüntülemek için farklı yönlerde gösterilmiştir.*

Yaşamın sınırlarını gerçekten anlamak için araştırmamız gereken çoklu-ekstremofillerdir. Bölümün başlarında biyo-uzay'ı basitleştirilmiş iki boyutlu bir formda göstermiş olsak da, bunu farklı zorluklara karşılık gelen birçok boyutta yeniden çizebiliriz. Şekil 7.14'ün, bir dizi ekstremofilin büyüme aralığına yönelik pH, tuzluluk ve sıcaklık dereceleri için geçerli olan biyo-uzayı gösterecek şekilde üç boyutlu olarak çizildiğini görebilirsiniz.

Bu tür çizimlerin bir özelliği, bazı uç noktalardaki 'eksik' çoklu-ekstremofillerdir. Örneğin asidofilik halofil eksikliğinin nedeni hem düşük pH'a hem de yüksek tuza uyarlanımın çok zor olmasından mı yoksa bu organizmaları bulmak için yeterince düşük pH'a ve yüksek tuzluluğa sahip ortamları henüz keşfetmememizden mi kaynaklanıyor? Eninde sonunda yaşam bir sınıra ulaşacak, bu nedenle biyo-uzayın süresiz olarak genişlememesini bekleyebiliriz. Ancak, daha zorlu ortamları keşfetmek için yapacak çok işimiz olduğu neredeyse kesindir. Laboratuvarda mikropların incelenmesi, özellikle birçok çalışma sıcaklık, pH ve tuzu araştırdığı için, bilim insanlarının birçok uçta canlılık sınırlarını tanımlamasına izin verecektir, bu nedenle Şekil 7.1'de gösterilen tüm zorluklar için üç boyutlu grafikleri tamamlayamayız. Bu sorunun az bilinen bir yönü, uç noktalardaki yaşam enerjisidir. Bir organizmanın belirli bir zorlukla başa çıkabilmesi için ne kadar enerji edinmesi gerekir ve bahsi geçen çok zorlu koşulların enerji maliyetleri ve sınırları nelerdir?

Tartışma Noktası: Yaşamın sınırları evrensel mi?

Nihayetinde yaşamın sınırlarını tanımlayan nedir; biyokimya veya fizik? Bazı insanlar Dünya üzerindeki yaşamın sınırlarının biyokimyanın bir kazası olduğunu ve başka bir yerde yaşam varsa, tamamen farklı yeteneklere sahip olacağını söylediler. Ama durum böyle mi? Örneğin karbon karbon bağı, evrensel olan tanımlanmış bir enerjiye sahiptir. Belli bir sıcaklıkta bu bağlara verilen enerji, biyokimyanın bu molekülleri onarma veya yeterince hızlı yenilerini üretme yeteneğini kesinlikle aşacaktır. Sonuç olarak, yüksek sıcaklık aşırılıkları için fizik ve kimyanın sadece evrim biyolojisindeki kazaları değil yaşam sınırını tanımlaması gerektiğini güvenle söyleyebiliriz. Diğer fiziksel ve kimyasal aşırılıklar ne olacak? Dünyadaki organizmaların pH, metal toksisitesi, basınç veya tuzlulukta sınırları, örneğin biyokimya tuhaflıklarıyla uzun zaman önce sabitlenmiş midir, yoksa yaşam fizik sınırlarında mı çalışır? Bu bize bu uç noktaların ne kadar evrensel olduğu hakkında ne söyleyebilir?

Karasal yaşam, fiziksel ve kimyasal aşırılıklarla başa çıkmak için yöntemler geliştirmek için 3,5 milyar yıldan fazla bir süreye sahiptir. Karasal yaşam tarafından sergilenen sınırların, biyofiziksel yeteneklerin evrensel sınırlarını temsil ettiği varsayımı olabilir, ancak sınırlar, belirli bir karbon bazlı yaşama dâhil edilen anahtar moleküllerin kesin yapısına bağlı olarak hafifçe değişebilir. Başka bir yerde yaşamın keşfi, bu hipotezi test etmemizi sağlayacaktır.

Clarke, A. (2014) The thermal limits to life on Earth. *International Journal of Astrobiology* **13**, 141–154.

Corkrey, R., McMeekin, T.A., Bowman, J.P., Ratkowsky, D.A., Olley, J., Ross, T. (2014) Protein thermodynamics can be predicted directly from biological growth rates. *PLoS ONE* 9, e96100. doi:10.1371/journal.pone.0096100.

7.13 Yeraltında Yaşam

Dünya yüzeyinin altı, birçok yönden yaşamın sıklıkla maruz kaldığı çoklu zorlukları örnekleyen aşırı bir ortamdır. Besin maddelerinin eksikliği, yüksek basınç ve sıcaklık, tuzluluk, kuraklık ve zehirli elementlerin yüksek konsantrasyonları, ayrı ayrı veya yeraltında farklı yerlerde kombinasyon halinde görülen uç noktaların sadece bir kısmıdır. Yeraltındaki yaşam derinliği sonuçta sıcaklıkların yaşam için üst sıcaklık sınırını aştığı derinliğe göre belirlenir. Bu, okyanus kabuğuna mı yoksa kıtasal (kara esaslı) kabuğa mı bağlı olduğunuza bağlı olarak, muhtemelen yaklaşık 5 ila 10 km derinliktedir (122 °C üst sıcaklık sınırını varsayarak). İkincisindeki sıcaklık artışı (yaklaşık 25 °C km^{-1}) okyanus kabuğundakinden yaklaşık 10 °C km^{-1} daha yüksektir.

Mikroplar derin yağ rezervuarlarında, hidrotermal sistemlerde, derin granitlerde ve diğer kayaçlarda bulunmuştur. Fotosentezin mümkün olmadığı yeraltı derinliklerinde ekstremofillerin çoğu, Bölüm 5'te mikrobiyal metabolizmayı tartışırken tanıştığımız, kemoototrof ve kemoheterotroflardır.

Yeraltının derinliklerinde yaşayan mikroplar, son derece düşük enerji kullanılabilirliğine uyum göstermiştir. Uzun süre uykuda kalma yeteneğine sahiptirler ve metabolik aktiviteleri neredeyse jeolojik zaman periyotlarına yaklaşır ve iki katına çıkma süreleri asırları hatta bin yılı aşar.

Derin biyosferin kapsamı tam olarak bilinmemektedir, ancak Dünyadaki canlı biyokütlesinin %10 ila %50'sini oluşturabilir. Karanlıkta düşük enerji varlığında yaşayan ve birden fazla uçta kemoototrofik yollar kullanan organizmaların varlığı derin yeraltı biyosferini, eğer varsa, diğer gezegenlerdeki derin biyosferlerin olası koşullarını anlamak için modeller arayan astrobiyologlar için büyük bir ilgi odağı haline getirdi.

7.14 Zorlu Koşullarda Dormansi

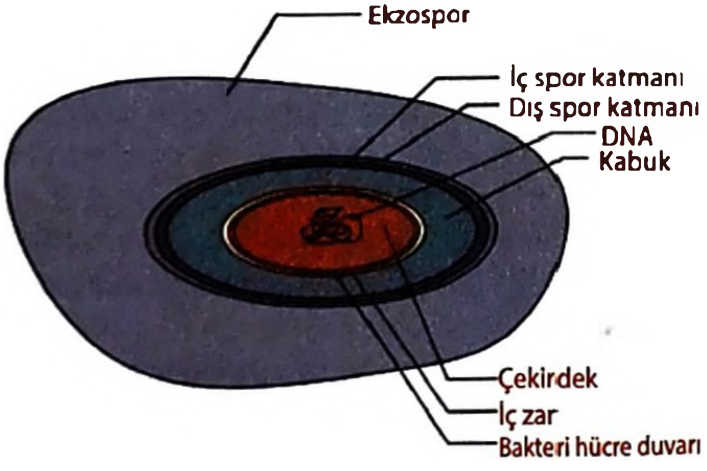
Bazı mikroorganizmalar, daha iyi koşullar gelene kadar veya daha iyi koşullara sahip bir yere ulaşana kadar bir uyku hali durumuna girmelerine izin veren zorlu koşullara özel tepkiler verir.

Çevresel koşullar zorlu hale geldiğinde, birçok *Bacillus* ve *Clostridium* türü de dâhil olmak üzere bazı bakteriler, özel bir hücre tipi olan *endospor* (veya sadece spor) oluşturma kapasitesine sahiptir (Şekil 7.15). Aşırı besin sınırlaması gibi çevresel zorlukların oluşması, hücrede bir dizi değişikliği tetikler. DNA çoğaltılır ve DNA'nın bir kopyası hücrenin yok olmasıyla imha edilirken, diğer kopya bir dizi spor katmanıyla kaplanır. Dışarıdan, spor, bir *glikoprotein* ta-

bakası olan ekzosporla (tüm sporlarda bu tabakaya sahip değildir) çevrilir. Altındaki protein açısından zengin spor katmanı, moleküler bir elek görevi görür ve yıkıcı enzimlerin ve diğer moleküllerin iç kısma ulaşmasını önler. Altında peptidoglikan içeren kabuk bulunur. Hücre duvarı ve plazma zarının altında, bir sonraki tabaka olan çekirdek bulunur. Çekirdek içindeki DNA, sporun kuru ağırlığının %5 ila %20'sini oluşturabilen kalsiyum dipikolinatla sabitlenir. Çekirdek içindeki DNA ayrıca, onu radyasyon ve kimyasal hasardan koruyan küçük, asitte çözünen proteinlerle (SASP) kaplanır.

Sporlar, dikkat çekici çevresel dayanıklılıklara sahiptir; kuraklığa ve büyük sıcaklık değişimlerine direnç gösterirler. Alçak Dünya yörüngesindeki Uzun Süreli Maruz Kalma Tesisi (LDEF) uydusunda altı yıldan fazla bir süre hayatta kalmışlar ve uzay aracının temiz odalarında bulunmuşlardır. Sporların maksimum ömrü bilinmemektedir. On milyonlarca yıllık tuzlarda hayatta kaldıklarına dair tartışmalı öneriler var. 500.000 yıllık donmuş toprakta varlıkları rapor edilmiştir. Canlılığın uzun zaman periyotları boyunca çevresel saldırılara dayanmasını sağlayan bir mekanizma oldukları için astrobiyologların açıkça ilgilerini çekerler.

Sporlar, yüksek sıcaklıklar gibi birçok çevresel aşırılığa karşı dirençli olmalarına rağmen, vejetatif hücreler gibi UV radyasyonuna duyarlıdırlar ve spordaki DNA'ya nüfuz ettiği için kısa dalga boylu radyasyon tarafından hızla öldürülürler. Örneğin, o gezegendeki yoğun UV radyasyonu tarafından Mars yüzeyinde hızla yok olacaklardır. Bununla birlikte, steril edilmemiş uzay araçlarının içinde veya toz katmanları altında korunan canlı sporların Mars yüzeyinde varlığını sürdürebileceğini öne sürmek mantıksız görünmüyor. Uzay gemilerinde kirletici endosporların varlığı, gezegen araştırması sırasında diğer gezegen yüzeylerini ne ölçüde kirleteceğimiz konusunda soruları gündeme getiriyor. Bu endişeye gezegen koruması denir ve ilerleyen bölümlerde bu konuya tekrar döneceğiz.



Şekil 7.15 Tipik bir bakteri sporunun şematik diyagramı. Farklı katmanların mutlak doğası ve varlığı farklı sporlar için değişir. Bir spor genellikle yaklaşık 1 μm uzunluğundadır (Kaynak: Charles Cockell).

Bitkisel hücreler bile aşırı koşullarda hayatta kalabilirler. Bazı çoklu-ekstremofillerin aşırı uç noktalarda –dış uzayda– hayatta kaldıkları gösterilmiştir. Uzayda organizmalar, UV radyasyonu, aşırı kuraklık ve düşük sıcaklıkların birleşik zorluklarına maruz kalırlar. Avrupa Uzay Ajansının Uluslararası Uzay İstasyonunun dışına eklenmiş EXPOSE tesisinde,

organizmalar Alçak Dünya yörüngesindeki zorlu uzay koşullarına maruz kalmıştır. Yine de, *Chroococcidiopsis* (Şekil 7.10) ve likenler gibi siyanobakteriler de dâhil olmak üzere çeşitli organizmalar bu koşullarda hayatta kalabilmiştir. Bu organizmaların bu çevrede büyümedikleri, ancak kurumuş, inaktif hücreler olarak varlıklarını sürdürdükleri vurgulanmalıdır.

7.15 Ökaryotik Ekstremofiller

Bakteriler ve arkeler aşırı ortamlara hâkim olsa da, ökaryotları dışlayan bir resim çizmek yanlış olur. Birçok mantar, reçel üzerinde büyüyen ve 0,75 su aktivitesinde büyüyebilen *Trichosporonoides nigrescens* gibi dikkat çekici aşırılıklara karşı dayanıklılığa sahiptir. Dahası, düşük su aktivitesindeki büyüme sınırı (aw = 0,67) *Xeromyces bisporus* mantarı tarafından belirlenir. Birçok mantar ayrıca yüksek radyasyon, asit, kuraklık ve çok çeşitli diğer streslere karşı dayanıklıdır.

Bazı çok hücreli ökaryotlar aşırı uçlara karşı dayanıklıdır. Mikropların yanı sıra, daha önce alkalifiller için bir yuva olarak tanıştığımız 10 pH derecesine sahip olan Mono Gölü, alkali sineklere (*Ephydra hians*) ve tuzlu su karidesine (*Artemia monica*) ev sahipliği yapar.

Alkali sinek larvalarının uyarlanımlarından biri, larva gövdesi içindeki kalsiyum karbonatın çökelmesidir ('kireç bezi'). Gölün yüksek pH değerlerine katkıda bulunan karbonat iyonları *biyominerallere* ayrılır. Bu şekilde gölün aşırı yüksek karbonat konsantrasyonlarının hücre fonksiyonlarına müdahale etmesini önlerler.

Mono Gölünde yaşayan tuzlu su karidesinin uyarlanımları hala tam olarak anlaşılamamıştır. Yüksek konsantrasyonlarda basit bir şeker bileşiği olan gliserol, yüksek iyon sularında hayatta kalmalarına izin verdiği düşünülen kistlerinde (hareketsiz dinlenme durumları) ortaya çıkar. Tuzlu su karidesi sadece tuza değil, aynı zamanda kuraklığa karşı da dayanıklıdır; bu durum da onların çoklu-ekstremofil sınıfına dâhil olmasına neden olur. Apollo 16 ve 17 görevleri sırasında başka bir tür olan *Artemia salina*'dan kistler Ay yörüngesine kadar gidip geri gelmeyi başardı. *Kozmik ışınların*, bazıları normal olarak gelişmesine rağmen, larvaların tam gelişimini engellediği bulunmuştur.

Çok hücreli bir ekstremofilin bir başka muhteşem örneği, kış aylarında donmadan hayatta kalabilen, ağaç kurbağası olarak bilinen *Lithobates sylvaticus*'tur (Bölüm 3). Kuzey Amerika ormanlarında yaşayan bu canlılarda kış aylarında kandaki glikojen glikoza dönüştürülür ve donma koruyucu (kriyoprotektan) görevi görür. Bu kurbağa kış aylarında aktif değilken, ilkbaharda tekrar hareketlenir. Donmaya yönelik bu uyarlanımlar, kutup ortamlarında yaşayan böcekler, balıklar ve çeşitli taksonlar tarafından da paylaşılmaktadır.

Böcekler ve balıklar dâhil olmak üzere kutuplarda yaşayan birçok çok hücreli organizma, hücreler içinde buz kristali oluşumunu engelleyen glikoprote-



Şekil 7.16 Bir tardigrad: aşırı dayanıklı bir hayvan. Bu hayvanlar genellikle yaklaşık 0,5 mm uzunluğundadır (Kaynak: wikicommons, Darron Birgenheier).

inler olan *antifriz proteinleri* üretir. Bu proteinler gıdaların korunmasında ve organ nakli için organların soğuk ortamda depolanmasında kullanım açısından büyük potansiyele sahiptir.

Zorlu koşullara etkileyici bir şekilde direnç gösteren en küçük hayvanlar tardigradlardır (su ayıları veya yosun domuzu yavruları; Şekil 7.16). Tardigradlar, 530 milyon yıl önce Kambriyen döneminden kalma fosilleri olan eski bir grup olan *Tardigrada filumun*'a aittir. Tam olarak büyütdüklerinde yaklaşık 0.5 mm uzunluğundadırlar ve 40.000 hücreye sahiptirler. Kutup bölgeleri, ekvatoral çöller ve yüksek dağlar da dâhil olmak üzere tüm Dünya çapında yaşam alanları vardır.

Tardigradlar etkileyici bir stres yelpazesinde hayatta kalabilir. Birkaç dakika süresince 151 °C'ye kadar ısıtılabilir veya –200 °C'ye kadar soğutulabilirler. Havasız ortama ve atmosfer basıncının 1200 kattan fazlasına dayanabilirler. Bazı türler, en derin okyanus çukuru olan Mariana Çukurundaki su basıncının yaklaşık altı katı olan 6000 atm'lik bir basınca bile dayanabilirler. Yaklaşık 10 yıl boyunca susuz ortamda hayatta kalabilirler. Aşırı düşük sıcaklıklara maruz kaldıklarında, vücut bileşimleri %85 sudan sadece %3'e iner. Diğer hayvanlardan bin kat daha fazla iyonlaştırıcı radyasyona dayanabilirler ve kısa dalga boyundaki UV radyasyonuna karşı oldukça dirençlidirler. Onlar uzayda hayatta kalabildiği bilinen ilk hayvanlardır. 2007 yılında, BIOPAN astrobiyoloji araştırmalarının yapıldığı FOTON-M3 görevinde sudan arındırılmış tardigradlar Alçak Dünya yörüngesine alındı. 10 gün boyunca, tardigrad grupları Alçak Dünya yörüngesindeki boşluğa maruz bırakıldı. Dünyaya döndükten sonra tekrar normal su seviyelerine ulaştıklarında, yüksek enerjili UV radyasyonundan korunan organizmaların %68'inden fazlası yeniden canlandı, ancak daha sonraki mortalite yüksekti.

Biyokimyasal uyarlanımın çok yönlülüğü ve mekanizmaları hakkında çok şey ortaya koyan bu etkileyici ökaryotik uyarlanım örneklerine rağmen, mikroorganizmalar bize çevresel aşırı uçlarla ilgili en kapsamlı veri setimizi sağlıyor ve bize çok zorlu koşullar altında yaşamın sınırlarını tanımlama imkanı sağlıyor.

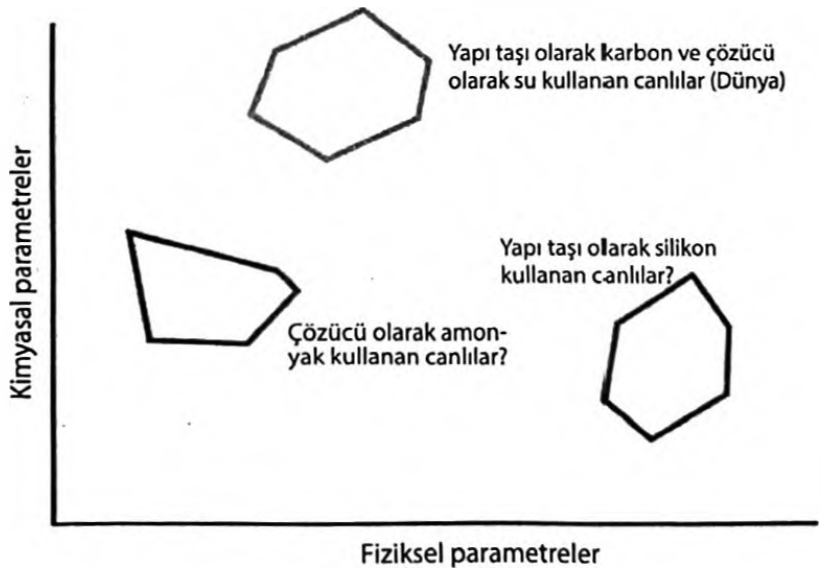
7.16 Başka Biyo-uzaylar Var Mı?

Evrende, Bölüm 3'te tartıştığımız gibi tamamen farklı biyokimyaların fiziksel ve kimyasal uçları tarafından tanımlanan başka biyo-uzaylar var mı? Yaşamın farklı biyokimyalarla meşgul olabileceği çoklu biyo-uzayların olasılığı kavramsal olarak Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Şimdiye kadar, karbon için alternatif bir elementer yapı taşı ve suya alternatif bir çözücü kullanan canlılar için hiçbir kimyasal kanıt yoktur. Şimdilik sadece Dünyadaki canlıların örneklediği karbon ve su temelli yaşamın işgal ettiği biyo-uzayı biliyoruz. Bununla birlikte, önerilen alternatif çözücüler ve temel yapı taşları, astrobiyologları kendi biyo-uzayımızın evrendeki yaşamın gerçek sınırlarını tanımlayıp tanımlamadığını öğrenmek için deneyler yapmaya davet etmektedir.

Gelecekte astrobiyolojinin karşılaşacağı zorluklardan biri, diğer gezegenimsilerde alternatif biyo-uzayların var olduğu hipotezini test etmek ve böylece bizi yaşamın sınırlarının tam bir tanımına yaklaştırabilmektir.

7.17 Yaşamın Sınırları: Bir Kez Daha Yaşanabilirlik

Bölüm 3'te, bir ortamın yaşanabilir olması için, yaşam için temel unsurları (CHNOPS) sağlayan ve fiziksel ve kimyasal koşulların, şu anda uygun çözücü olarak kabul ettiğimiz sıvı suyun varlığını destekleyen bir ortam olması gerektiğini gördük. Ayrıca Bölüm 5'te, yaşanabilir bir ortamın canlıların büyümesi ve çoğalması için erişilebilir ve uzun süre boyunca sürdürülebilecek makul bir enerji kaynağı gerektirdiğini gördük. Bu bölümde ayrıca, yaşanabilir bir ortamın, yukarıdaki faktörlerden bağımsız olarak, yaşam için çok aşırı olmayan kimyasal ve fiziksel koşullara sahip olması gerektiğini öğrendik. Fiziksel bir alan veya belirli bir çevre açısından bu gereksinimler, belirli türler için yaşanabilir bir yerde olması gereken fiziksel ve kimyasal koşulları tanımlar.



Şekil 7.17 Evrende başka biyouzaylar var mı? Belirli bir fiziksel ve kimyasal aşırılıklar kümesinde yaşamın biyo-uzaylarını gösteren basit bir kavramsallaştırılmış 2 boyutlu diyagramı (Kaynak: Charles Cockell).

Bu gözlem önemlidir, çünkü elementlerin, bir çözücünün ve enerjinin varlığı kendi başına bir ortamın yaşanabilir olduğunu anlamına gelmez. Örneğin Mars'taki düşük pH'a sahip, düşük su aktiviteli tuzlu suları düşünün. Bu çözümler jeokimyasal çalışmalardan elde edilen sonuçlara dayalı tahminlere dayanmaktadır. Bu tuzlu suların bazılarının su aktivitesi için halihazırda bilinen biyolojik sınırın altında, 0,5 kadar düşük su aktiviteleri olabilir. Böyle bir ortam sulu (sıvı su içerir) ve CHNOPS'u (Mars atmosferinden karbondioksit formunda C; su içinde H; belki nitrat gibi tutuklanmış azotta N; su içinde O; fosfor içeren volkanik kayaçlarda bulunan ve tuzlu suda çözülebilen *apatit* gibi minerallerde P ve Mars'ta varlığı bilinen ve tuzlu su içinde olması muhtemel sülfat bileşiklerinde S) içerir. Tuzlu su ayrıca bir enerji kaynağı içerebilir, örneğin içinde organik madde olabilir veya yüzeydeyse, anoksijenik fotosenteze izin verebilir. Bu varsayımsal tuzlu su, CHNOPS açısından, su ve enerji mevcudiyeti bakımından yaşanabilir. Bununla birlikte, su aktivitesi yaşam için gerekli olanın altındaysa, tuzlu su yaşamaya uygun değildir. Böylece, fiziksel ve kimyasal koşullar, kendi başlarına, bir çevrenin yaşanabilirliğini tanımlamanın önemli bir parçasıdır.

7.18 Sonuç

Dünya üzerindeki yaşam, fiziksel ve kimyasal aşırılıklarla çevrili bir biyo-uzay olarak düşünülebilir. Yaşamın sınırlarını anlamak astrobiyoloji için önemlidir, çünkü Dünya dışı ortamların, özellikle de fiziksel ve kimyasal uçlarına göre yaşanabilirliğini değerlendirmek için deneysel bir temel sağlar. Çok az organizma tek bir zorluğa maruz kalmaktadır ve organizmaların belirli zorluklara nasıl uyum sağladıkları hakkında çok şey bilmemize rağmen, çoğu doğal ortam birden fazla strese uyarlanım gerektirir. Dünyadaki birçok ortam astrobiyologların ilgisini çekmektedir; Örneğin aşırı pH, tuzlu ve derin yeraltı ortamları astrobiyologlara biyokimyaların bir dizi gezegensel koşullar altında nasıl evrimleştiği hakkında bilgi verir. Bazı durumlarda, bu uçlarda yaşayan organizmalar yeni endüstriyel kullanım ürünleri sağlar. Astrobiyolojideki önemli bir soru, Dünyadaki yaşamın, mümkün olan mutlak fiziksel ve kimyasal sınırları ne ölçüde keşfettiğidir ve başka bir yerde yaşam varsa, aynı aşırılıklarla sınırlanmış mıdır?

İleri Okumalar

Kitaplar

Gross, M. (2001) *Life on the Edge: Amazing Creatures Thriving in Extreme Environments.* Basic Books, New York.

Postgate, J.R. (1995) *The Outer Reaches of Life.* Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge.

Yayınlar

Amaral Zettler, L.A., Gómez, F., Zettler, E., Keenan, B.G., Amils, R., Sogin, M.L. (2002) Microbiology: eukaryotic diversity in Spain's River of Fire. *Nature* **417**, 137.

Billi, D., Friedmann, E.I., Hofer, K.G., Grilli Caiola, M., Ocampo-Friedmann, R. (2000) Ionizing-radiation resistance in the desiccation-tolerant cyanobacterium Chroococcidiopsis. *Applied and Environmental Microbiology* **66**, 1489–1492.

Bowers, K.J., Wiegel, J. (2011) Temperature and pH optima of extremely halophilic archaea: a mini-review. *Extremophiles* 15, 119–128.

Brock, T.D., Hudson, F. (1969) Thermus aquaticus gen. n. and sp. n., a nonsporulating extreme thermophile. *Journal of Bacteriology* 98, 289–297.

Clarke, A. (2014). The thermal limits to life. *International Journal of Astrobiology* 13, 141–154.

Cox, M.M., Battista, J.R. (2005) Deinococcus radiodurans –the consummate survivor. *Nature Reviews Microbiology* 3, 882–892.

Edwards, K.J., Wheat, C.G., Sylvan, J.B. (2011) Under the sea: microbial life in volcanic oceanic crust. *Nature Reviews Microbiology* 9, 703–712.

Friedmann, E.I. (1982) Endolithic microorganisms in the Antarctic cold desert. *Science* **215**, 1045–1053.

Grant, W.D., Gemmell, R.T., McGenity, T.J. (1998) Halophiles. In: *Extremophiles: Microbial Life in Extreme Environments*, ed. K. Horikoshi and W.D. Grant, Wiley-Liss, New York, pp. 99–132.

Harrison, J.P., Gheeraert, N., Tsigelnitskiy, D., Cockell, C.S. (2013) The limits for life under multiple extremes. *Trends in Microbiology* 21, 204–212.

Horneck, G., Bücker, H., Reitz, G., Requardt, H., Dose, K., Martens, K.D., Mennigmann, H.D., Weber, P. (1984) Microorganisms in the space environment. *Science* 225, 226–228.

Mesbah, N.M., Wiegel, J. (2008) Life at extreme limits: the anaerobic halophilic alkalithermophiles. *Annals New York Academy Sciences* 1125, 44–57.

Oger, P.M., Jebbar, M. (2010) The many ways of coping with pressure. *Research in Microbiology* 161, 799–809.

Pedersen, K. (1997) Microbial life in deep granitic rock. *FEMS Microbiology Reviews* 20, 399–414.

Reed, C.J., Lewis, H., Trejo, E., Winston, V., Evilia, C. (2013) Protein adaptations in archaeal extremophiles. *Archaea* 2013, 373275.

Rothschild, L.J., Mancinelli, R.L. (2001) Life in extreme environments. *Nature* 409, 1092–1101.

Wackett, L.P., Dodge, A.G., Ellis, L.B.M. (2004) Microbial genomics and the periodic table. *Applied and Environmental Microbiology* 70, 647–655.

Whitman, W.B., Coleman, D.C., Wiebe, W.J. (1998) Prokaryotes: The unseen majority. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95, 6578–6583.

Whittaker, R.H., Levin, S.A., Root, R.B. (1973) Niche, habitat and ecotope. *The American Naturalist* 107, 321–338.

Wilson, Z.E., Brimble, M.A. (2009) Molecules derived from the extremes of life. *Natural Product Reports* 26, 44–71.

Wynn-Williams, D.D., Edwards, H.G.M. (2000) Antarctic ecosystems as models for extraterrestrial surface habitats. *Planetary and Space Science* 48, 1065–1075.

8

YAŞAM ELEMENTLERİNİN OLUŞUMU

Öğrenme Çıktıları

- Evrenin başlangıcıyla ilgili mevcut teorileri anlamak.
- Yıldızların nasıl oluştuğunu anlamak.
- Küçük ve büyük kütleli yıldızlar arasındaki farkı ve bunların içinde oluşan elementlerin etkilerini açıklamak.
- Kara cisim kavramını anlamak ve maksimum enerji yayınımının dalga boyunu, farklı kara cisim nesnelerinin yoğunluk dağılımını ve gücünü hesaplayabilmek.
- Yaşamı oluşturan ağır elementlerin nasıl oluştuğunu anlamak.
- Gezegenlerin, ön gezegen disklerinde nasıl oluştuğunu ve Jeans kütlesi ile kütleçekim büyüklüğünün gezegen öncüllerine odaklanarak nasıl hesaplanabileceğini açıklamak.
- Yıldızların ömrünü kütlelerinden hesaplayabilmek.
- Kayalık gezegenlerin nasıl ve neden oluştuğunu anlamak.
- Güneş Sistemini oluşturan cisimlerin türlerini ve hareketlerini düzenleyen yasaları anlamak.
- Başlıca göktaşı türlerini ve Güneş Sistemindeki ilk maddeler hakkında bize neler söyleyebileceklerini temel olarak anlamak.

8.1 Başlangıçta

Önceki bölümlerde Dünya üzerindeki yaşamı araştırdık. Yaşamın, enerjisini aldığı moleküler yapısını ve organizmalar arasındaki ilişkileri inceledik. Aslında herhangi biri, bu kitabın ilk bölümünün evrendeki yaşamla ilgili elimizdeki tek veri noktasını anlamakla ilgili olduğunu söyleyerek basit bir şekilde özetleyebilir. Yaşamın yapısı hakkında bilgiyle donatılmış olarak, şimdi yaşamı kozmik bağlamında keşfetmek için yola çıkıyoruz. Bu kitabın geri kalanı bu göreve odaklanmıştır. İlk hedefimiz, yaşamı oluşturan öğelerin nereden geldiğini anlamaktır. Bunu yapmak için önce bakış açımızı astronomik ölçeğe genişletmeliyiz.

Kozmik ölçeğe geçerken, bahsettiğimiz mesafelerin geniş olduğunu fark edeceksiniz. Metre ve kilometreler bunları ifade etmek için yetersizdir. Bu ölçü

birimlerini kullansak bile, uygunsuz rakamlarla karşılaşırız. Bu bölüm boyunca **Astronomik Birim** (AB), Dünyanın Güneşe olan eşdeğer mesafesi, terimini göreceksiniz. Dünyanın yörüngesi tam olarak dairesel olmadığından, bu mesafe eskiden ortalama Güneş-Dünya mesafesiydi. Şimdi bu mesafe, tam olarak 149.597.870.700 m olarak tanımlanmaktadır. **Işık yılı**, ışığın bir yılda kat ettiği mesafeyi, $9{,}46 \times 10^{15}$ m, ifade eder. Yine kullanacağımız bir başka ölçü birimi parsektir. Parsek, bir yay saniye paralaks açısına sahip bir astronomik nesnenin Güneşe olan mesafesidir (diğer bir deyişle, bir parsek uzaktaki bir yıldızı ondan çok uzaktaki yıldızlarla karşılaştırırken, yakındaki yıldızın, Dünya 1 AB'lik bir düz çizgi mesafesi hareket ettiğinde daha uzaktaki 'sabit' yıldızlara göre bir yay saniyelik (bir derecenin üç bin altı yüzde biri) bir açıyı izleyerek hareket ettiği görülecektir). Bir parsek, 3,26 ışık yılına eşittir.



Şekil 8.1 Kozmik bağlamda Güneş Sistemimiz (Kaynak: wikicommons, Andrew Z. Colvin).

İşte buradayız, Samanyolu Gökadasında yaklaşık 100.000 ışık yılı boyunca bir yıldızın etrafında dönüyoruz (yörünge çapı tam olarak belirlenmedi çünkü gökada kenarlarda 'inceliyor' ve çapı oldukça değişken). Güneş Sistemimiz, yaklaşık 3500 ışık yılı genişliğinde ve 10.000 ışık yılı uzunluğunda, gökadanın küçük bir sarmal kolu olan Avcı Kolunun içindedir. Güneş galaktik merkezden yaklaşık 26.000 ışık yılı uzakta ve şu anda galaktik düzlemin yaklaşık 21 ışık yılı üzerindedir. Gökadanın merkezinde, Güneşin kütlesinin yaklaşık dört milyon katı olan süper kütleli bir kara delik etrafında seyahat ediyoruz. Her 250 milyon yılda bir yaklaşık 250 km s^{-1}'de bu kara deliğin yörüngesine giriyoruz. Oldukça ortalama büyüklükte çubuklu sarmal bir gökada olan *gökadamız*, bize doğru hızla hareket eden ve

yaklaşık dört milyar yıl içinde gökadamızla birleşecek olan yaklaşık 2,5 milyon ışık yılı uzaklıktaki sarmal bir gökada olan Andromeda Gökadasına yakındır. Etrafımızda çok daha küçük gökadalar (50'den fazla) var. Hep birlikte Yerel Galaktik Grubun Yerel Kümesini oluşturmaktayız. Yerel Grubumuz, başlı başına çok sayıda gökadaya sahip olan Laniakea Üstkümesinin bir parçası olan Başak Süperkümesi (Şekil 8.1) olarak adlandırılan çok daha büyük bir grubun parçasıdır. Süperkümenin iç bölgesinde, yaklaşık 50 milyon ışık yılı uzaklıkta dev bir gökada topluluğu olan Başak Kümesi yer almaktadır.

Bu duruma nasıl geldik? Sonunda tüm bu gökadaları, yıldızları, Dünyayı ve nihayetinde içinde yaşadığımız biyosferi oluşturmak için bir araya gelen unsurların kaynağı neydi?

Şimdi evrenin başlangıcına geri dönelim ve yaşam için gerekli olan elementlerin nereden geldiğini ve yıldızlar ile gezegenlerin nasıl oluştuğunu düşünelim. Evrenin başlangıcına, yaklaşık 13,8 milyar yıl öncesine, dönmek kozmoloji çalışmaları içim kolları sıvamak anlamına gelir. Kozmolojide cevaplanmamış çok sayıda soru var. Bu soruların bazılarında belirgin astrobiyolojik sonuçlar vardır. Var olan tek evren miyiz? Bu soru bizi, Çoklu Evren adı verilen, diğer evrenlerde başka yaşam formları ve medeniyetler olup olmadığını sormaya zorluyor. Büyük Patlama sadece önceden var olan bir evrenin sonu muydu, bu durumda önceki evren yok olana kadar yaşam formları ve medeniyetler içeriyor muydu? Bu sorular kozmoloji ve astrobiyoloji arasındaki ilgi çekici arayüzde yer almaktadır. Bu konuyla alakalı sorular, ne kadar ilginç olsalar da, oldukça zor sorulardır. Artık kendimizi bu sorulara hapsetmeyeceğiz, bunun yerine bildiğimiz tek evrene odaklanacağız. Aynı zamanda Büyük Patlamayı başlangıç noktası olarak kabul ediyor ve bu evren teorisinin doğru olduğunu varsayıyoruz. Bu teoriyi destekleyen kanıtlar var, bu mantıklı bir çıkış noktası gibi görünüyor.

Büyük Patlama anında (Şekil 8.2), tüm evren tekillik halinde sıkıştırılmış olabilir. Evrenin en erken aşamaları (saniyenin ilk milyonda biri) tam olarak anlaşılamamıştır. Evrenin yaklaşık 10^{-37}. saniyesinde, evrenin katlanarak büyüdüğü bir kozmik genişleme meydana geldi. Genişleme durduktan sonra, evren temel parçacıklar ve enerjiden oluşuyordu. Evrenin yoğunluğu azalmaya, sıcaklığı düşmeye devam etti. Yaklaşık 10^{-6}. saniyede, evrenin sıcaklığı yaklaşık 1013 K'di ve madde/karşı-madde çiftleri halinde parçacıklar yaratıldı; daha sonra, kütlenin (m) enerjiye (E) enerjinin kütleye dönüştürülebileceğini gösteren, Einstein'ın ünlü denklemi $E = mc^2$'de olduğu gibi, enerji üretmek için birbirlerini yok ettiler.

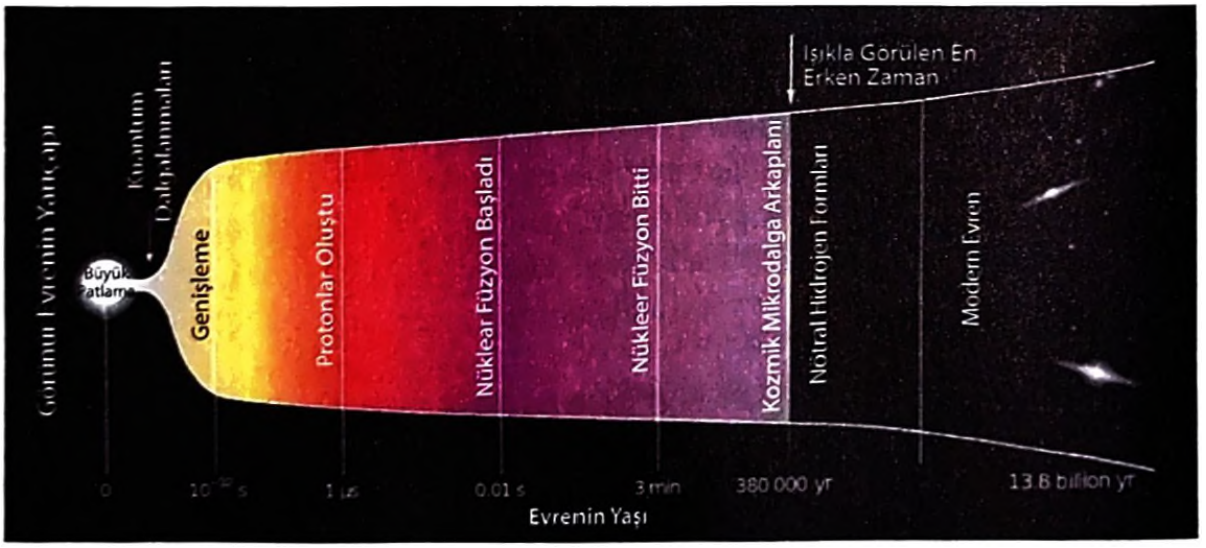
Astronomları doğrudan rahatsız eden ilginç bir sorun var. Hepimiz maddeden meydana geldik, karşı-maddeden değil ve bildiğimiz kadarıyla etrafımızdaki diğer gökadaların tümü de maddeden oluşmuştur. Bu nedenle, erken evrende, madde/karşı-madde çarpışmaları meydana geldiğinde, az miktarda maddenin geride kalmasını veya evrendeki tüm maddenin tekrar enerjiye dö-

nüşmesini sağlayan bir asimetri olmalı. Bu asimetri milyarda bir olmalıdır. Bunun nasıl gerçekleştiği, evrenin oluşumundaki adımların gizemlerinden biri olmaya devam ediyor.

Evrenin ilk mikrosaniyesinden sonra sıcaklıklar, sürekli yok oluşun yavaşlamasına izin verecek kadar düşüktü ve protonlar ile nötronların oluşmasına izin verdi. Bu son derece yüksek sıcaklıklarda, nötronlar çekirdek oluşturmak için protonlara bağlanamazlar. Termal enerjiyle birbirlerinden ayrılırlar.

Bundan kısa bir süre sonra, evrenin oluşumunun yaklaşık 3. dakikasında (kesin zamanlamalar belirsiz olmasına rağmen), yaklaşık bir milyar K'in altındaki sıcaklık, ilk atom çekirdeğinin oluşumuna izin verdi. İlk oluşan, bir nötron ve bir proton içeren bir hidrojen *izotopu* olan döteryumdu. Oluşan diğer çekirdekler arasında, bir proton ve iki nötronlu bir hidrojen izotopu olan tirityum ve iki proton ve bir nötron içeren helyum-3 bulunmaktadır. Ancak bu çekirdeklerin tümü kararsızdır ve çarpışma sırasında çok daha kararlı helyum-4'ü oluştururlar. Atomik kütle sayısı 4 (^{4}He) olan bu atom, iki nötron ve iki protona sahiptir. Helyum-4 bazen alfa partikülü olarak adlandırılır. Ek olarak, bu üç **nükleosentez** (nükleer füzyon) reaksiyonunda, üç proton ve dört nötronla en yaygın lityum izotopu olan çok az miktarda lityum-7 oluşacaktır.

Bu çekirdekler uzun zamandır evrenin hammaddeleriydi. Sıcaklıklar, çekirdeklerin elektronlarla birlikte atomu oluşturması için hala çok yüksekti. Evren, yaklaşık 380.000 yıl boyunca veya sıcaklıklar ilk atomların (atomik hidrojen gibi) oluşmaya başladığı 3000 K'nin altına düşene kadar bir plazma olarak kaldı. Bu rekombinasyon olarak bilinen dönemdir. Atomların oluşumu önemli bir yan etkiye sahipti. Bu noktaya kadar, mevcut fotonlar evreni elektromanyetik radyasyona karşı opak hale getiren serbest elektronlarla etkileşime girdi. Bununla birlikte, atomlar oluştuktan sonra bu fotonların serbestçe dolaşmasına izin verdi.

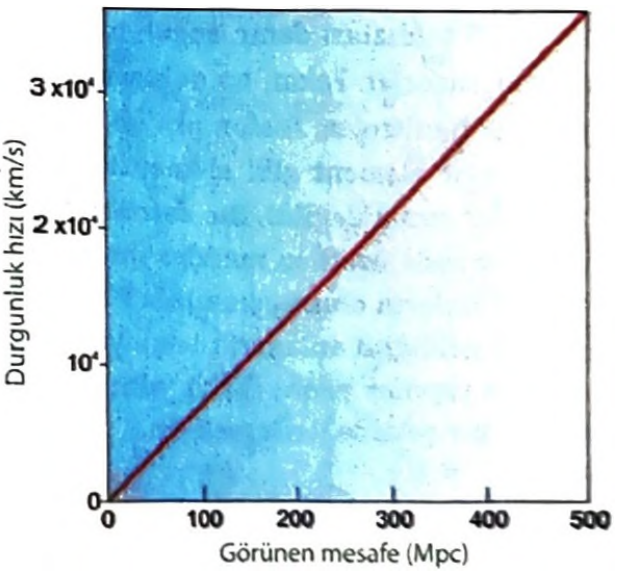


Şekil 8.2 Büyük Patlamayı takip eden olaylar (Kaynak: Wikipedia, Yinweichen).

Bu durum madde ve elektromanyetik radyasyonun ayrılmasına izin verdi. Elektromanyetik radyasyon soğumaya başladı. Günümüzde, bu enerji uzayda 2,7 K eşdeğer sıcaklıkta bir radyo gürültüsü olarak algılanabilir. Bu **kozmik arka plan radyasyonu**, 1965 yılında Arno Penzias ve Robert Wilson (1927–2002) New Jersey'deki eski bir radyo alıcısını gökyüzüne çevirdiklerinde keşfedildi. Başlangıçta, keşfettikleri gürültünün alıcıdaki güvercin dışkılarının neden olduğu bir elektronik gürültü olduğunu düşündüler, ancak güvercinleri uzaklaştırdıktan sonra da gürültü devam etti. Araştırmacılar, evrenin oluşumundan geriye kalan radyasyonun gürültüsünü keşfettiler.

Fotonların maddeden ayrılmalarıyla birlikte, atomlar tam olarak dağılmadı. Yoğunluk dalgalanmaları oluşmaya başladı. Yoğun alanların daha yoğun hale geldiği bir geri bildirim etkisinde, daha yoğun alanlar kütleçekim tarafından ortamdaki materyali emer, daha az yoğun alanlarda bu emilim daha az olur. Yoğunluk dalgalanmaları, maddenin en eski gökadalar ve yıldızları oluşturacak kümeler halinde birleşmeye başlamasına neden oldu. Bu dalgalanmaların, fotonlar ve madde ayrıldıkça kozmik arka plan radyasyonunun yoğunluğundaki dalgalanmalara yansıması beklenir. Arka plan radyasyonunun doğru ölçümleri, milyonda on parçanın dalgalanmasını ortaya çıkarır. Dikkat çekici bir şekilde ölçümler kozmologların, evrenin en erken aşamalarında çekirdeklerin yoğunluğunu tahmin etmelerine izin verir ve bu tahminler tamamen ve bağımsız olarak, bugün hidrojen ve helyum izotoplarının bolluğuna dayalı olarak yapılan yoğunluk tahminleriyle tutarlıdır.

Evrenin genişlediğine dair kanıtlar, uzak gökadalar ve yıldızlar tarafından iletilen ışığın gözlenmesiyle bulunur. Uzaktaki nesnelerin ışığı, elektromanyetik tayfın kırmızı ucuna doğru kaydırılır. Bu **kırmızıya kayma**, kozmolojik bir kırmızıya kayma, geleneksel **Doppler Etkisiyle** (bir dondurma kamyonetinin size doğru gelmesi ve sonra hayal kırıklığı yaratan bir şekilde sizden uzaklaşmasının yarattığı etkiye benzer şekilde, bir cismin size doğru gelmesinin veya sizden uzaklaşmasının neden olduğu etki) ilgilidir. Bu olay biraz daha karmaşıktır ve nesneler arasındaki boşluğun 'esnemesini' içerir.



Şekil 8.3 Hubble Yasası: Evrendeki nesnelerin mesafe-hız ilişkisini gösteren basit bir şematik grafik (Kaynak: Charles Cockell).

Bu genişleyen evrene dair diğer kanıtlar, bazen Hubble Yasası olarak da adlandırılan, diğer gökadalar arasındaki mesafe ve birbirlerinden uzaklaşma hızları

arasındaki doğrusal ilişkiden elde edilmektedir (Şekil 8.3). Uzaktaki nesnelerin birbirlerinden daha hızlı uzaklaşıyor gibi görünmesi, o zamanlar evrenin çok daha küçük olduğunu gösterir.

Erken evrende oluşan kütle kümeleri çökmeye ve daha yoğun bölgeler oluşturmaya başladı, böylece evrenin başlangıcından birkaç yüz milyon yıl sonra, Güneşimizden yaklaşık bir milyar kat daha büyük, ancak günümüzdeki gökadalardan daha küçük olan ilk ön-gökadalar oluşmaya başladı. Bundan sonraki birkaç milyar yıl içinde bu yapılar, bugün evrende aşina olduğumuz milyarlarca gökadada birleşmeye başlayacaktı.

Gökadaların oluştuğu dönemde önemli bir şey gerçekleşmekteydi. Bir o yanda bir bu yanda kütleçekimsel çekim altında gaz cepleri çöküyordu. Bu materyal topları içinde bir savaş gerçekleşiyordu. Kütleçekim kuvveti materyali içeri çekerken gaz basıncı dışarı doğru ittiriyordu. Kütle, kütleçekim basıncının dışarı doğru iten gaz basıncını aşmasına izin veren kritik bir değeri aştığında, materyal bir yıldızın içine çöktü. Bu kritik kütle değerine, bu koşulları hesaplayan astrofizikçi James Jeans'e (1877-1946) ithafen **Jeans kütlesi** denir. İlgilenmeniz gereken tek materyal erken hidrojen ve helyum olduğunda ve sıcaklıklar bugünden çok daha yüksek olduğunda Jeans kütlesinin çok büyük olması gerekir. En eski yıldızlar muhtemelen Güneşimizden birkaç on ila birkaç yüz kat daha büyük bir kütleye sahipti. Bu yıldızlar o kadar büyük ve o kadar sıcaktı ki, atomlardan elektronları ve iyonlaşmış maddeyi evrenin en erken evrelerinde olduğu plazma haline getiren morötesi radyasyon da dâhil olmak üzere muazzam miktarlarda radyasyon ürettiler. Bu nedenle evrenin bu dönemine 'yeniden-iyonizasyon' denir. Ancak evren, bu aşamadaki iyonize materyalin düşük yoğunluğu nedeniyle fotonlara karşı şeffaftı.

Bu erken yıldızlara, bizi alıkoyması gerekmeyen tarihsel nedenlerle **Popülasyon III yıldızları** denir, ancak bunlar evrenin ilk gökadalarının ilk yıldızlarını oluştururlar. Fakat, bu noktaya kadar evren kendi kimyası içinde sınırlıydı. Karbon, nitrojen, fosfor, oksijen, demir ve canlı sistemlerde kullanılan çok sayıda ağır element gibi elementlerin hiçbiri mevcut değildi. Bu yaşam için uygun bir evren değildi. Bu, astrobiyoloji öncesi bir evrendi. Bununla birlikte, erken evrende üretilen madde, yaşamın hammaddesini üretecek olan sonraki nesil yıldızların oluşmasına izin verecekti. İlerleyen bölümlerde bu unsurların nereden geldiğini anlamaya başlayacağız.

Bunu yapmak üzere, farklı yıldız türlerinin özelliklerine bakmak için bugüne hızlı bir şekilde ilerleyeceğiz.

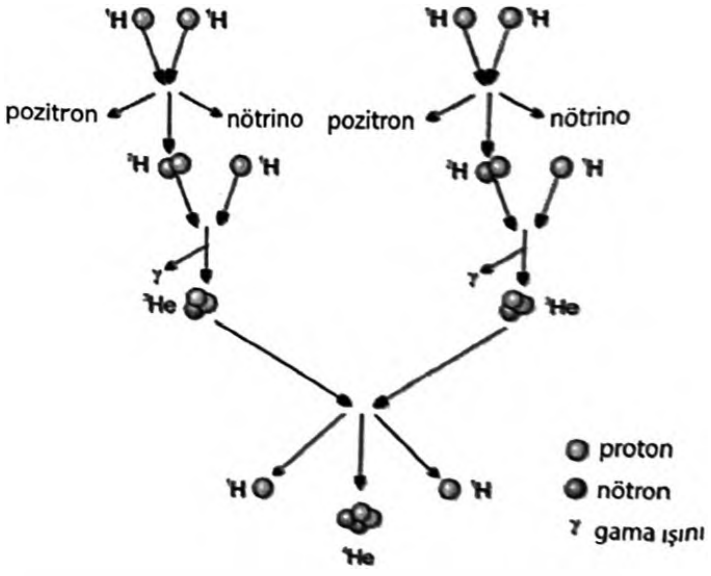
8.2 Küçük Kütleli Yıldızlar

Öncelikle küçük kütleli yıldızları inceliyoruz. Kendi Güneşimiz böyle bir yıldız. Küçük kütleli yıldızlar genel olarak Güneşimizin yaklaşık 2,5 katı veya daha az kütleye sahip yıldızlar olarak tanımlanabilir. Yüzey sıcaklıkları yaklaşık 8500

K'nin altında ve Güneşin parlaklığından da 20 kat veya daha az bir parlaklığa sahiptirler. Önceki bölümde tartışılan en eski yıldızlarda olduğu gibi, Güneşin oluşumu yerel bir gaz bulutunun çöküşüyle dışarıya doğru itilen gaz basıncı arasındaki bir değişmeden kaynaklanmıştır.

Güneşin ürettiği enerji nereden geliyor? Güneşin sadece kütleçekim enerjisinden elde edebileceği enerjiyi hesaplarsak, bu enerjinin Güneşin bu zamana kadar (4,56 milyar yıl) yanmasını sağlamak için neredeyse yeterli olmadığını görürüz. Bunun yerine Güneşin enerjisi, kütlesinin bir kısmının **nükleer füzyon** reaksiyonlarında enerjiye dönüştürülmesinden gelir. Nükleer füzyon, daha küçük kütleli elementlerin daha büyük elementler yapmak için bir araya getirildiği ve bu süreçte enerjiyi serbest bıraktığı süreçtir. Bu süreç, uranyum gibi büyük bir kararsız bir elementin, enerji salınımıyla daha küçük ve daha kararlı elementlere ayrıldığı **nükleer fisyondan** farklıdır. Nükleer santrallerimiz fisyona bağımlıdır, ancak yıldızlar içinde enerji üreten süreç nükleer füzyondur.

Küçük kütleli yıldızların çekirdeğindeki temel nükleer füzyon işlemi **proton-proton** zinciridir (Şekil 8.4). Dört hidrojen çekirdeği (dört proton), birkaç adımda bir helyum çekirdeği (iki proton ve iki nötron) oluşturmak üzere birleşir. İlk olarak, iki hidrojen çekirdeği döteryum oluşturmak üzere kaynaşır, bir **pozitron** (pozitif yüklü bir elektron) ve küçük kütleli bir atom altı parçacık olan bir **nötrino** oluşur. Döteryum, bir gama ışını vererek helyum-3 oluşturmak için başka bir protonla kaynaşmaya devam eder. Daha sonra iki helyum-3 çekirdeği iki proton salarak helyum-4 oluşturmak üzere kaynaşabilir. Tüm bu süreçte enerji gama ışınları, nötrinolar ve pozitronlar şeklinde açığa çıkar, sonra elektronlarla çarpışır ve fotonları üretmek için birbirlerini yok ederler. Helyum çekirdeği başına üretilen enerji 4×10^{-12} J'dür, ancak elbette bu küçük miktar, meydana gelen çok sayıda bu reaksiyon tarafından dengelenir. Güneşimiz gibi bir yıldızda, proton-proton reaksiyonu saniyede yaklaşık 10^{38} kez meydana gelir.



Şekil 8.4 Küçük kütleli yıldızların çekirdeklerindeki proton-proton zincirini gösteren şematik (Kaynak: Charles Cockell).

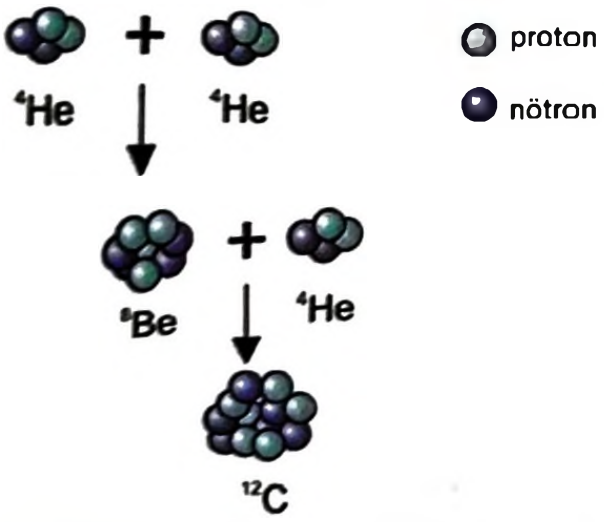
Bu süreçte salınan enerjinin, yol boyunca meydana gelen birçok etkileşim nedeniyle çekirdekten yıldızın yüzeyine ulaşması yaklaşık 100.000 yıldan fazla sürer. Bu süreçteki etkileşimler, yıldızın kütleçekim basıncı altında çökmesini önleyen gaz basıncına katkıda bulunurlar. Yıldızın boyutu bir geri bildirim süreciyle dengede tutulur. Çekirdek kasılırsa

ısınır. Daha fazla füzyon reaksiyonu gaz basıncını arttırır ve yıldızı genleşmeye zorlar. Bir çekirdek genleşmesi soğumaya neden olur ve füzyon reaksiyonlarının etkinliğini azaltır, dışarıya doğru itilen gaz basıncını düşürür ve çekirdeğin çökmesine izin verir.

Sonunda çekirdek içindeki hidrojen, hepsi helyuma dönüştüğü için tükenir ve helyum çekirdeğinin oluşumuyla sonuçlanır. Kendi Güneşimiz için bu, yaklaşık beş milyar yıl içinde gerçekleşecek. Yakıt bittikten sonra, çekirdekteki füzyon durur. Böylece gaz basıncı azalır ve yıldız çökmeye başlar. Çöküş maddenin büzülmesine neden olacak ve bu aşamada çekirdek çöküşü duracaktır. Bununla birlikte, bu çöküş helyum çekirdeği etrafındaki hidrojenin füzyonu başlatabileceği noktaya doğru sıkışmasına neden olur. Füzyon, çekirdeği içermediğinden, materyalin genişlemesine ve yıldız balonlarının dışarıya doğru çıkmasına neden olarak, 'normal' yarıçapından yaklaşık yüz kat daha büyük bir yarıçapa sahip olur. Böylece Kırmızı dev safhasına giriş yapar. İnert helyum çekirdeği ve hidrojeni yakan bir kabuk içeren bu dev yıldız türlerine, kısa bir süre içinde tartışacağımız Hertzsprung-Russell diyagramında bulundukları bölgeye referans olarak, Kırmızı Dev Kol (RGB*) yıldızları denir.

Çekirdeğin etrafında oluşan hidrojen füzyonu, çekirdeğin içindeki helyuma eklenen daha fazla helyum üretir. Sonunda yaklaşık bir milyar yıl sonra çekirdeğin sıcaklığı, helyumun kendi kendine kaynaşmasının mümkün olduğu bir noktaya yükseldi.

Çekirdeğin sıcaklığı 100–200 milyon K'a yükselir ve bu sıcaklıkta şimdi üç helyum çekirdeğinin karbon oluşturması ve enerji salması için birbirine kaynaşması mümkündür. Helyum çekirdeği alfa parçacığı olarak da adlandırıldığı için bu reaksiyona üçlü alfa reaksiyonu da denir (Şekil 8.5). Bu reaksiyon, bir berilyum-8 çekirdeği oluşturmak üzere kaynaştırılan iki helyum çekirdeği üzerinden ilerler ve daha sonra berilyum-8 karbon-12 üretmek için bir helyum çekirdeğiyle kaynaşır.



Şekil 8.5 Karbon üreten üçlü alfa reaksiyonu (Kaynak: Charles Cockell).

Üç alfa parçacığının eşzamanlı çarpışmasıyla ortaya çıkan üçlü alfa reaksiyonunun gerçekleşme olasılığı son derece düşüktür. Bununla birlikte berilyum-8, neredeyse tam olarak iki alfa parçacığının enerjisine sahiptir ve bu etkileşimi tercih eder. Berilyumun başka bir alfa parçacığıyla birleştiği ikinci adımda, reaksiyon neredeyse ta-

* [İng.] Red Giant Branch –çn.

mamen enerjik olarak uyarılmış durumdaki bir karbonun enerjisine sahiptir. Bu rezonans, bir alfa parçacığının karbon oluşturmak için berilyum-8'le birleşme olasılığını arttırır. Bu rezonansın varlığı gözlemlenmeden önce, gökbilimci Fred Hoyle (1915–2001) tarafından tahmin edilmiştir.

İlginç bir şekilde, bu reaksiyonların meydana gelme olasılığını artıran rezonans etkisi, Fred Hoyle tarafından var olmaları gerektiği temeline dayanarak tahmin edildi, çünkü eğer bu etki olmasaydı ağır elementler ortaya çıkmayacağından bizler var olamazdık. Evrenin belirli fiziksel özelliklerinin ve sabitlerinin belirli değerlere sahip olması gerektiği, aksi takdirde onları gözlemlemek için etrafta olamayacağımız fikri, insancıl ilke olarak bilinir. Üçlü alfa reaksiyonu, insancıl prensibin, eğer mevcut değilse o zaman var olamayacağımız fiziksel bir süreci öngörmek için başvurduğu ilk örneklerden biri olabilir.

Üçlü alfa reaksiyonuyla ilgili bir başka önemli nokta, astrobiyolojik açıdan hidrojenden daha önemli bir elementi –karbonu– üretmesidir. Reaksiyon, evrendeki karbonun çoğunun kaynağıdır.

Yıldızımıza geri dönelim. Çekirdekte meydana gelen helyum füzyonu, enerjinin yıldızda kaçak füzyona neden olacak kadar biriktiği bir duruma ulaşır. Birkaç saniye boyunca yıldızın normal enerji üretiminin yaklaşık 100 milyar katına ulaşır. Kaçak füzyon sonunda yıldızdaki helyumun yaklaşık %60–80'ini tüketen bir çekirdek helyum parlamasına neden olur. Bu süreç çekirdekte gerçekleşir ve yıldız bozulmadan kalır. Bu nedenle yıldızın dışından doğrudan gözlemlenemez.

Yıldızın hayatının bir sonraki aşamasına, bir karbon çekirdeği ve onun etrafında daha fazla karbon üretmek için füzyon geçiren bir helyum tabakasıyla başlıyoruz. Bu helyum tabakasının kendisi, helyum üretmek için füzyona tabi tutulan bir hidrojen tabakasıyla kaplıdır. Bu çift katmanlı pasta, 'çift kabuk yanması' geçiriyor. Yıldızın dış katmanları, kırmızı dev evresinden daha da büyük yarıçaplara kadar genişler. Çift kabuk yakma aşaması sadece birkaç milyon yıl sürer. Bu yıldız şimdi Asimptotik Dev Dal (AGB*) yıldızı haline geldi. Onu kırmızı bir devden ayıran şey, bir karbon çekirdeğinin ve çift kabuk yanmasının varlığıdır.

Küçük kütleli yıldızlar, karbon çekirdeğinin daha da büzülmesine ve yaklaşık 600 milyon K sıcaklık gerektiren karbon yakımına neden olacak kadar yeterli kütleye sahip değildir. Bu, onlar için yolun sonu. Bu aşamada yıldızdaki dış gaz katmanları bir dizi termal darbeyle uzaya atılır. Yıldızdan yayılan radyasyon bu katmanları iyonize ederek parlak bir şekilde parlamalarına neden olur. Yayılan gaz kabuklarına gezegenimsi bulutsu denir, ancak bu tarihsel açıdan yanlış bir adlandırmadır, çünkü gezegenlerle ilişkili değildirler. Bu adlandırmanın tarihi, bu tür nesnelerin gezegenlere benzediğini düşünen ve onlara bu ismi veren William Herschel'e kadar uzanır.

* [İng.] Asymptotic Giant Branch –çn.

Bu arada, geriye kalan yıldızda helyum füzyonu azalmaya başlar. Yıldız, elektron dejenere madde tarafından tutulan bir beyaz cüce yıldız haline gelir (Bölüm 2). Bazı yıldızlarda iç kısımdaki karbon, yıldızın yüzeyine konvektif olarak çevrilir ve bir karbon yıldızı oluşturur. Beyaz cüce olarak sonlanmak, evrendeki yıldızların çoğunun kaderidir.

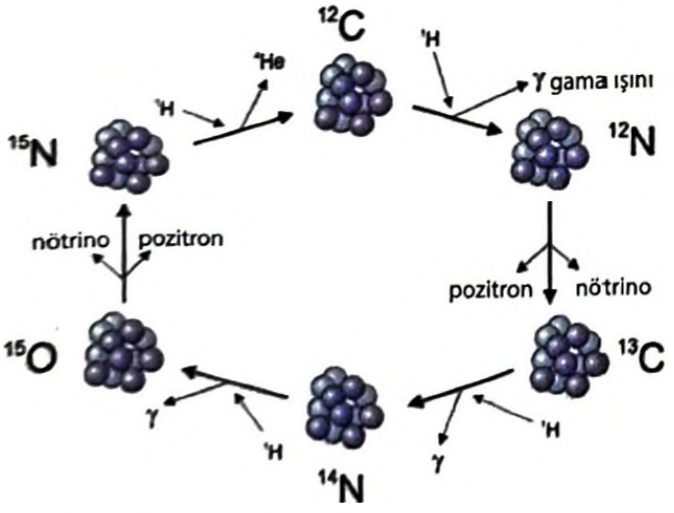
Teorik olarak ve evrenin başka yerlerinde yaşamlarının farklı aşamalarındaki küçük kütleli yıldızların gözlemlenmesiyle tespit edilen bu uzun vadeli gelecek, bize Dünyanın kaderi hakkında biraz kesinlik sağlıyor. Yaklaşık beş milyar yıl içinde, Güneş kırmızı bir deve dönüştükçe, Dünyanın atmosferi yok olacak ve Güneş genişledikçe Dünyanın yörüngesi iyi genişleyebilse de, bu noktada gezegenimiz bir atmosfersiz bir kaya topuna dönüşecek. Ancak, daha sonra göreceğimiz gibi (Bölüm 16), Dünya bu aşamadan çok önce yaşanmaz hale gelecektir.

8.3 Büyük Kütleli Yıldızlar

Yıldız tiplerinin tayfının diğer ucunda büyük kütleli yıldızlar vardır. Bu yıldızların kütlesi Güneşinkinden sekiz kat veya daha fazladır. Daha büyük kütlelerinin sonucu, çekirdeklerinin çok daha fazla yoğunluğa büzülmesi ve daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasıdır; böylece füzyon reaksiyonlarının karbon üretiminin ötesinde gerçekleşmesine izin verir.

Büyük kütleli yıldızlarda, hidrojenin helyuma dönüşmesine, CNO döngüsü olarak adlandırılan daha karmaşık bir döngü baskın gelir (Şekil 8.6).

CNO döngüsünde karbon, helyum (alfa parçacıkları) üretimi için bir katalizör görevi görür. Bir hidrojen çekirdeği (proton), azot-12 üretmek için karbon-12'yle kaynaşır (bir gama ışını yayınımıyla) ve daha sonra bir pozitron ve bir nötrino üreten karbon-13'e bozunur. Bu şekilde üretilen karbon-13, bir gama ışınıyla nitrojen-14 oluşturmak için bir başka proton daha alır. Bu azot-14, bir gama ışını yayınımıyla oksijen-15 oluşturmak için bir sonraki (üçüncü) protonu alır ve bu oksijen bir pozitron ve bir nötrino üretimiyle azot-15'e bozunur. Son olarak, bu azot-15 dördüncü protonla bir helyum çekirdeğinin salınmasıyla birleşir ve tekrar döngüye başlayabilen karbon-12 üretir. Genel etki –dört hidrojen çekirdeğinin (protonların) bir



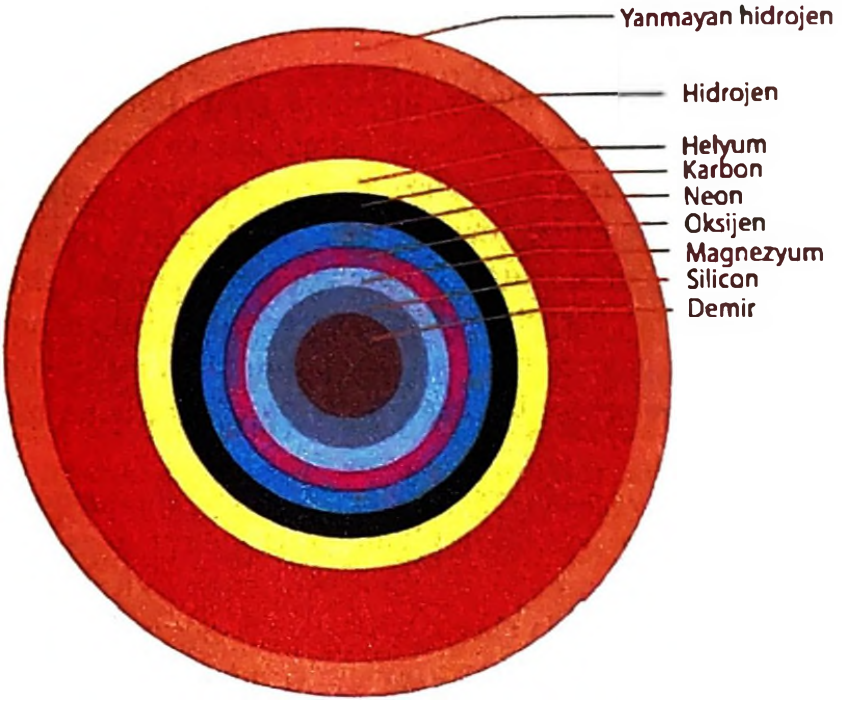
Şekil 8.6 Büyük (ve orta) kütleli yıldızlarda CNO döngüsünün şeması. Diyagramdaki atomik yapılar sadece açıklayıcıdır (Kaynak: Charles Cockell).

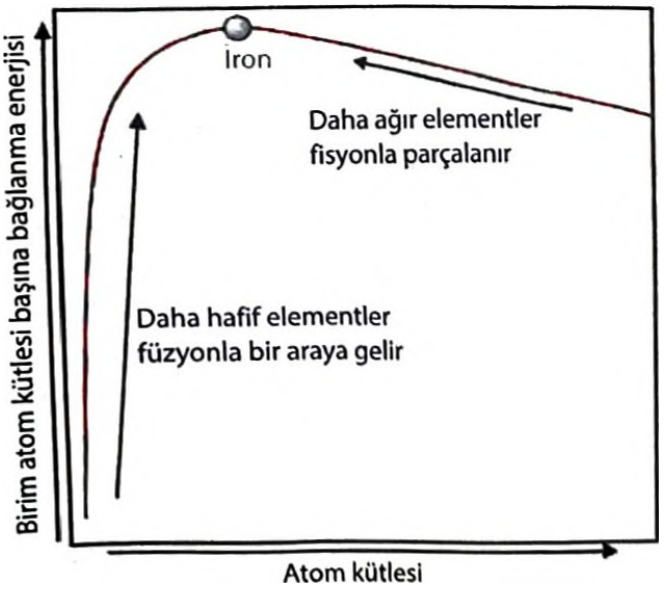
helyum çekirdeği oluşturmak üzere kaynaştırılması– küçük kütleli yıldızlardaki proton-proton reaksiyonuyla aynıdır.

Büyük kütleli yıldızların içindeki füzyon oranı, elde edilen yüksek sıcaklıklar nedeniyle, küçük kütleli yıldızlara kıyasla kısa ömürlü oldukları anlamına gelir.

Küçük kütleli yıldızlar gibi, büyük kütleli bir yıldızın iç kısmı, bir helyum tabakası ve bir hidrojen tabakasıyla çevrili bir iç karbon çekirdeğe sahip olduğu bir duruma gelir.

Büyük kütleli yıldızın iç kısmı, sadece birkaç yüz yıl süren neon içine karbon füzyonu başlatmak için yeterli olan 600 milyon K'e ulaşır. Karbon bittiğinde, çekirdek kütleçekim basıncı altında küçülür ve merkezdeki sıcaklıklara





Şekil 8.7 Büyük kütleli bir yıldızın iç yapısı (üstte). Altında, demirden daha ağır veya daha hafif elementlerin, demir çekirdeği olduğunda birim atom kütlesi başına en yüksek bağlanma enerjisine, yani en kararlı elemente sahip demir olarak birleştiği prensibi gösteren bir şema gösterilmektedir. (Kaynak: Charles Cockell).

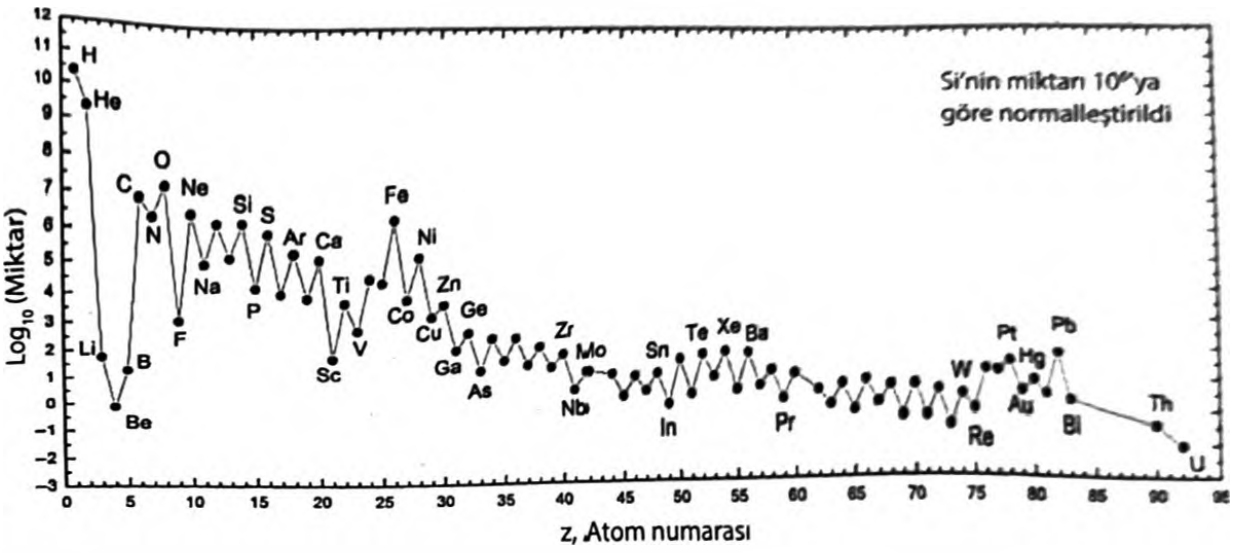
ulaşarak neonun kaynaşmasına ve magnezyum ve oksijen üretmesine izin verir. Neon füzyonu durur, ancak yine çekirdek çökmesine ve oksijen füzyonunu tetikleyerek silikon üretir. Her ardışık adım daha kısa bir zaman alır, böylece silikon füzyonu yaklaşık bir gün içinde sona erer. Silikonla nihai füzyon reaksiyonları demir oluşumuna neden olur. Şimdi enine kesitinde biraz soğan gibi görünen bir yıldızımız var (Şekil 8.7). Bu sıralı elementlerin oluşmasının en yaygın yolu helyum çekirdeklerinin füzyonudur, ancak ağır elementler yeterli sıcaklıklarda doğrudan kaynaşabilir.

Demir, en kararlı element olduğu için son üründür (nükleer parçacık başına en yüksek bağlanma enerjisine sahiptir). Demirden daha ağır olan elementler parçalanarak, demirden daha hafif olan elementler ise birleşerek demiri oluşturur (Şekil 8.7). Yıldızın çekirdeği demirden oluştuğunda, yıldız ölüme mahkumdur.

Bu aşamada kritik ve dramatik bir dönüşüm meydana gelir. Demir artık kaynaşmıyor. Kütleçekim basıncına karşı gelmek için yeterli gaz ve radyasyon basıncı yoktur. Kütleçekim, elektronların nötronları oluşturmak için protonlarla kaynaşmaya itilmesine yetecek kadar büyük hale gelir, böylece nötron dejenere madde üretilir (Bölüm 2). Yıldız, sadece birkaç kilometre çapında bir nötron yıldızı oluşturmak için çöker. Bu felaket meydana geldikçe, süpernova patlamasında yıldızın dış katmanlarını havaya uçuran muazzam miktarda enerji açığa çıkar. Nötron yıldızı yeterince büyükse, daha da çökebilir ve bir kara delik halini gelebilir.

Şimdiye kadar bir sorun fark etmiş olabilirsiniz. Eğer yıldız nükleosentezi sadece demire kadar gidebiliyorsa, periyodik tablonun geri kalanı nereden geliyor? Diğer elementlerin çoğu, yıldızın çöküşüyle ilişkili yoğun süpernova patlamasında üretilir. Bu olay sırasında demir, nötronlarla çok yoğun bir şekilde bombalanır. Bu nötronların, genç nötron yıldızından gelen yoğun bir nötron rüzgârından elde edildiği düşünülmektedir. Çekirdeğe tek bir nötron eklendiğinde bir proton ve bir elektrona bozunabilir. Elektron kaybolur (beta bozunması) ve ek proton içeren bir çekirdek oluşumuyla sonuçlanır. Bununla birlikte, nötronların hızlı bombardımanı, daha fazla sayıda hem nötron hem de protona sahip elementlerin oluşturulmasına izin verir. Bu işleme hızlı nötron yakalama süreci (veya r-süreci) denir, burada nötronlu demir gibi kaynak çekirdeklerinin hızlı bombardımanı, daha ağır elementlerin oluşmasına izin verir. AGB yıldızları ile benzer yıldızlarda meydana gelen ve önceden var olan ağır çekirdeklere ihtiyaç duyan alternatif bir süreç, yavaş nötron yakalama (veya *s-süreci*), vardır. Burada, bir çekirdekte hızlı bir nötron birikimi yerine, çekirdekler yavaşça yıldızın iç kısmında birer birer birikir ve daha ağır elementler oluşturur.

Bu süreçlerin kanıtı Periyodik Tablodaki elementlerin kozmik miktarlarında bulunur (Şekil 8.8).



Şekil 8.8 Farklı elementlerin kozmik miktarı. Elementlerin miktarı, 10^6 değerine normalleştirilen Si'ye göre gösterilmiştir.

Hidrojen ve helyum, ilkel bolluklarından beklediğimiz gibi en çok miktarda bulunur. Atom kütlesi dörde bölünebilen elementler bol miktarda bulunur; bu, helyum çekirdeklerinin (iki protonu ve iki nötronuyla) büyük kütleli yıldızlarda sırayla daha ağır elementlerle kaynaştırıldığı füzyon reaksiyonlarında karbondan demire kadar elementlerin üretildiğini tahmin edeceğimiz şeydir (C, O, Ne, Si). Gözlemlendiği gibi, süpernova patlamalarında art arda daha fazla nötron bombardımanı gerektirdiklerinden giderek daha ağır elementlerin daha az miktarda olacağını umuyoruz. Ayrıca, proton ve nötron sayısı çift olan elementlerin, tek sayıya sahip olanlardan daha fazla miktarda olduğunu fark edeceksiniz. Bu, nükleer yapının ve çekirdeklerin çift sayılı nötronlar ve protonlarla göreceli kararlılığının bir fonksiyonudur. Son olarak, demir miktarının yüksek olduğu gözlenir, bu da büyük kütleli yıldızlarda nükleosentezdeki son element olma rolüyle tutarlıdır.

Bu bölümü tamamlamadan önce, kendi Güneşimizin kütlesinin yaklaşık 2,5 ile 8 katı arasında kütleye sahip ara yıldızları unutmamalıyız. Bu yıldızlarda füzyon CNO döngüsü tarafından gerçekleşir, ancak daha ağır elementler üretmezler. Evrimleri küçük kütleli yıldızlara benzer bir yol izler.

8.4 Yaşam Elementleri

Bu geçmiş bölümler, yıldızların evrimi hakkında biraz fikir sahibi olmamızı sağlamasının yanı sıra, yaşamı inşa etmek için gerekli unsurların nereden geldiğini de açıklıyor. Şimdi bu hikayeyi astrobiyolojik bir perspektiften inceleyelim. Hidrojen ve helyum evrendeki en yaygın ve ilk oluşan elementlerdir. Helyumun yaşamla çok az ilgisi vardır, ancak karbon bazlı bileşiklerde temel bir element olmasının yanı sıra hidrojen de büyüme için bir elektron vericisi olarak kullanılabilir (Bölüm 5). Tabii ki, bu elektron vericisinin bol miktarda bulunması, evrenin

ilk çağında astrobiyolojik olarak alakasızdı çünkü yaşam o anda var olamazdı. Küçük ve büyük kütleli yıldızların çekirdeklerinde, karbon elementi, yaşamın (en azından Dünyada bildiğimiz yaşamın gerektirdiği milyonlarca organik bileşik dizisinin inşası için anahtar 'omurga elementini sağlayan nükleer füzyondan oluşmuştur. Büyük kütleli yıldızların çekirdeklerinde, yaşam için önem arz eden diğer dört element olan nitrojen, oksijen, fosfor ve kükürt dâhil olmak üzere demire kadar olan elementler oluştu. Böylece, ilk büyük kütleli yıldızlar ortaya çıkıp patladığında, yaşam için gerekli olan CHNOPS elementleri evrene saçılmış durumdaydı. Bu yıldızlar ayrıca, enzimlerde ve eser elementler (demir ve magnezyum dâhil) olarak yaygın olarak kullanılan elementleri üretti ve süpernovalarında, çinko, kobalt ve enzim kofaktörleri olarak ve diğer biyolojik rollerde kullanılan diğer birçok eser element dâhil olmak üzere daha ağır elementler üretildi. Bu elementlerin çoğu ve oluşturdukları bileşikler, demirin farklı oksidasyon durumları gibi yaşamdaki enerji üretiminde elektron vericileri ve alıcıları olarak kullanılabilir. Böylece, yüksek kütleli yıldızlardan gelen elementlerin varlığı, redoks çiftlerinin ortaya çıkması için gerekli materyalleri üretti.

Gökbilimciler genellikle hidrojen ve helyum dışındaki herhangi bir unsuru 'metaller' olarak adlandırırlar, bu da kelimenin normal kullanımı göz önüne alındığında oldukça kafa karıştırıcıdır. Bununla birlikte, adlandırma genellikle hatırlanmaya değerdir, çünkü gökbilimciler düşük metalikliğe sahip nesnelerden bahsettiklerinde, helyumun ötesinde düşük konsantrasyonlu elementlere sahip nesneleri kastediyorlar –yaşam için bariz sonuçlarıyla birlikte.Yüksek metaliklik, helyumdan daha ağır elementlerin bolluğu anlamına gelir ve sonuç olarak, yüksek metalik gezegen oluşturan bölgeler, elementlerin mutlak bolluğuna bağlı olarak yaşam için genellikle düşük metaliklerden daha iyidir.

Klişe olma derecesinde bir sıklıkla, hepimizin 'yıldız tozu' olduğu söylenir. Bunun doğru olduğunu görebiliriz. Ayrıca birkaç kuşak yıldızın ard arda daha ağır elementlerin oluşumuna yol açabileceğini görebiliriz. Örneğin, kendi Güneşimizde demir ve daha ağır eser elementlerin varlığı, küçük kütleli bir yıldız olduğu için Güneş içerisinde gerçekleşen füzyonla açıklanamaz. Bu elementler Güneş ilk oluştuğunda orada olmalıydı. Güneşin en azından üçüncü nesil bir yıldız olduğu düşünülmektedir (Evrendeki ilk yıldızların, Popülasyon III yıldızlarının ve daha yakın tarihli, bazıları hala evrende bulunan, ağır metal açısından zayıf Popülasyon II yıldızlarının aksine, Popülasyon I yıldızı olarak adlandırılan bir yıldız). Güneş ve gezegenlerin oluşturduğu ön gezegensel disk, önceki yıldızlardan ve nihayetinde Dünyada yaşamın ortaya çıktığı süpernova kalıntılarından kalma ağır elementler içeriyordu.

8.5 Hertzsprung–Russell Diyagramı

Şimdiye kadar bazı farklı yıldız türlerine değindik. Hertzsprung–Russell diyagramını kullanarak yıldızları sistematik olarak karakterize edebiliriz. Diyag-

ram, yıldız parlaklığı ile spektral türü (esasen sıcaklığı veya rengi) arasındaki ilişkiyi gösteren yıldızların dağılım grafiğidir. Sıcaklık, *x* ekseni boyunca geleneksel olmayan bir şekilde yüksekten düşüğe doğru ilerler.

Astronomik bir nesnenin parlaklığı, birim zamanda yayılan toplam enerji miktarıdır (bir yıldızın gücü).

Parlaklık (*L*), Stefan–Boltzmann yasası olarak bilinen eşitlik aracılığıyla bir yıldızın sıcaklığıyla (*T*) ilişkilidir:

$$L = \sigma 4\pi R^2 T^4 \qquad (8.1)$$

burada *R* yıldızın yarıçapı ve σ Stefan–Boltzmann sabitidir. Bu sabit, *k*'nin Boltzmann sabiti, *c*'nin boşluktaki ışığın hızı ve *h*'nin Planck sabiti olduğu diğer sabitlerin bir karışımıdır:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} = 5.670.400 \times 10^{-8} \mathrm{Js^{-8}m^{-2}K^{-4}}$$

Buradan yola çıkarak, bir yıldız türü için bir sıcaklık (*x* ekseni) ve parlaklık (*y* ekseni) verildiğinde, Hertzsprung–Russell diyagramı da bize yıldızın yarıçapını verir.

Tesis Odağı: Uzay Teleskopları ve Gözlemevleri

Dünyanın atmosferi, evreni gözlemlemek isteyen astronomlar ve astrobiyologlar için her türlü soruna neden olur. X-ışınları gibi bazı dalga boyları atmosfer tarafından emilir ve ışığın nüfuz ettiği tayf bölgelerinde, atmosferik etkilerin neden olduğu ışık kirliliğine veya 'parıldamaya' maruz kalır. Parıltı, atmosferik karışıklıkların etkilerini bölen uyarlanabilir optiklerle giderilebilir. Bununla birlikte, bu farklı sınırlamalardan bazıları, teleskopları uzaya fırlatarak aşılabilir. Uzay araştırmalarının başlangıcından bu yana, tüm elektromanyetik tayfı incelemek için uzaya bir dizi teleskop fırlatıldı. Süpernova, nötron yıldızları ve diğer cisimlerde üretilen gama ışınlarını gözlemlemek için 2008 yılında faaliyete geçen Fermi Gama Işını Uzay Teleskobu gibi gama ışını gözlemevleri kullanılmıştır. Şiddetli astronomik olaylar sırasında üretilen X-ışınları, 1999'dan beri Dünya yörüngesinde çalışan Chandra X-ray Gözlemevi gibi platformlar kullanılarak incelenmiştir. Morötesi radyasyonu (yaklaşık 290 nm'den kısa dalga boyları), atmosfer tarafından emilen gama ışınları ve X-ışını gibi bir başka radyasyon türüdür. 2003'ten 2013'e kadar çalıştırılan Galaxy Evolution Explorer, yıldızlar ve gökadalar tarafından üretilen UV yayınımlarını incelemek için kullanılan bir teleskop örneğidir. Tayfın görünür bölgesine yolculuk eden en ikonik (ve ilk) uzay teleskobu, kozmosun çarpıcı görüntülerini veren Hubble Uzay Teleskobuydu. Gökadalar, yıldızlar ve diğer cisimler görünür ışığı yayar veya yansıtır, böylece bu teleskoplar bir dizi fenomeni gözlemlemek için kullanılabilir. Görünür bölgedeki ötegezegenlerin aranması, **geçiş yöntemini** kullanarak gezegenleri arayan Kepler Uzay Teleskobu (Şekil 8.9) gibi araçlar kullanılarak gerçekleştirildi. Kızıl-altının daha uzun dalga boylarına doğru ilerlerken, evrendeki kahverengi cüceler, yıldızlararası bulutlar, gezegenimsiler ve organik maddeler gibi daha soğuk cisimleri gözlemlemeye başlarız. 2009'da başlatılan



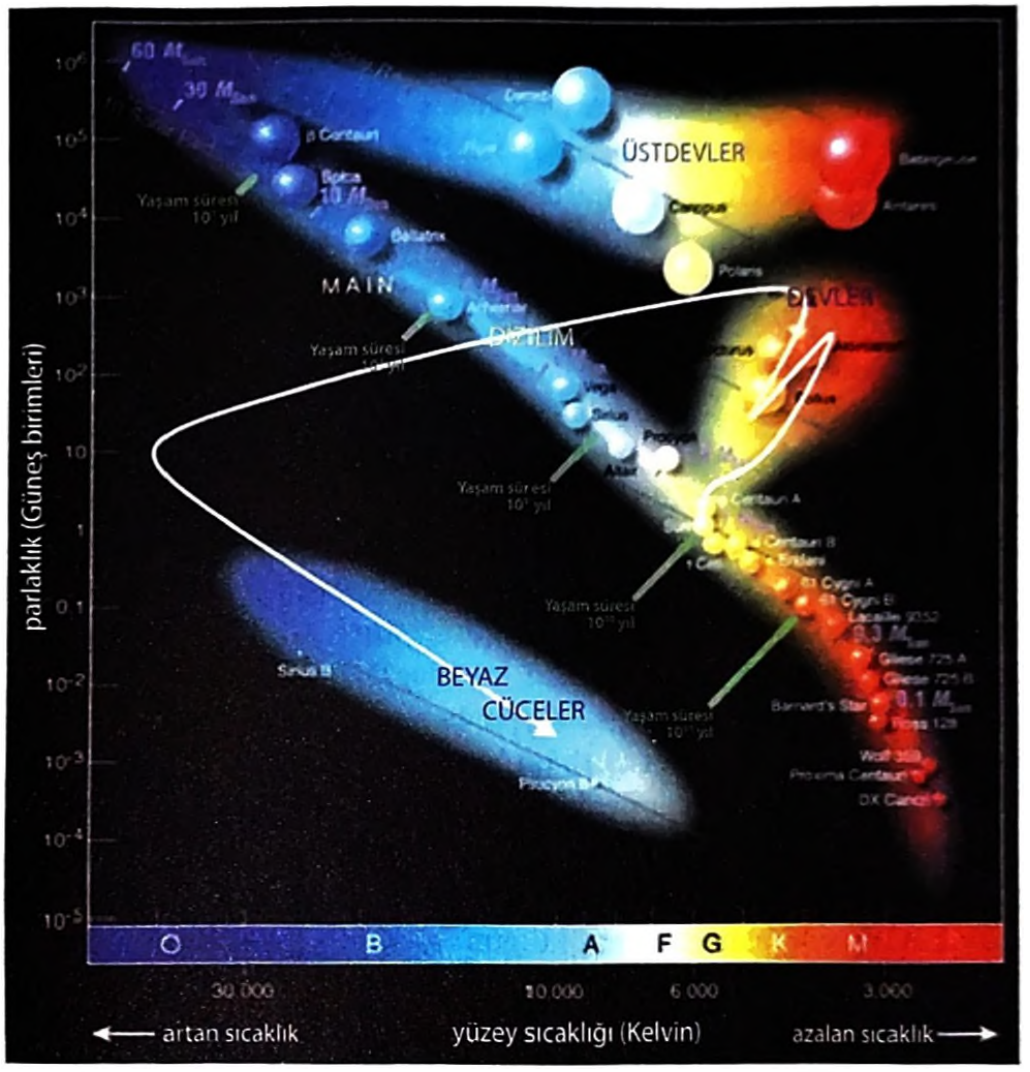
Şekil 8.9 Kepler Uzay Teleskobu. 1040 kg ağırlığındaki teleskop, 2009 yılında Cygnus, Lyra ve Draco takımyıldızları yönündeki Güneş dışı gezegenleri tespit etmek için uzaya fırlatıldı ve Güneş Sistemimiz ile galaktik merkezden yaklaşık aynı mesafedeki gezegenleri araştırdı. Teleskop, ilk kayalık karasal tipteki gezegenlerin tespiti de dâhil olmak üzere Güneş dışı gezegenler hakkında büyük miktarda veri üretti (Bölüm 19; Kaynak: NASA).

Geniş Alan Kızıl-altı Araştırma Gezgini (WISE[9]), Dünyaya yakın asteroitler ve kuyruklu yıldızlar da dâhil olmak üzere 150.000'den fazla yeni Güneş Sistemi cismi keşfetti. Tayfın daha uzun dalga boylarına tekrar devam ederek, kozmik arka plan radyasyonunun gözlemlenebileceği ve haritalanabileceği (Kozmik Arka Plan Gezgini gibi) mikrodalga bölgesine geçiyoruz. Daha uzun radyo menzilinde gökadalar ve süpernova kalıntıları hakkında gözlemler yapılabilir. Bu, Dünya Dışı Zekâ Arayışında (DDZA) kullanılan bölgedir. 2011 yılında başlatılan RadioAstron görevi, gökadamızın içindeki ve dışındaki radyo kaynaklarının yapısını haritalamak ve incelemek için tasarlandı. Yine de, 1992'de başlatılan ve Dünya etrafındaki radyasyon ortamını araştıran Güneş Anormal ve Manyetosferik Parçacık Gezgini (SAMPEX) gibi kozmik ışınları ve yüksek enerjili parçacıkları aramak için diğer gözlemevleri tasarlandı.

Hertzsprung–Russell diyagramları ayrıca H–R diyagramı kısaltmasıyla da anılır (Şekil 8.10). Diyagram, astrofizikçiler Ejnar Hertzsprung (1873–1967) ve Henry Norris Russell (1877–1957) tarafından tasarlandı ve yıldızların evriminin bir özeti veya 'yaşamlarının' bir haritası olarak düşünülebilir.

Yıldızların çoğu, ana dizi adı verilen çizgi boyunca diyagramda yer alır. Ana dizi, yıldızların çekirdeklerinde kararlı hidrojen füzyonu gerçekleştirdiği diyagram bölgesidir. Grafiğin farklı biçimleri olmasına rağmen, hepsi aynı genel formatı paylaşır: daha büyük parlaklığa sahip yıldızlar diyagramın üst kısmındadır ve daha yüksek yüzey sıcaklığına sahip yıldızlar diyagramın sol tarafındadır.

[9] [İng.] The Wide-field Infrared Survey Explorer –çn.



Şekil 8.10 Bir Hertzsprung–Russell diyagramı. Beyaz çizgi, Güneş için gelecekte yaklaşık bir yörünge gösterir (Kaynak: ESO).

H–R diyagramı aynı zamanda aşağıdaki genel ilişkiyle verilen, yıldızların kütle–parlaklık ilişkisini de yansıtır:

$$L_{yıldız} / L_{Güneş} = (M_{yıldız} / M_{Güneş})^a \qquad (8.2)$$

burada a, 1 ile 6 arasında bir değerdir ve ana dizi yıldızları için genellikle 3,5 olarak alınır. Diğer bir deyişle, küçük kütleli yıldızlar altta (düşük parlaklıkla) ve büyük kütleli yıldızlar yüksek parlaklıkla ana dizinin üst tarafında yer almaktadır. Hemen hemen tüm yıldızlar yaşamlarına aynı bileşimle (yaklaşık %98 hidrojen ve helyum) başlar, bu da bir yıldızın parlaklığının kütlesiyle belirlendiği anlamına gelir.

Yıldızlar ayrıca, diyagramın x ekseninde sıcak yıldızlardan soğuk yıldızlara uzanan bir **spektral** sınıfa göre sınıflandırılabilir. Güneşimiz bir G ana dizi yıldızıdır. Daha kısa ömürlü daha sıcak yıldızlar, F yıldızlarını içerir. M yıldızları daha uzun ömürlü, daha soğuk yıldızlardır. Yıldızlar dizisi tuhaf, tarihsel bir harf dizisiyle akılda tutulabilir: sıcaktan soğuğa doğru O, B, A, F, G, K, M. Eski

zamanlarda anımsatıcı olarak 'Oh Be A Fine Girl / Guy, Kiss Me' kullanılıyordu. Spektral türler, tayflarında görülen soğurma çizgilerine dayanır (ilkeleri Bölüm 2'de açıklanmıştır). Spektral türler, kabaca, sıcaklığı tanımlamanın başka bir yolu olarak kabul edilebilir. Spektral özellikler, sıcaklıkları hakkında farklı bir şekilde bilgi veren yıldızları sınıflandırmanın bir yoludur: belirli soğurma çizgileri, tayflarında yalnızca belirli bir sıcaklık aralığı için gözlemlenir çünkü yalnızca bu aralıkta, aktif soğurmayla ilgili atomik enerji seviyeleri vardır. Her spektral tür, daha küçük sayıların daha yüksek sıcaklıkları ifade ettiği, 0'dan 9'a kadar 10 banda bölünür. Güneşimiz bir G2V yıldızıdır. Roma rakamı 'V', basitçe, Güneşin ana dizide bulunduğunu belirtir.

H–R diyagramının modern versiyonları, spektral türü yıldızların renk indeksiyle değiştirir. Bu tip bir diyagram genellikle gözlemsel Hertzsprung–Russell diyagramı veya renk–büyüklük diyagramı (CMD*) olarak adlandırılır.

H–R diyagramı ayrıca yıldızların ana diziden ayrıldıklarındaki, örneğin yaşamlarının sonunda, hidrojen dışındaki elementleri kaynaştırmaya başladıklarında, konumlarını da gösterir. Şekil 8.10'da, Güneşimiz gibi küçük kütleli yıldızların özelliği olan devleri, genişleyip helyum füzyonu aşamasına geçtiklerinde görebilirsiniz. Denklem (8.1), bu boyut geçişinin neden gerçekleştiğini gösterir. Parlaklık, yıldızın karesinin yarıçapıyla ve sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle orantılıdır, bu nedenle parlaklık artar, ancak sıcaklık düşerse, yarıçap artmalıdır –ve bu artış oldukça çarpıcı bir şekilde gerçekleşir.

Küçük kütleli yıldızlar nihayet öldüğünde, düşük parlaklığa ve yüksek sıcaklığa (ve dolayısıyla küçük bir yarıçapa) sahip olan sol alt kısma doğru, beyaz cücelerin saflarına katılırlar. Bu nedenle, herhangi bir H–R diyagramında, bir yıldızın doğduğu anda yörüngesini gösteren bir çizgi çizebiliriz, yıldız ana diziye katılır ve sonunda ölürken, yıldızın kütlesine bağlı olarak kesin yörüngeyle diziden ayrılır. Güneş için böyle bir genel şematik yörünge Şekil 8.10'da gösterilmektedir.

Farklı türlerdeki yıldızların sayısı eşit olarak dağılmamıştır. G yıldızları evrendeki yıldızların yaklaşık %7'sini oluştururken, M yıldızları yaklaşık %75'ini oluşturur. Ayrıca, ve yaşanabilirlik açısından derin sonuçlarla, yıldızların farklı yaşam süreleri de vardır. Daha büyük kütleli sıcak yıldızlar, yıldızdaki kütleçekim kuvvetleri nedeniyle elde edilen daha yüksek sıcaklıklarla yakıtlarını daha verimli bir şekilde yakarlar. O yıldızların (tüm yıldızların yaklaşık %0,001'ini oluştururlar) bir milyon yıldan az yaşam süreleri vardır. G yıldızları, bizimki gibi, yaklaşık 10 milyar yıllık yaşam sürelerine sahiptir. Evrende en fazla miktarda bulunan M yıldızları, en uzun ömre sahiptir. Güneşin 0,1 katı kütleye sahip bir M yıldızı (yani, 0,1 Güneş kütlesi) 10 trilyon yıl boyunca yanabilir. Bu nedenle, evrende en çok bulunan yıldız aynı zamanda en uzun ömürlü olanlardır, bu da bu yıldızların yaşamı aramak için en iyi yerler olabileceğini

* [İng.] Colour–Magnitude Diagram –çn.

düşündürür, ancak daha sonra göreceğimiz gibi, M yıldızlarının yaşanabilirlik konusunda çok özel zorlukları vardır.

Bir yıldızın yaşam süresi ($t_{yıldız}$), kütlesiyle ($M_{yıldız}$) ilgilidir. Kendi Güneşimize kıyasla aşağıdaki yaklaşımla ifade edilebilir:

$$t_{yıldız} / t_{Güneş} \sim (M_{yıldız} / M_{Güneş})^{-2,5} \quad (8.3)$$

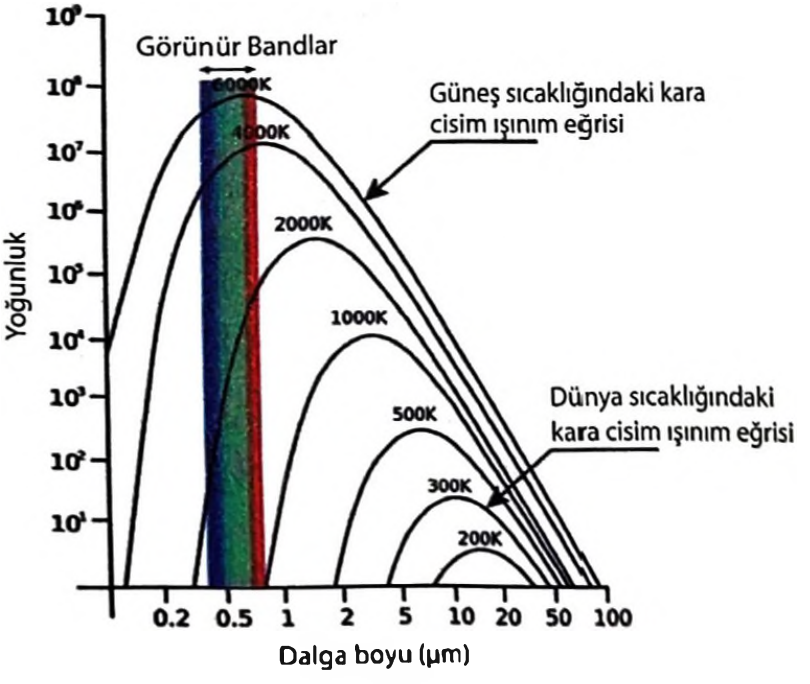
Yani Güneş kütlesinin on beşte biri kadar bir yıldızın (örneğin bir M yıldızı), Güneşten yaklaşık 650 kat daha uzun -bir trilyon yıldan fazla- bir ömrü olacak.

8.6 Güneş Bir Kara Cisimdir

Bu bölümün başlığı ilginç görünebilir. Kara cisim radyasyonu terimini, termodinamik açıdan dengede bir cisim tarafından veya daha basit bir ifadeyle, belirli bir sıcaklıktaki bir cisim tarafından yayılan elektromanyetik radyasyonu ifade etmek için kullanıyoruz. Bu radyasyonun dalga boylarını ölçersek, onun karakteristik bir eğri oluşturduğunu görürüz (Şekil 8.11), burada eğrinin tepe noktası cismin sıcaklığıyla ilgilidir. Aslında bu ilişki tam olarak Wien'in yer değiştirme yasası olarak ifade edilebilir. Birim dalga boyu başına parlaklık, tepe noktasının şu şekilde verildiği karakteristik bir eğri gösterir:

$$\lambda_{max} = b / T \quad (8.4)$$

burada b Wien'in yer değiştirme sabitidir, 2,898 x 10^{-3} K·m olarak alınır ve T kara cismin sıcaklığıdır.



Şekil 8.11 Farklı sıcaklıklarda bir cisim için kara cisim radyasyonu eğrileri (Kaynak: wikicommons Ant Beck).

Bu yasa aslında günlük deneyimlerimizle uyumludur. Çok sıcak metal beyaz / mavi olarak parlar ve soğudukça turuncuya ve ardından kırmızıya dönüşür, bu da tepe dalga boyunun soğudukça daha yüksek dalga boylarına kaymasının bir sonucudur. Tam olarak bu renk değişimi, sıcak F yıldızlarından (mavimsi) bizimki gibi G yıldızlarına (sarı) ve daha soğuk M yıldızlarına (kırmızı) giderken meydana gelir. Bu Şekil 8.10'daki x eksenini açıklamaktadır. Daha sıcaktan daha soğuğa geçerken, mavimsi olan spektral türdeki yıldızlardan daha kırmızı M yıldızlarına geçiyoruz. Herhangi bir nesne kara cisim radyasyonu yayabilir. Yüzeyi yaklaşık 300 K olan Dünya, kızıl-altı bir kara cisim yayınımına sahiptir (Şekil 8.11).

Herhangi bir dalga boyundaki yoğunluğu (birim dalga boyu başına birim alan başına güç (W m^{-2} μm^{-1}) olarak verilir) hesaplayabiliriz (resmi olarak spektral ışıma gücü veya ışıma yayımı olarak adlandırılır). Bu yoğunluk değerini hesaplamamıza izin veren denklem, Planck'ın kara cisim radyasyonu Yasasıdır:

$$M_{\lambda}(T) = 2\pi hc^2 / (\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)) \quad (8.5)$$

$M_{\lambda}(T)$, T sıcaklığındaki spektral ışıma gücü, h Planck sabiti, c boşluktaki ışığın hızı, k Boltzmann sabiti, λ elektromanyetik radyasyonun dalga boyu ve T mutlak sıcaklıktır. Bu hesaplamaların bir örneği Şekil 8.11'de gösterilmektedir.

Frekans dağılımı, dalga boyu ile frekans (ν) arasındaki ilişkinin şu şekilde verildiği hatırlanarak hesaplanabilir:

$$\nu = c/\lambda \quad (8.6)$$

Bir kara cismin gücünü de belirleyebiliriz (T sıcaklıkta yayılan, birim alan başına tüm dalga boylarında birim zaman başına enerji, A). Bu, daha önce yıldızlarla ilgili bir tartışmaya uygulanan Stefan–Boltzmann Yasasıyla verilmiştir (Denklem (8.1)):

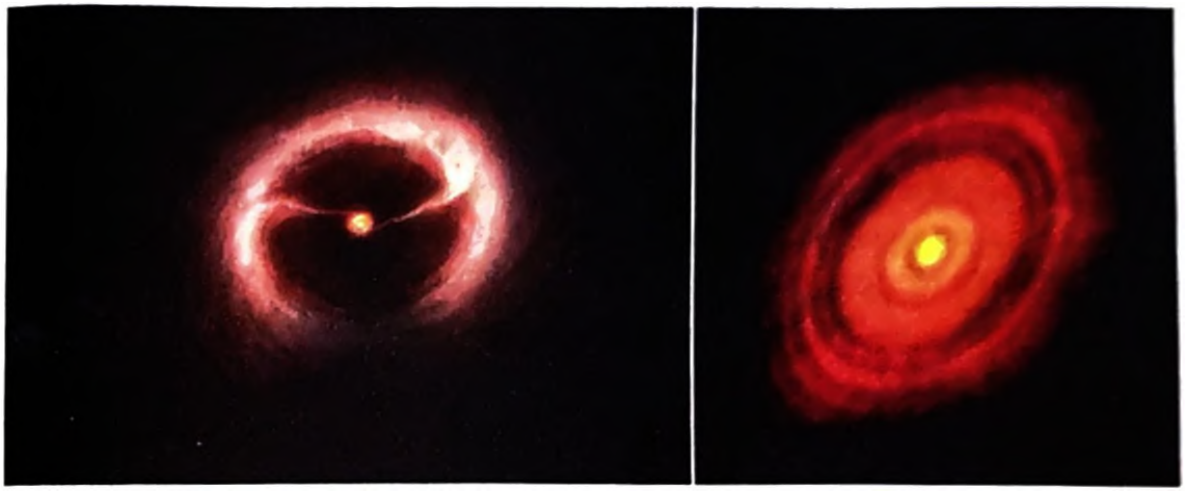
$$F/A = \sigma T^4 \quad (8.7)$$

burada F bir cismin gücüdür (yıldızlar için parlaklığa eşdeğer, L), A yüzey alanıdır (büyük bir gezegenimsi cisim veya yıldız için $4\pi r2$) ve σ Stefan–Boltzmann sabitidir.

Kara cisim eğrileri önemlidir çünkü bir yıldız tarafından ne kadar enerji yayıldığını ve dolayısıyla bir gezegen tarafından alınan enerjiyi hesaplamamıza izin verirler. Onları bir gezegenin sıcaklığının ne olmasını beklediğimizi hesaplamak için kullanabiliriz. 16. Bölümde yaşanabilirliği tartıştığımızda bunu daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz.

8.7 Gezegenlerin Oluşumu

Güneş Sistemi, 4,56 milyar yıl önce bir moleküler bulutta oluştu. Buluttaki karışıklıklar, kütleçekimin, gazın çökmesine neden olmak için yeterli olduğu yerel koşullar yarattı. Açısal momentumun korunumu yasası (açısal momen-



(a) (b)

Şekil 8.12 (a) Bir sanatçının, Lupus takımyıldızındaki genç bir yıldız olan HD 142527 etrafındaki ilk gezegensel disk hakkındaki izlenimi (HD, astronomik nesnelerin Henry–Draper kataloğuna atıfta bulunur [Kaynak: wikicommons, ALMA (ESO / NAOJ / NRAO) / M. Kornmesser (ESO) / Nick Risinger (skysurvey.org)]. *(b) Toros takımyıldızında Dünyadan bir milyon yıldan daha az ve 450 ışık yılı uzaklıkta olan HL Tau yıldızının çevresinde oluşan ilk gerçek gezegensel disk. Yarıçapı yaklaşık 2000 AB* (Kaynak: Alma).

tum, bir nesnenin başka bir nesnenin etrafında hareket ederken sahip olduğu momentuma karşılık gelir), bulut çöktüğünde materyalin bir diske dönüştüğü anlamına geliyordu. Böylece, bir **ön gezegensel disk** oluşturuldu. Bu dönen diskin merkezinde (Şekil 8.12) büyük bir madde birikimi meydana geldi. Bu ilk yıldızdı. Diskin dönme hızı, tüm maddenin ön yıldızda birikmediği anlamına geliyordu. Bir kısmı diskte kaldı.

Bulutun ilk çöküşünü ne tanımlar? Bulutun başlangıçta çökmesi için buluttaki kütleçekim kuvveti, gaz basıncını ve dışarı doğru iten termal veya radyasyon enerjisini aşmalıdır. Bu çöküşe izin veren minimum kütle, Kot kütlesi olup, şu şekilde verilir:

$$M \text{ (Jeans mass)} = 5kT/Gm \qquad (8.8)$$

Burada k Boltzmann sabiti, G Kütleçekim sabiti, T diskin sıcaklığı, R yarıçapı ve m diskin kütlesidir.

Kızıl-altı bölgeyi gözlemleyerek, yeni yıldızların etrafında disk oluşturan bölgeleri görmek mümkündür. Bu gözlemler, yeni oluşan disklerin genellikle yaklaşık beş milyon yıl kadar kısa ömürlü olduğunu ve bu süre içinde gezegenlerin oluştuğunu gösteriyor.

Disk içinde, toz ve gaz, elektrostatik ve kütleçekimsel etkileşimlerle daha büyük tanecikler ve kümeler halinde birikmeye başlar, bunlara erimiş silikat kayası ve **gökkumu** adı verilen demir / nikel kürecikleri dâhildir. Bu gökkumları bazı **göktaşlarında** bulunabilir ve bize erken Güneş Sistemindeki fiziki koşullar hakkında çok fazla bilgi verir. Taneler diskteki küçük parçacıklardan büyüdükçe, dönen ince toz ve gazdan ayrışırlar ve esasen onlara karşı büyüme-

lerini daha da artıran bir 'rüzgâr' hissederler. Bu süreç hiçbir şekilde düzgün ve düzenli değildir. Disk içinde türbülans oluşur.

Sonunda malzeme, büyük nesneler halinde toplanır. Bu **gezegensel embriyolar** veya **gezegen öncülleri**, materyalleri kütleçekimle temizler. Bu süreç **kütleçekimsel odaklanma** olarak bilinir. Küçük gezegenlerin fiziksel yarıçapından daha geniş olan ve cismin etrafında materyal birikmesine izin veren etkili bir yarıçapa sahip olduğunu düşünebiliriz. Etkili yarıçap şu şekilde hesaplanır:

$$\text{Etkili yarıçap} = R\,(1 + v_{esc}^2/v_o^2) \qquad (8.9)$$

burada R, gezegen öncülünün yarıçapı, v_{esc}, gezegen öncülünün **kaçış hızı** ve v_o, yakınlardaki gezegen öncüllerinin hızıdır.

Gezegen öncülü büyüdükçe, kaçış hızı da kare şeklinde artacak ve böylece etrafındaki daha fazla materyali paspaslama kabiliyetini önemli ölçüde artıracaktır. 1000–5000 km menzilli cisimler oluşturulduktan sonra, gezegen boyutunda cisimler oluşturmak için kütleçekimsel olarak çekilebilirler. Cisimlerin az ve benzer büyüklükte olduğu, gezegenler oluşturmak için çarpıştığı bu döneme 'oligarşik büyüme' dönemi denir.

Gezegen büyüklüğündeki cisimler arasındaki karşılaşmalar, dev gezegenlerin son derece değişken veya eğimli yörüngelere zorlanarak, ötegezegen popülasyonlarında gözlemlenen çok çeşitli değişkenliklerin hesaba katıldığı saçılma olaylarına yol açar (Bölüm 19). Gezegenler, yıldız sistemlerinden çıkarılarak **tek başına gezegenlere** dönüşebilir.

Gezegenler yeterince erken oluşursa, orijinal diskten hidrojen ve helyum gibi düşük moleküler ağırlıklı gazların dış kabuğunu çekebilirler. Jüpiter ve Satürn gibi gaz devi gezegenler bu cisimlerin örnekleridir. Gezegenler daha sonra oluşursa, örneğin bulutun sıcak içindelerse ve ilk yıldıza yakınsa ve tüm gaz tamamen oluştuklarında dağılırsa, Dünya ve Mars gibi küçük kayalık gezegenler oluşturacaklardır. Diskten oluşan materyal dizisi, yoğunlaşma dizisi olarak adlandırılan şeyle tanımlanır. 1700 K ve altındaki sıcaklıklarda Ca, Ti ve Al yoğunlaşır. Fe daha sonra sülfitler (FeS) oluşturmak için yoğunlaşan S ile reaksiyona girer. Erken kayalık silikatlar, oksitlenmiş demir oluşmadan önce yoğunlaştığı için daha fazla Mg içeriyordu (bu zamandan önce Fe bir metal olarak mevcuttu). Sonunda, yeterince düşük sıcaklıklarda su gibi **uçucular** yoğunlaşır. Böylece, iyi tanımlanmış bir yoğunlaştırılmış materyal dizisi oluşur.

Oluşan gezegenlerin doğası da büyük ölçüde diskin neresinde olduklarına bağlı olacaktır. Güneş Sistemimizdeki karasal gezegenler arasındaki bileşim farklılıkları, örneğin değişen Al ve Mg / Si oranları, diskte meydana gelen karmaşık farklılıkların ve etkilerin olduğunu gösterir. Dahası, ön yıldızdan gelen radyasyon mesafenin karesi olarak azalacağından, diskin içten dışına doğru hareket ederken sıcaklıklar hızla soğur. Belirli bir mesafede, Güneş benzeri bir yıldızı çevreleyen bir disk için yaklaşık 2,7 AB, sıcaklık, toz taneciklerinde buz

oluşabilecek kadar düşüktür ve su gibi uçucu maddelerin envanterini artırır. Bu mesafe buzul çizgisi veya kar çizgisi olarak bilinir ve aynı zamanda kar çizgisinin ötesinde oluşan dev gaz gezegenlerinde yüksek uçucu madde ve gaz bolluğunu açıklar.

Kar çizgisine ek olarak, ön gezegensel diskinde, ötesinde sıcaklıkların hidrokarbonlar gibi organik maddelerin oluşmasına yetecek kadar düşük olduğu, bazen kurum çizgisi adı verilen bir nokta da tanımlayabiliriz.

Bu erken aşamada, diğer önemli süreçler de gerçekleşiyor. Güneşin Güneş Sisteminin kütlesinin yaklaşık %99,9'unu kapsadığı, ancak açısal momentumun yalnızca %2'sine sahip olduğu gözlemi, Güneş Sisteminin ilk yıllarında oluşumu sırasında çok fazla kütle kaybettiğini göstermektedir. Ana diziye katılmadan (ve dolayısıyla kararlı füzyon yanmasını başlatmadan) önce T-Tauri aşaması olarak adlandırılan gelişimin erken aşamasındaki yıldızların, yoğun radyasyon ve rüzgâr yayınımlarında malzemenin uçup gitmesine katkıda bulunabilecek enerji saldığı gözlemlendi diskte ve kısmen yıldızdaki açısal momentum kaybını açıklıyor. Bu T-Tauri aşaması, Güneş Sisteminden küçük toz taneciklerini temizleyerek nihayetinde gezegensel birikim sürecinin sonuna katkıda bulunacaktı. Disk içindeki girdaplar ve sirkülasyonlar, hareketin ısıya ve açısal momentuma dönüşmesine neden olacaktı, bu da açısal momentumun diske dışa doğru atılmasına neden olacak bir süreç.

Dünyanın ve diğer gezegenlerin dev bir gaz bulutundan, bir bulutsudan, oluştuğu teorisi ilk olarak Fransız matematikçi Pierre Simon Laplace (1749-1827) tarafından önerildi. Bulutsu hipotezi, Georges Buffon (1707-1788) tarafından öne sürülen ve gezegenlerin Güneşle bir kuyruklu yıldız arasındaki dev çarpışma sonucu oluştuğuna dair alternatif bir fikre karşı artan bir güven kazandı. Yine bir başka teori, gezegenlerin, iki yıldız birbirine yakın geçtiğinde gezegenleri oluşturmak üzere yoğunlaşan malzemeyi dışarı çeken geçen yıldızın kütleçekimiyle oluştuğuydu.

Güneş bulutsusu hipotezi, az önce tartıştığımız birçok özelliği açıklamada başarılı oldu: neden Güneş Sisteminin dış bölgelerinde gaz gezegenleri ve iç bölgelerde küçük kayalık gezegenler oluşma eğilimde (bir gaz bulutunun yoğunlaşma ve çökme şeklinin dinamikleriyle açıklanır), neden gezegenlerin yörüngede Güneşin dönüşüyle aynı yönde dönme eğiliminde oldukları (açısal momentumun bir sonucu olarak) ve Güneş Sisteminde neden birçok asteroit ve kuyruklu yıldız parçası olduğu (bunlar erken birikim sürecinin artıklarıdır). Bulutsu hipotezi bugün büyük ölçüde kabul görse de, ayrıntıların hala düzeltilmesi gerekiyor. Sıcak Jüpiterler, yıldızlarına yakın yörüngede dönen devasa Jüpiter boyutundaki gezegenler gibi Güneş dışı gezegenlerin keşfi (Bölüm 19), gezegen göçü fikirlerinin ve diğer iyileştirmelerin modele dâhil edilmesini gerektirdi.

8.8 Güneş Sistemimizdeki Cisim Türleri

Bu aşamada, Güneş sistemimizdeki yığılma diskinden ortaya çıkan çeşitli cisimlerin bazılarını gözden geçirmeye değer. Mars ve buzul uydular gibi bazı Güneş Sistemi cisimlerinin özelliklerini kitabın ilerleyen bölümlerinde daha ayrıntılı olarak keşfedeceğiz.

Güneş sisteminin boyutu tartışmalıdır –bu sadece sizin tanımınıza bağlıdır. Kuyruklu yıldız taşıyan Oort Bulutunu dâhil ederseniz, yarıçapı 50.000 AB olabilir. Güneş Sistemindeki ana cisimlerin çoğu, Güneş rüzgârının yıldızlararası ortamı ittiği bölge olan yaklaşık 100–150 AB çapındaki heliosferin içine gömülüdür. Bu, Güneş Sisteminin kapsamı olarak da düşünülebilir.

Güneş Sistemimizdeki ilk ön gezegensel diskin kökeni, sistemdeki tüm cisimlerin neredeyse aynı düzlemde olduğu ve hepsinin Güneş etrafında aynı yönde, oldukça dairesel yörüngelerle döndükleri gözlemiyle doğrulanmış görünüyor. Kuyruklu yıldızlar ve asteroitler de dâhil olmak üzere çok değişken yörüngeleri olabilen bazı önemli istisnalar vardır. Erken büyük çarpışmalara maruz kalmış olabilecek Venüs ve Uranüs haricindeki tüm gezegenler, yörüngeleriyle aynı yönde –ilerleme hareketi yönünde (Dünyanın Kuzey Kutbunun çok yukarısındaki bir noktadan, ilerleme hareketinin yönü saat yönünün tersidir)– dönerler.

İçeriden başlayıp dışarı doğru gitmek için Güneşle başlıyoruz. Güneşin bir G2V yıldızı olduğunu zaten görmüştük. 5800 K yüzey sıcaklığına ve Dünyanın yaklaşık 110 katı (695.500 km) yarıçapa sahiptir. Dünyanın 330.000 katı veya $1,989 \times 10^{30}$ kg kütlesi vardır. Kütlece bileşimi, gökbilimcilerin sözlüğünde yaklaşık %2 daha ağır elementler veya 'metaller' ile %71 hidrojen, %27,1 helyumdur.

Güneş Sistemimizin kütle merkezi Güneşin içindedir, bu nedenle teknik olarak diğer gezegenimsiler Güneşle ortak kütle merkezi etrafında yörüngede dönseler de, konuşma dilinde 'Güneşin etrafında dönen' gezegenimsilerden söz ediyoruz.

Bir gezegenimsi, Uluslararası Astronomi Birliği tarafından Güneşin yörüngesinde dönen bir cisim olarak tanımlanmıştır, yeterince büyüktür ki kütleçekim onun küresel olmasına neden olur ve çevresini diğer cisimlerden büyük ölçüde temizler. Asteroit kuşağındaki Ceres ve Kuiper Kuşağındaki Eris ile Makemake cüce gezegenler arasında bulunur. Plüton, üçüncü kriteri karşılamadığı için cüce gezegen olarak sınıflandırılmıştır. Bu kararın gezegenbilim camiasında tartışmalı olduğu kanıtlandı. Bunun sonucunda, Güneş Sistemimizde geriye sekiz gezegen (Merkür, Venüs, Dünya, Mars, Jüpiter, Satürn, Uranüs, Neptün) kalır.

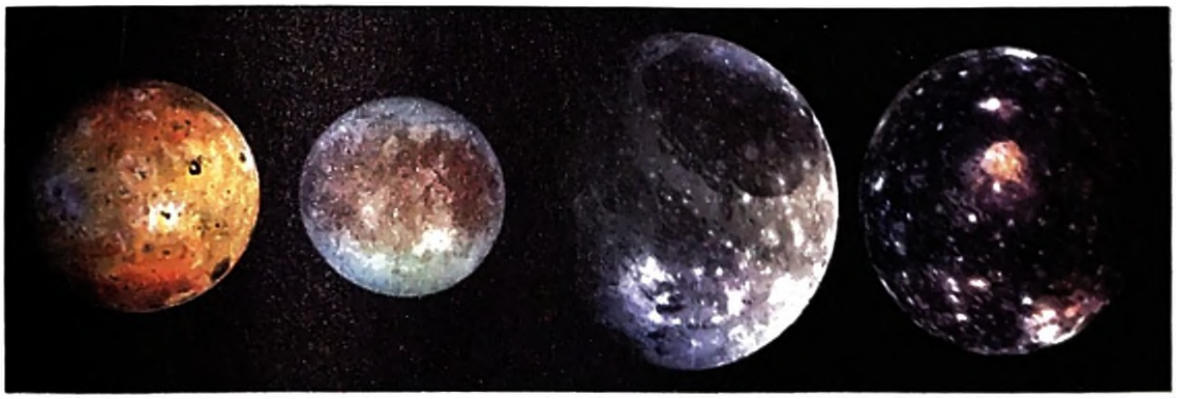
Ayrıca gezegenler, genellikle, Merkür, Venüs, Dünya ve Mars'ı içeren içeren kayalık (veya 'karasal') gezegenler ve geri kalan dört gezegeni kapsayan gaz veya buz gezegenlerine ayrılır. Bu iki sınıf arasındaki ayrım sadece bir tanımlama meselesi değil, daha önce tartışıldığı gibi, kar çizgisinin ötesinde gezegen oluşumundaki farklılıkları da yansıtıyor.

Birçok gezegenin yörüngesinde aynı düzlemde ve yönde dönen uyduları vardır. Jüpiter'in dört Galilei uydusu (Io, Europa, Ganymede ve Callisto), uzayda tespit edilen ilk uydulardı (bizimki dışında) (Şekil 8.13). Gaz gezegenlerinin dördünün de halka sistemleri var. Satürn'ün halkaları iyi bilinmesine ve net bir şekilde görüntülenmesine rağmen, benzer şekilde, çok daha ince halka sistemleri diğer gaz devlerinin etrafında bulunmuştur. Buz ve tozdan oluşurlar ve yalnızca birkaç on metre kalınlığında olabilirler.

Astrobiyolojik bir bakış açısından, asteroitler önemli bir cisim sınıfıdır. Birçoğu Mars ve Jüpiter arasındaki yörüngede dönüyor, ancak bazılarının onları Dünyaya yaklaştıran yörüngeleri var. Bu Dünyaya Yakın Cisimler (NEO*'lar) yaşam için bir tehlike olarak kabul edilmektedir ve dinozorlarla diğer birçok organizmanın neslinin tükenmesine neden olan Kretase sonundaki yok oluşa katkıda bulunmuş olabilirler (Bölüm 15). Bunların en büyüğü, 32 km çapında bir kaya olan 1036 Ganymed olarak adlandırılır. Asteroitler, küçük kayalardan birkaç yüz kilometre çapındaki cisimlere kadar değişiklik gösterir.

Gezegenlerin yörüngelerinin ötesinde kuyruklu yıldızlar, organik ve diğer materyalleri içeren buz bakımından zengin cisimler vardır. Kısa dönem kuyruklu yıldızların yörünge dönemleri yaklaşık 200 yıl veya daha azdır ve esas olarak Neptün'ün (30 AB) yörüngesinden yaklaşık 50 AB'ye uzanan Kuiper Kuşağından gelirler. Kuiper Kuşağında çapı 100 km'den büyük ve bundan milyarlarca daha küçük 100.000'den fazla cisim var. Plüton bunlardan sadece biridir.

Uzun ömürlü kuyruklu yıldızlar, Güneşi yaklaşık 20.000 ila 100.000 AB veya neredeyse bir ışık yılı uzaklıkta çevreleyen küresel bir cisim bulutu olan Oort Bulutundan geliyor. Bulut doğrudan gözlemlenmedi, ancak kuyruklu yıldızların yörünge özelliklerine dayanarak varsayımda bulunuldu ve 1 km'den daha büyük birkaç trilyon cisim içerdiği düşünülmekte. Kökenlerinin, cisimleri son derece eliptik yörüngelerde dışarıya doğru iten kütleçekimsel etkilerle orijinal ön gezegensel diskinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Güneş, Samanyolu



Şekil 8.13 Jüpiter'in Galilei uyduları, isimlerini onları ilk defa gözlemleyen Galileo Galilei'den almışlardır (Kaynak: NASA).

* [İng.] Near-Earth Objects -çn.



Şekil 8.14 Hale–Bopp Kuyruklı yıldızı tarafından üretilen kuyruklu yıldız kuyrukları, Nisan 2007'de görüntülenmiştir (Kaynak: wikicommons, E. Kolmhofer, H. Raab; Johannes-Kepler Gözlemevi, Linz, Avusturya).

Gökadası çevresinde yolculuğuna çıkarken, yanında geçen yıldızların bu cisimleri kütleçekimsel olarak bozması ve bir kısmını Güneş Sisteminin iç bölgelerine göndermesi mümkündür.

Kuyruklu yıldızlar, özellikle kuyruklarını gösterecek ve medyayı heyecanlandıracak kadar yaklaştıklarında, gece gökyüzünde çok net bir şekilde gözlemlenirler. Tipik olarak, cismin hareket yönünün tersine bırakılan materyal parçalarından oluşan, biri toz kuyruğu olan iki kuyrukları vardır (Şekil 8.14). İkinci kuyruk veya plazma kuyruğu, kuyruklu yıldızın komasındaki (buharlaşan madde atmosferi) Güneş rüzgârında toplanan ve hızla sürüklenen (yaklaşık 400 km s^{-1}) yüklü parçacıklardan kaynaklanır ve kuyruklu yıldız Güneşten uzaklaştıkça hareket yönünün önüne yansıtılabilen çok farklı ve ayırt edici bir kuyruk oluşturur. Kuyruklu yıldız Güneşi geçtikten ve Güneş Sisteminin iç bölgelerini terk ettikten çok sonra, onun parçaları Dünya tarafından yörüngeden süpürülür. Bunlar üst atmosferde yanarken meteor yağmurları (Geminidler ve Leonidler gibi) üretirler.

8.9 Gezegenimsilerin Hareketini Yöneten Yasalar

Astronomların ve matematikçilerin, bahsettiğimiz gezegen cisimlerini ve yıldızları yöneten yasaları ve kuralları bulmak için bitmek bilmeyen bir arayışı oldu. Bir Greko-Romen yazar ve filozof olan Ptolemaios (MS 90–168), tüm bedenlerin Dünyanın etrafında döndüğü bir evren hayal etti. Daha önceki yermerkezli modeller, Merkür ve Venüs'ün Güneşe olan garip yakınlığı ve bazı gezegenlerin yaptığı gibi görünen gerileme hareketi veya ters dönüşler gibi bir dizi sorundan muzdaripti. Ptolemaios'un modeli, Dünyanın etrafında dönen küçük çemberler etrafında hareket eden gezegenlere sahiptir. Bu daha ziyade, bir modeli verilere uydurmak için gerçekleştirilen umutsuz bir girişimdi. Bilimde bu ızdıraptan muzdarip olan son kişi o olmayacaktı.

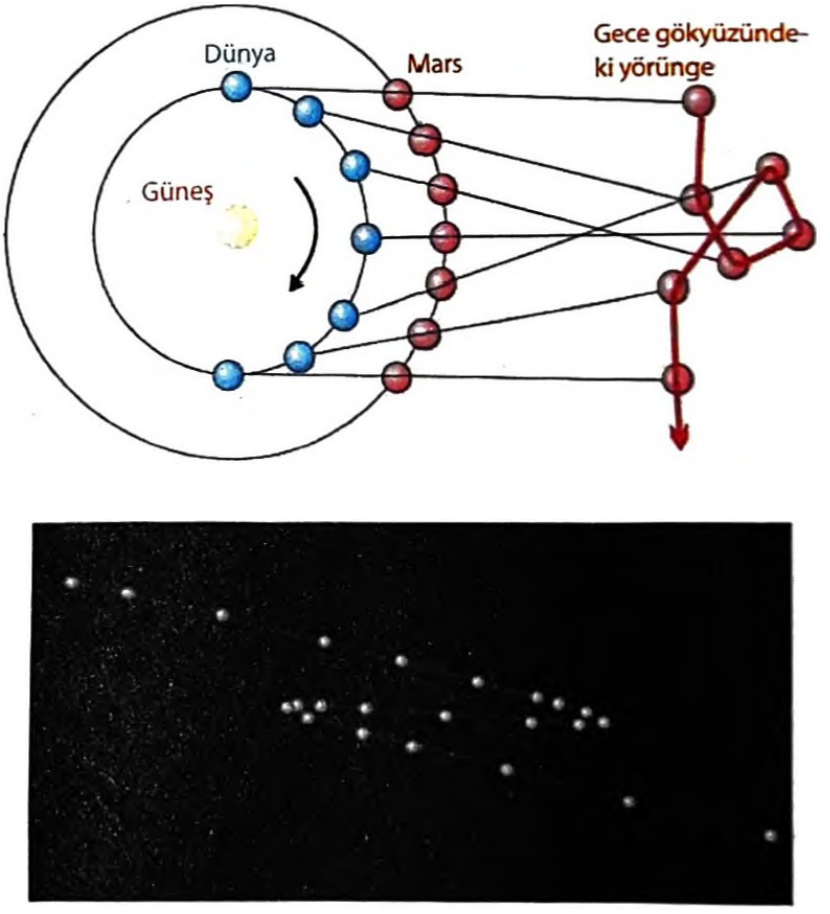
Erken yermerkezli görüş, sonunda, bir Rönesans matematikçisi olan Nikolaj Kopernik (1473–1543) tarafından *De Revolutionibus Orbium Coelestium* [Göksel Kürelerin Dönüşleri Üzerine] adlı kitabında formüle ettiği Güneş-merkezli görüşüyle değiştirildi. Bu metin, astronomide ve dolayısıyla astrobiyolojide bir

dönüm noktasıydı. Kopernik, bu olasılığı ilk düşünen kişi değildi. Bir Yunan filozofu olan Aristarkus (MÖ 310–230), Güneş-merkezli bir model düşündü, ancak bu fikri ne ölçüde geliştirdiğini bilmiyoruz.

Kopernik'in görüşü, Merkür ve Venüs'ün Güneşe olan yakınlığı için açıklayıcı bir güç sağladı (Güneşe daha yakınlardı) ve ayrıca Güneşten Dünyaya olan mesafenin yıldızlara olan uzaklığa kıyasla çok küçük olduğunu ortaya koydu. Onun modeli, Güneş etrafındaki farklı hareket oranlarının neden olduğu **gerileme hareketini** (Şekil 8.15) de açıkladı.

Evrenle ilgili bu yeni görüşüne rağmen, Kopernik, modelinin doğruluğunu ve gezegen hareketini güvenilir bir şekilde tahmin etme yeteneğini engelleyen gezegenlerin mükemmel daireler halinde hareket ettiği fikrine bağlı kaldı.

Gezegenimsilerin hareketini yöneten kurallar ilk önce matematiksel olarak Alman matematikçi ve astronom Johannes Kepler (1571–1630) ve Danimarkalı asillerin himayesindeki Tycho Brahe (1546–1601) tarafından geliştirildi. Brahe,



Şekil 8.15 Bazı gezegenler, tepedeki diyagramda (Güneşin güney kutbunun altındaki noktadan bakıldığında) detaylandırıldığı gibi, gerileme hareketiyle hareket ediyor veya ters dönüşler yapıyor gibi görünüyor. Alttaki şema, Mars'ın gerileme hareketi yaptığı süre boyunca gece gökyüzünde nasıl göründüğünü gösteriyor. Bu hareketler ilk astronomların kafasını karıştırdı ve evrenin yermerkezli modeliyle açıklanması zordu (Kaynak: Charles Cockell ve Tunc Tezel).

özenli bir gökyüzü gözlemcisiydi ve onun bol ve çok titiz verileri, teorik olarak düşünen Kepler'e gezegenlerin mükemmel çemberler halinde hareket etmediğini, bunun yerine elipsler halinde hareket ettiklerini anlamak için ihtiyaç duyduğu bilgileri sağladı. Veriler ayrıca ona gezegenlerin hareketini yöneten daha genel kuralları geliştirmek için ihtiyaç duyduğu bilgileri sağladı. Tanımladığı üç kural, Newton'un hareket yasalarının doğrudan bir sonucuydu. Bunlar:

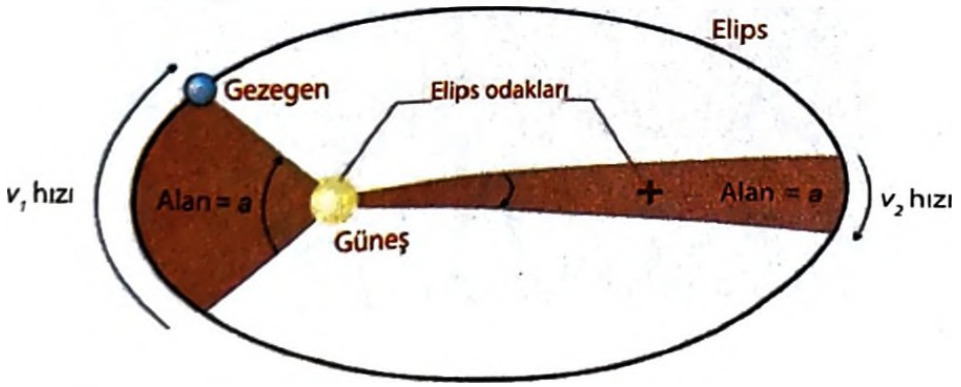
Kepler'in Birinci Yasası: Her gezegenin yörüngesi, odak noktasında Güneşin olduğu bir elipstir (bu yörüngede bir gezegenin Güneşe en yakın olduğu noktaya, en uzak nokta olan günöte'nin aksine, **günberi** denir). Bu yasa, başka bir cismin etrafında dairesel olmayan bir yörüngede bulunan tüm cisimler için geçerlidir. Bu yasa Şekil 8.16'da gösterilmektedir.

Kepler'in İkinci Yasası: Güneşten gezegene giden hayali bir çizgi, eşit zamanda eşit alanları tarar. Başka bir deyişle, günberi noktasında, gezegensel bir cisim günötedekinden daha hızlı hareket edecektir, çünkü aynı anda eşit bir alanı süpürmek için daha hızlı hareket etmesi gerekir. Bu yasa Şekil 8.16'da gösterilmektedir.

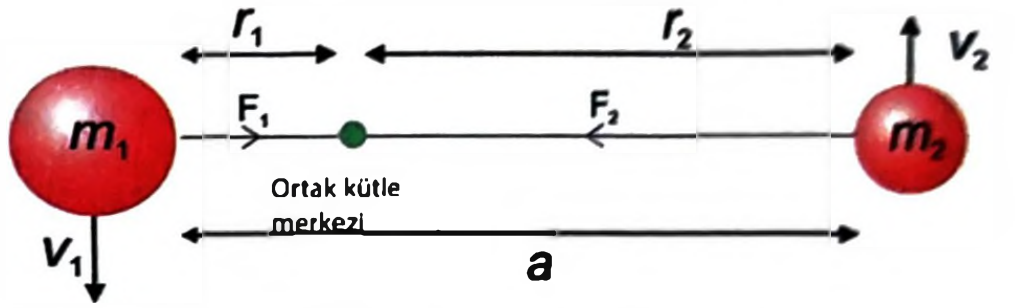
Kepler'in Üçüncü Yasası: Yıldız devresinin (yıldızının tam bir yörüngesini tamamlamak için geçen süre) karesi, yarı ana eksenin (elipsin ana ekseninin yarısı) küpüyle orantılıdır.

Kepler'in üçüncü yasası, bir gezegenin yıldız devresini hesaplamamıza izin verir ve bu nedenle, Güneş dışı gezegenlerin yörünge mesafesini ve kütlesini belirlemek için son derece önemlidir. Bu, Bölüm 19'da tekrar tartışılacaktır. Öneminin bir sonucu olarak, matematiksel ilişkiyi burada türetmeye değer.

Kepler'in üçüncü yasası, m_1 ile m_2 kütleli iki cismi göz önünde bulundurarak, r_1 ile r_2 mesafelerinde ve v_1 ile v_2 hızlarında kütle merkezlerinin (sabit) yörüngesinde dönerken Newton yasaları kullanılarak daha kesin bir şekilde matematiksel olarak tanımlanabilir (Şekil 8.17).



Şekil 8.16 Kepler'in ilk iki yasasını gösteren şema: Güneş bir elipsin odak noktalarından birinde (bu, başka bir cismin etrafında dairesel olmayan bir yörüngedeki tüm gezegenimsi cisimler için geçerlidir) ve cisim eşit bir zamanda eşit bir alanı süpürür (v_1 hızının v_2'den daha büyük olduğunu ima eder) (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 8.17 Ortak kütle merkezinin çevresinde dönen iki cisim (Kaynak: Charles Cockell).

Kütleçekim kuvveti yalnızca cisimlerin merkezlerini birleştiren hat boyunca hareket ettiğinden, her iki cisim de, farklı v_1 ve v_2 hızlarında hareket etmelerine rağmen, yıldız devri olan P devrinde bir yörüngeyi tamamlamak zorundadır. Merkezcil ivmelerinden dolayı her cisim üzerindeki kuvvetler şu şekilde verilir:

$$F_1 = m_1 v_1^2 / r_1 = 4\pi^2 m_1 r_1 / P^2 \quad (8.10)$$

$$F_2 = m_2 v_2^2 / r_2 = 4\pi^2 m_2 r_2 / P^2 \quad (8.11)$$

Ortadaki ifade, Newton'un ikinci yasasından ($F = ma$) türetilmiştir. Merkezcil ivme, a, v^2 / r ilişkisiyle verilir. Böylece, her cisim için kuvvet $F = mv^2 / r$'dir. Sağ el ifadesi, v'nin, yani hızın, mesafenin zamana bölünmesiyle elde edildiği kabul edilerek türetilir. Bu, $2\pi r$ (r yarıçaplı bir çemberin çevresi, yörünge uzunluğunu verir) yörüngeyi bir kez dönmesi için geçen süreye bölünerek verilir –yıldız devri, P.

Newton'un üçüncü yasası (her kuvvet için eşit ve zıt bir kuvvet vardır) bize $F_1 = F_2$ olduğunu söyler ve bu nedenle:

$$4\pi^2 m_1 r_1 / P^2 = 4\pi^2 m_2 r_2 / P^2, \quad (8.12)$$

Böylece:

$$r_1 / r_2 = m_2 / m_1 \quad (8.13)$$

Bu ilişki bize, daha büyük kütleli cismin, kütle merkezine daha az kütleli cisimden daha yakın yörüngede döndüğünü söyler (m ne kadar büyükse, ilişkiyi sürdürmek için karşılık gelen r o kadar küçüktür).

Bununla birlikte, iki cismin toplam ayrışması, a (Şekil 8.17), şu şekilde verilmektedir:

$$a = r_1 + r_2 \quad (8.14)$$

Burada a teriminin ivme değil gezegenler arasındaki mesafe için kullanıldığına dikkat edin!

Bu, (Denklem (8.14)'ü (8.13)'ün yerine koyarak) şu eşitliği verir:

$$r_1 = m_2 / (m_1 + m_2). \quad (8.15)$$

Bu denklemi yukarıda elde edilen F_1 denkleminde yerine koyup (Denklem (8.10)) ve sonra bunu Newton'un üçüncü yasası olan Kütleçekim Yasasından ($F_{yer} = F_1 = F_2 = Gm_1 m_2 / a^2$) türetilen kuvvete eşitleyerek, G'yi Kütleçekim Sabiti olarak alarak, Kepler'in üçüncü yasasının Newton biçimini elde ederiz:

$$P_2 = 4\pi^2 a^3 / G(m_1 + m_2). \quad (8.16)$$

1. cisim bir yıldız ve 2. cisim bir gezegen ise m_1, m_2'den çok daha büyüktür ve m_2 göz ardı edilebilir. Dolayısıyla denklemin sağ tarafı, bize bir gezegenin yıldız devri ile yıldızın kütlesi arasındaki ilişkiyi veren denkleme yakındır:

$$P_2 = 4\pi^2 a^3 / GM_{yıldız}. \quad (8.17)$$

Bu denklem ötegezegenlerin incelenmesi için önemlidir, çünkü bir yıldızın kütlesi yıldız evrimindeki iyi bilinen ilişkilere göre renginden tahmin edilebilir (H–R diyagramında grafik olarak gösterilmiştir), P ayrıca radyal hız yöntemi kullanılarak da ölçülebilir. Bu yöntem, Bölüm 19'da göreceğimiz gibi, bir gezegenin yıldızına olan uzaklığını tahmin etmemize ve kütlesini hesaplamamıza imkan sağlıyor.

8.10 Gök Taşları

Tüm gezegenimsi cisimler, sabit Kepler yörüngelerine sıkı sıkıya bağlı bir şekilde kalmaz. Düzensiz yörüngeler oluşturabilir veya çarpışmalar ve kütleçekim etkileriyle yerlerinden çıkabilirler, bazıları sonunda Dünyaya yaklaşır ve yüzeyine ulaşırlar. Bu cisimlerin bazıları çok büyüktür ve ekosistemlerde yerel veya küresel tahribata neden olabilirler. Bununla birlikte, çoğu atmosferde parçalanan ve bozulmadan Dünya yüzeyine inen küçük cisimler de vardır.

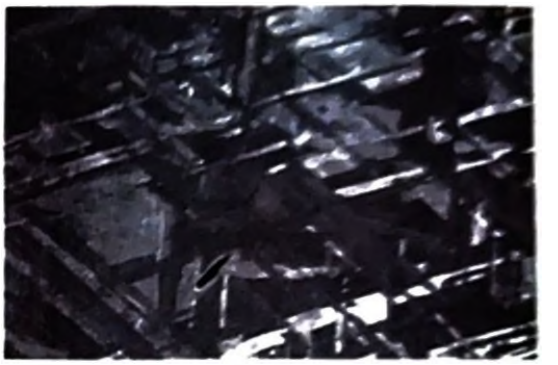
Bu göktaşları (bu cisimler uzay boyunca seyahat ederken kullanılan meteoroit terimi ile gökyüzünde yıldız kayması şeklinde gözlemlenen yanmaları esnasında kullanılan meteor terimi birbirine karıştırılmamalıdır), astrobiyologların Güneş Sisteminin ilk dönemlerinde yaşam için gerekli olan elementlerin, özellikle de karbonun, bolluğunu ve dağılımını anlamalarına yardımcı olan zengin bir Güneş Sistemi malzemesi kaynağı sağlar. Uzay görevleri değiştirilmemiş taze malzeme toplamak için paha biçilmez olsa da, göktaşları, uzak cisimlerden onları toplamak için bir uzay aracı göndermeye gerek kalmadan üzerinde çalışılacak malzeme sağlarlar. On binlerce göktaşı bulgusu vardır ve eğer bu göktaşını yere indikten hemen sonra gerçekten kurtaracak kadar şanslıysanız, bu durum resmi olarak bir 'düşüş' olarak sınıflandırılır. Bu örneklerin çoğu Avustralya çöllerinden, Sahra'dan, Arap Yarımadasından, Antarktika'nın buzlarından ve 10 km s^{-1}'in üzerinde bir hızla Dünyanın atmosferine girişi sırasında aşındığında kayanın dış katmanlarının yoğun ısınmasının neden olduğu, çevredeki kayalardan sıyrılarak onları bulmayı nispeten kolaylaştıran, parlak ve genellikle siyah füzyon kabuğunun bulunduğu diğer yerlerden gelir. (Şekil 8.18).

Göktaşlarının sınıflandırılması kapsamlı ve karmaşıktır, ancak başlıca genel türlerden bazılarını tanıyabiliriz.

Dünyaya gelen göktaşlarının yaklaşık %5'i veya daha azı, kamasit ve taenit gibi demir–nikel alaşımlarının iç içe büyümesiyle iridyum gibi elementlerle zenginleştirilmiş demir göktaşlarıdır. Çoğu demir göktaşının bir kez erimiş asteroit



Şekil 8.18 Amerika Birleşik Devletleri Antarktika Göktaşı Arama (ANSMET) seferinin üyeleri tarafından Antarktika'daki bir göktaşının kurtarılması (Kaynak: wikicommons, NASA).



Şekil 8.19 Casas Grandes, Widmanstätten desenine sahip demir-nikel göktaşı. Görüntü yaklaşık 3 cm genişliğindedir (Kaynak: wikicommons, James St. John).

çekirdeklerinden geldiği düşünülmektedir. Dünya gibi (Bölüm 10), bazı asteroitler daha yoğun metalin silikatlardan ayrılmasıyla **farklılaşma** yaşadı ve sonunda bir demir–nikel çekirdek oluşturmak için asteroitin merkezine battı. Asteroit katılaştıktan sonra, diğer asteroitlerle çarpışarak parçalandı ve bu demir açısından zengin parçalar etrafa saçıldı. Bu demir göktaşlarından bazılarının içerdiği, **Widmanstätten desenleri** (Şekil 8.19) olarak adlandırılan harika desenler, bu asteroitlerin demir çekirdeklerinde oluşan uzun demir ve nikel kristalleridir. Çok yavaş soğurlar ve bu kristallerin oluşmasına izin verirler.

Göktaşlarının yaklaşık %1'i taşlı demir göktaşlarıdır. Bunlar, demir–nikel metalleri ve silikat minerallerinin bir karışımıdır. Palazit adı verilen bir türün, demir göktaşlarının çıktığı çekirdek bölgesinin hemen üzerindeki sınırda parçalanmış asteroitlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Dünyaya düşen göktaşlarının yaklaşık %86'sı, küçük ve yuvarlak parçacıklar içermelerinden dolayı kondritler olarak adlandırılan farklı ve belirgin bir sınıftan geliyor. Bu **kondrüller**, çoğunlukla uzayda serbest hareket eden cisimler iken eriyen ve materyal uzayda kütleçekimsiz koşullarda yüzey gerilimini en aza indirirken küresel şekillerini oluşturan silikat minerallerinden oluşur. Bir uzay istasyonunun kabininde su içen bir astronot gördüyseniz, suyun 'toplar' oluşturma eğiliminde olduğunu hatırlayacaksınız. Erimiş kaya da, ön ge-

* [İng.] United States Antarctic Search for Meteorites –çn.

zegensel diskinde benzer şekilde davranırdı. Kondritler yaklaşık 4,55 milyar yaşındadır ve hiçbir zaman büyük gezegenimsilere dönüşmeyen asteroit kuşağından maddeler oldukları düşünülmektedir, bu da onları Güneş Sistemindeki en eski ve en ilkel maddelerden biri haline getirmektedir. Başka bir deyişle, önceki iki göktaşı sınıfının aksine, farklılaşmamış cisimlerden meydana gelirler. Bazı kondrit türleri, karbonlu kondritler, amino asitler de dâhil olmak üzere organik madde içerir ve bu da düşük sıcaklıklarda oluşmuş olabileceklerini düşündürür. Bunlar, prebiyotik organik materyali Dünyaya getirmek için olası adaylardır.

Dünyaya düşen göktaşlarının yaklaşık %8'i, kondrülleri içermedikleri için akondritdirler. Akondritlerin çoğu eski kayalardır ve asteroitlerin kabuksal malzemesini temsil ettiği düşünülmektedir. Dünyada bulunan volkanik bazaltla bazı benzerlikleri vardır. Çoğu akondritten daha genç oldukları ve asteroit kuşağından gelmedikleri için iki grup akondrit anormaldir. Bu gruplardan biri Aydan gelir ve Apollo ile Luna uzay görevleri tarafından Dünyaya geri getirilenlere benzer kayaları içerir. Diğer grup neredeyse kesin olarak Mars'tan geliyor ve Bölüm 17'de daha ayrıntılı olarak tartışılacak. Hem akondritler hem de kondritler 'taşlı' göktaşları olarak bir araya toplanmışlardır.

Tartışma noktası: Eski göktaşları

Göktaşları bize en eski Güneş Sisteminden materyaller sunarlar ve onları inceleyerek Güneş Sisteminin nasıl oluştuğuna ve o sırada ne tür malzemelerin var olabileceğine dair kısa bir bakış elde ederiz. Bununla birlikte, göktaşı materyalinde, özellikle toplanmadan önce uzun süredir Dünya üzerinde duran materyalde ne gibi sorunlar olabilir? Dünyaya henüz inmiş bir göktaşı düşünün ve Dünya yüzeyindeki hangi süreçlerin, bu göktaşının taşıdığı bilgileri tehlikeye atabileceğini tartışın. Bu süreçler, bir göktaşının yere indikten birkaç gün sonraki bozulmamış doğasını nasıl etkilerdi, peki ya birkaç yüzyıl sonra? Bir göktaşı düşer düşmez toplansa bile, toplanma ve küratörlüğünü yapma şekli bilimsel bir kaynak olarak yararlılığını nasıl etkileyebilir? Düştüğü anda toplanan bir göktaşınız olduğunu hayal edin. Yüz yıldır bir müzede ahşap vitrinde duruyor. İçerdiği minerallerin saflığına güvenir miydiniz? Ya içerdiği orijinal organik materyalleri incelemek isteseydiniz? Bu düşünce deneyinin size göktaşlarının nasıl toplanması ve depolanması gerektiği hakkında ne söylediğini tartışın.

Watson, J.S., Pearson, V.K., Gilmour, I., Sephton, M.A. (2003) Contamination by sesquiterpenoid derivatives in the Orgueil carbonaceous chondrite. *Organic Geochemistry* **34**: 37–47.

Toporski, J., Steele, A. (2007) Observations from a 4-Year contamination study of a sample depth profile throughMartian meteorite Nakhla. *Astrobiology* **7**: 389–401.

8.11 Sonuç

Bu bölümde evrenin oluşumundan ve yaşam için önemli olan elementlerin kökeninden, Güneş Sisteminin cisimlerine kadar evrenin bazı özelliklerini hızlıca inceledik. Tüm bu bilgiler astrobiyologlar için önemlidir, çünkü oldukça basit bir şekilde söyleyebiliriz ki, astrobiyolojinin 'astro' kısmını oluştururlar. Güneş Sisteminin doğası ve içindeki cisimler, bariz soruları ortaya çıkarır, en uygun soru şudur: 'Tüm bunlar evrende olağan şeyler midir?' 19. Bölümde göreceğimiz gibi, gezegenlerin dağılımı, büyüklükleri ve özellikleri diğer yıldızların çevresinde çok çeşitlidir, ancak Güneş Sistemimizin, potansiyel olarak yaşama sahip olan gezegenlerin oluşum süreçleri hakkında çok genel bilgiler veren yönleri vardır. Her şeyden önce çıktığımız yolculuk, yaşam için gerekli unsurların sentezlendiği kozmik yuvamıza bir bakış sunuyor. Bir sonraki bölümde, evrendeki karbon bileşiklerinin oluşumuna daha yakından bakacağız.

İleri Okumalar

Kitaplar

Krauss, L.M., Dawkins, R.A. (2013) *Universe from Nothing: Why There is Something Rather than Nothing?* Atria Books, La Jolla.

Rees, M. (2003) *Our Cosmic Habitat.* Phoenix Books, Burlington.

Sagan, C. (2013) *Cosmos.* Ballentine Books, New York.

Yayınlar

Basri, G., Brown, M.E. (2006) Planetesimals to Brown Dwarfs:What is a planet? *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 34, 193–216.

Burrows,A.,Hubbard,W.B.,Lunine, J.I., Liebert J. (2001) The theory of brown dwarfs and extrasolar giant planets. *Reviews of Modern Physics* 73, 719–765.

Hoyle, F. (1946) The synthesis of the elements from hydrogen. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 106, 343–383

Iben, I. (1967) Stellar evolution within and off the main sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 5, 571–626.

Lopez, B., Schneider, J., Danchi, W.C. (2005) Can life develop in the expanded habitable zones around red giant stars? *The Astrophysical Journal* 627, 974–985.

Raymond, S.N., Quinn, T.R., Lunine, J.I. (2004) Making other Earth's: dynamical simulations of terrestrial plant formation and water delivery. *Icarus* 168, 1–17.

Sackmann, L.-J., Boothroyd, A.I., Kraemer, K.E. (1993) Our Sun. III. Present and Future. *Astrophysical Journal* 418, 457–468.

Schuler, S.C., King, J.R., The, L.-S. (2009) Stellar nucleosynthesis in the Hyades Open Cluster. *Astrophysical Journal* 701, 837–849.

Seeger, P.A., Fowler, W.A., Clayton, D.D. (1965) Nucleosynthesis of heavy elements by neutron capture. *Astrophyical Journal Supplement* 11, 121–166.

Wallerstein,G., Iben, I., Parker, P., Boesgaard, A.M.,Hale, G.M., Champagne, A.E., Barnes, C.A., Käppeler, F., Smith, V.V., Hoffman, R.D., Timmes, F.X., Sneden, C., Boyd, R.N., Meyer, B.S., Lambert, D.L. (1997) Synthesis of the elements in stars: forty years of progress. *Review of Modern Physics* 69, 995–1084.

9

ASTROKİMYA-UZAYDA KARBON

Öğrenme Çıktıları

- Evrendeki erken dönem kimyasal reaksiyonları anlamak.
- Uzayda gerçekleşen gaz fazı reaksiyonlarından bazılarını tanımlamak.
- Yıldızlararası taneciklerin astrokimya için önemini anlamak.
- Karbon bileşiklerinin oluşumu için bazı reaksiyonları ve yolları açıklamak.
- Uzayda oluşabilecek karbon bileşiklerinin çeşitliliğini anlamak ve önceden tespit edilmiş olanları belirlemek.
- Uzayda karmaşık karbon moleküllerinin tespit edilebileceği yöntemleri açıklamak.

9.1 Astrokimya: Yaşamın Molekülleri?

Artık yaşamın yapısı ve içerdiği temel moleküller hakkında bilgiye sahibiz. Ayrıca yıldızların füzyon fırınlarında karbon da dâhil olmak üzere yaşamın inşa edildiği elementlerin nasıl sentezlendiğini daha iyi anlıyoruz.

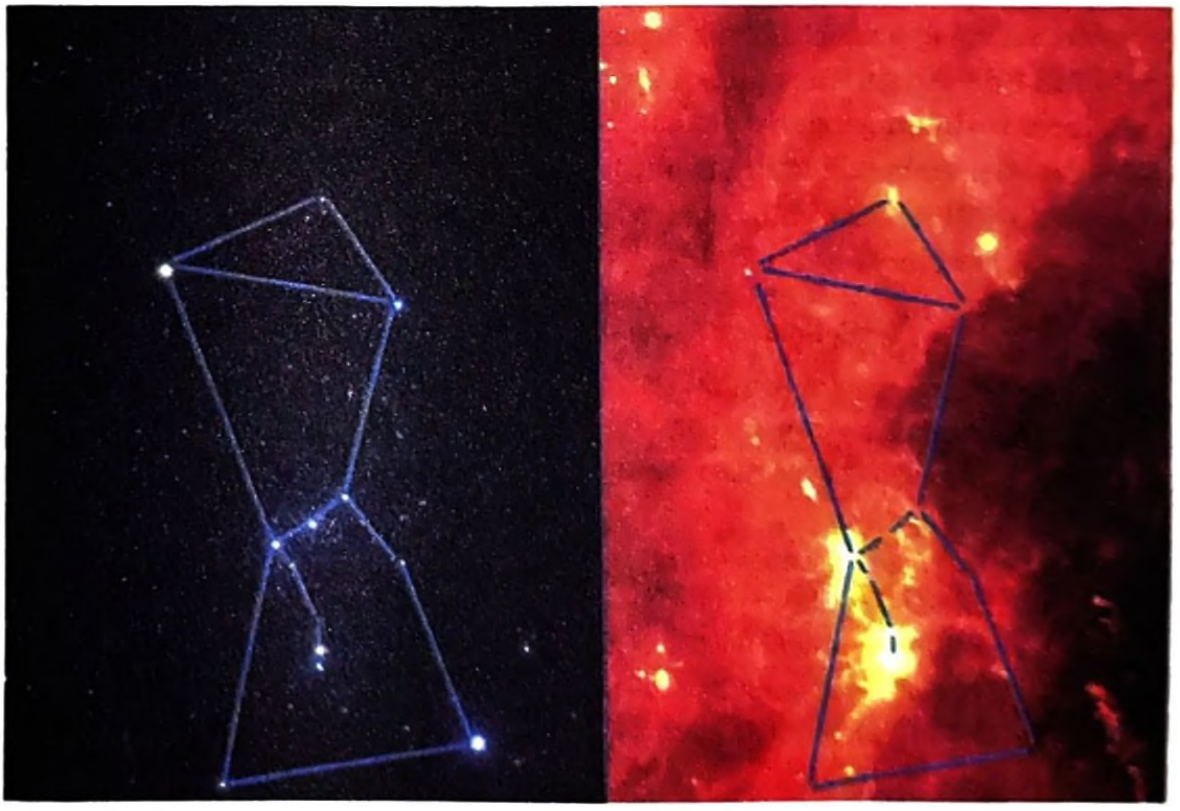
Bu içgörülerden yararlanarak, sonraki iki bölümde, yaşamı oluşturan karbon esaslı moleküllerin nereden gelmiş olabileceğini ve nihayetinde bugün bildiğimiz canlı çeşitliliğine yol açan en eski organizmaları ortaya çıkarmak için nasıl bir araya getirilmiş olabileceklerini ele alacağız. Sonraki iki bölümde, birkaç disiplini –astronomi, kimya ve biyoloji– birbirine bağlamak için daha derin bir girişime başlıyoruz.

Moleküllerin uzayda nasıl oluştuğunun araştırılması astrokimyanın çalışma alanı kapsanmındadır. Astrokimya, evrendeki moleküllerin üretimi, dağılımı ve kaderiyle ilgilidir. Astrokimya çok geniş bir alandır ve astrobiyologlar olarak, evrendeki kimya hakkında her şeyi bilmemize gerek yoktur. Belki de en önemli soru, uzayda çeşitli karbon bileşiklerinin oluşup oluşamayacağıdır. Yaşam için öncü karbon moleküllerinden bazıları uzaydan gelmiş olabilir mi ve yıldızlararası ortamın genişliğinde elde edebileceğimiz karbon bazlı kimyanın karmaşıklığı nedir? Bu soru önemlidir çünkü bize karasal yaşamın ortaya

çıktığı kimyanın evrensel olup olmadığını söyleyebilir. Karmaşık karbon kimyası, gökadada bulunduğumuz küçük alandan kaynaklanan garip bir rastlantı mı yoksa her yerde karbon bileşiklerinin oluştuğundan şüphelenmek için iyi nedenler var mı? Bu bölüm, karbon moleküllerine özel olarak odaklanarak astrokimyadaki bazı soruları inceleyecektir.

9.2 Organikleri Gözlemlemek

Uzay görünür ışıkta gözlemlendiğinde, zifiri karanlığı görürüz -gece gökyüzüne baktığımızda gördüğümüz tanıdık manzara (bulut olmadığında). Bu nedenle uzayı siyah, boş, oldukça hareketsiz bir hiçlik boşluğu olarak düşünme eğiliminde olmamız şaşırtıcı değildir. Aynı zamanda uzayın neden çok uzun bir süre kimyagerler için ilgi çekici bir yer gibi görünmediğini de açıklıyor. Orada pek bir şey yok gibi görünüyor ve yıldızlararası uzayın dağınık alanlarındaki kimyasalların eksikliği, karmaşıklık yaratacak herhangi bir reaksiyonu engelliyor gibi görünüyor. Ancak, kızıl-altı ve radyo teleskoplarını kullanarak uzayı görme yeteneğimizi geliştirdiğimizde, uzay hakkındaki bu görüş kesin olarak sona erdi. Kızıl-altı ışıkta, uzayın bulutlarla dolu olduğunu görüyoruz. Şekil 9.1'de Orion Bulutsusunu, solda görünür ışıkta ve sağda kızıl-altı ışıkta görebilirsiniz. Siyah boşluğun, enerjiyi emen iyonik, atomik ve moleküler materyalden oluşan devasa dönen bulutlara sahip olduğu ortaya çıkar. Radyo astronomisi



Şekil 9.1 Görünen ışıkta (solda; Kaynak: Akira Fujii) *ve kızıl-altı ışıkta (sağda;* Kaynak: Kızıl-altı Astronomik Uydu) *gözlemlenen Orion Bulutsusu.*

benzer şekilde bize bu bölgelerdeki moleküllerin varlığını gösteriyor. Bu materyal dağınık olmasına rağmen, yıldızlararası kimyanın alanıdır ve bu bölgelerde şaşırtıcı derecede karmaşık bileşikler oluşmaktadır.

9.3 Başlangıçta

Yaklaşık 13,8 milyar yıl önce, Büyük Patlamadan sonraki erken evren kimyasal olarak oldukça basitti ve mevcut elementler minimumdu: hidrojen ve döteryum, helyum 3 ve 4 ve lityum. Bu süre zarfında kimya, basit birleşme ve iyon–molekül etkileşimleriyle sınırlıydı. Bırakın hayatı, prebiyotik kimya olasılığı bile yoktu. Bu erken aşamada, meydana gelebilecek kimyasal reaksiyon türleri aşağıda gösterilmektedir ve bugünün kimyasına kıyasla ne kadar sınırlı olduklarını görebilirsiniz:

$H_2^+ + e^- \rightarrow H + H$
$HeH^+ + e^- \rightarrow H + He$
$H + e^- \rightarrow H^-$
$H^- + H \rightarrow H^2 + e^-$
$H^+ + H \rightarrow H_2^+ + \nu$
$H^+ + He \rightarrow HeH^+ + \nu$
$H^+ + Li \rightarrow LiH^+ + \nu$
$H^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + \nu$

Erken yıldızlar oluştuktan sonra, içlerindeki nükleer füzyon **nükleosenteze** yol açtı. Bu süreç uzayın dağınık ortamlarında gerçekleşemezdi ve bu nedenle, Bölüm 8'de tartıştığımız gibi, füzyon reaksiyonlarına ortamlar oluşturmak yıldızların varlığını gerektirdi. Küçük ve büyük kütleli yıldızlardaki bu füzyon reaksiyonları, karbon kimyasının oluşabileceği daha ağır elementlerin oluşumuna izin verdi.

Odak Noktası: Astrobiyologlar: Zita Martins



Ne üzerine çalışıyorsunuz? Ben bir astrobiyoloğum. Araştırma alanlarım arasında uzay görevlerinde biyo-göstergelerin tespiti ve göktaşları ile kuyruklu yıldızların Dünyadaki yaşamın kökenine olası katkısı yer alıyor.

Nerede çalışıyorsunuz? Imperial College London'da Royal Society Araştırma Görevlisiyim.

Birinci derece konunuz neydi? Instituto Superior Técnico'dan (Portekiz) Kimya alanında yüksek lisans ve Leiden Üniversitesinden (Hollanda) Astrobiyoloji alanında doktora derecesine sahibim.

Hangi bilimsel sorularını ele alıyorsunuz? 'Dünyada yaşam nasıl başladı?' ve 'Güneş Sisteminde başka herhangi bir yerde yaşam var mı?'

Astrobiyoloji konusunda sizi ne heyecanlandırıyor? Astrobiyoloji, ben de dâhil olmak üzere insanları uzun zamandır büyüleyen konular olan yaşamın kökenine ve evrenin başka yerlerinde var olan yaşam olasılığına değiniyor. Araştırmamın bir kısmı, 4,6 milyar yıl önce Güneş Sisteminin oluşumundan bu yana kapsamlı bir şekilde değişmemiş göktaşı örneklerinin analizini içeriyor. Bu örnekler Dünya dışıdır ve elinizde tutacağınız en eski kayalardır. Bundan daha heyecan verici bir şey olamaz!

9.4 Farklı Ortamlar

Evren genişledikçe ve yeni nesil yıldızlar oluştukça, moleküllerin oluşabileceği ortamların çeşitliliği arttı. Bugün, karmaşık kimyanın meydana geldiği ve karbon bileşiklerinin oluştuğu çok çeşitli yerler var. Şimdi kısa bir tur atalım ve bu ortamların bazı özelliklerine bakalım.

9.4.1 Dağınık Yıldızlararası Bulutlar

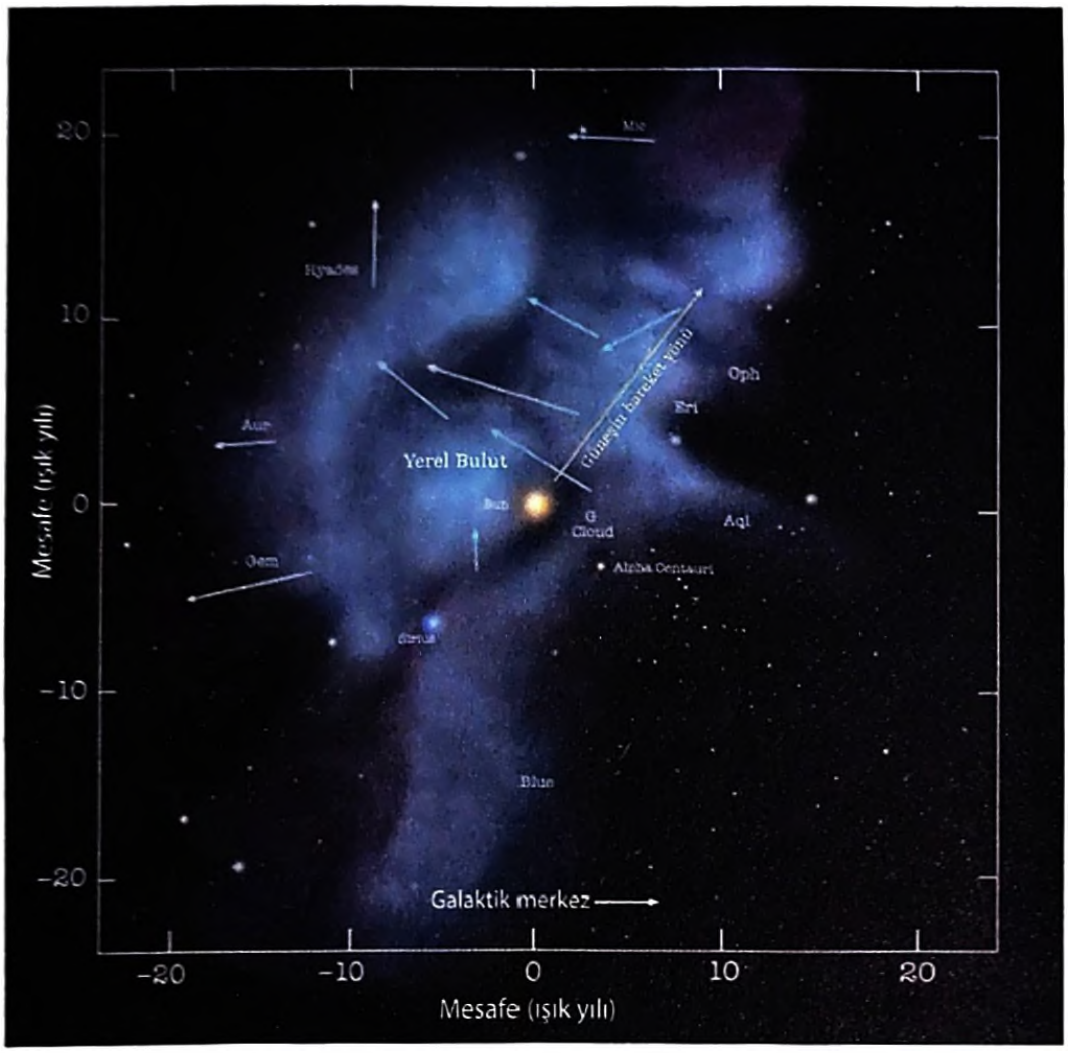
Bunlar, yaklaşık 10^8 m^{-3} iyon, atom veya molekül içeren çok dağınık (çok güçlü bir laboratuar vakumundan bile daha dağınık) madde bulutlarının bulunduğu soğuk uzay bölgeleridir (90–100 K). Bulutlar çoğunlukla atomik elementlerdir, ancak CO, OH, CH, CN ve CH^+ gibi basit diatomik moleküller içerirler. Bulutlara, kimyasal reaksiyonların ve iyonlaştırıcı moleküllerin indüklenmesinde rol oynayan yıldız UV radyasyonu nüfuz eder. Şekil 9.2, kendi Güneş Sistemimizin içinden geçtiği dağınık bulutları ve bulutların kendisindeki bazı hareketleri göstermektedir.

9.4.2 Moleküler Bulutlar

Kimya için belki de en etkileyici yerler Moleküler Bulutlardır. Bunlar, aşırı soğuk (10–50 K) bölgelerdir. Dağınık yıldızlararası bulutlardan (yaklaşık 10^{11}–10^{13} m^3 iyon, atom veya molekül) biraz daha yoğundurlar ve materyal çoğunlukla molekülerdir. Şimdiye kadar yaklaşık 100 farklı molekül tespit edildi. Bu bulutlardan bazıları çok büyük. Güneşin kütlesinin yaklaşık 10^3 ila 10^7 katı olan bir buluta dev moleküler bulut (GMC*) denir. Bu bulutlar gökadadaki en büyük cisimlerdir, kütleleri genelde yaklaşık bir milyon Güneş kütlesine eşittir ve bazen 150 ışık yılı genişliğe sahip olabilirler. Moleküler bulutlar yıldızların doğum yeridir ve içlerinde binlerce küçük ve büyük kütleli yıldız oluşabilir. Bu bulutların bazı güzel örnekleri Orion Moleküler Bulutu (genellikle Orion Bulutsusu olarak adlandırılır), Sagittarius ve Eagle Bulutsusudur.

Dev moleküler bulutlara optik ve UV fotonlar tarafından çok kolay nüfuz edilmez, bu da orada çok az iyonlaşma olduğu anlamına gelir, bu da materyalin çoğunun moleküler ve baskın türlerin H_2 olduğunu açıklar.

* [İng.]. Giant Molecular Cloud -çn.

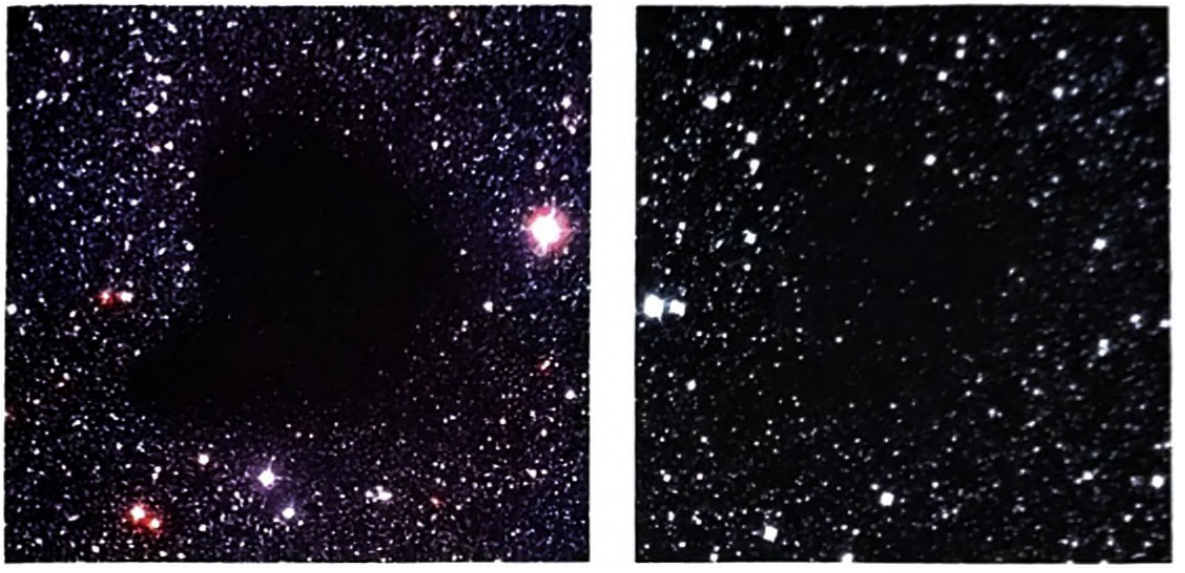


Şekil 9.2 Güneş Sistemimizin şu anda içinden geçtiği yerel yıldızlararası bulutlar. Oklar, dağınık bulutlar içindeki hareketleri gösterir (Kaynak: NASA, Goddard).

Moleküler bulutun çok güzel bir örneği, Şekil 9.3'te görülen B68'dir. B68 (Barnard 68), güney takımyıldızı Ophiuchus'a doğru yaklaşık 500 ışık yılı uzaklıkta bulunur. Şekilde soldaki bulut, tayfın hem görünür hem de kızıl-altı kısmında görüntülenmiştir. Bulutun arkasından gelen ışığı nasıl engellediğini görebilirsiniz. Sağda, kızıl-altı ışıkta, ışığın geçtiğini gösteren arkasındaki yıldızları görebilirsiniz, bu da moleküler bulutların içini araştırmak için kızıl-altı ışığın kullanılabileceği şeklindeki genel ilkeyi gösterir.

9.4.3 Ön gezegensel disk

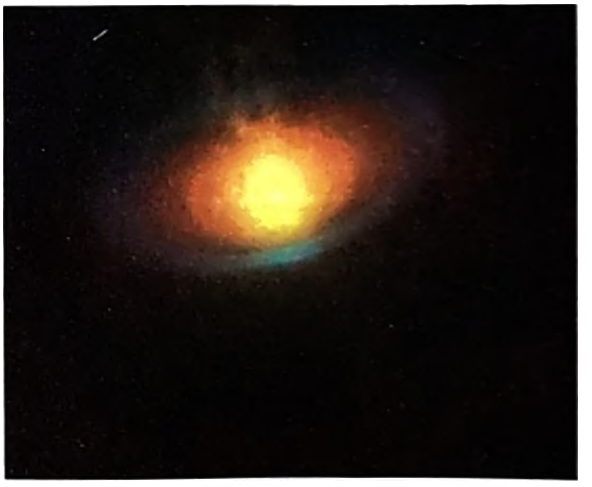
Evrendeki en sıcak yerlerden bazıları yeni oluşan yıldızların etrafındadır. Moleküler bulutların içindeki gaz bölgeleri, açısal momentumun korunmasıyla birleşip dönene kadar kendi kütleçekimsel çekimleri altında çökmeye başlar. Bu yeni oluşan yığılma diskinin merkezinde, materyal nükleer füzyonu ateşlemek için yeterli basınca ulaştığında bir yıldız oluşur. Yıldızın çevresinde ma-



(a) (b)

Şekil 9.3 Kara Bulut B68. Solda, ışığın toz tarafından nasıl gizlendiği birleşik bir görünür/kızıl-altı görüntüde görülüyor. Sağda, kızıl-altının bulutun içini görmek için nasıl kullanılabileceği, yalnızca kızıl-altı ışıkta sahte renkte görülmekte (Kaynak: ESO). (Kaynak: ESO).

teryaller toplanmaya başlar ve gezegenler oluşur (Bölüm 8). Uzak bir mesafedeki (yaklaşık 100 AB'ye kadar) materyal ön yıldız tarafından çekilir. Şekil 9.4, yaklaşık 176 ışık yılı uzaklıktaki Hydra takımyıldızında turuncu bir cüce yıldız olan TW Hydrae etrafındaki diskin bir resmini gösterir.



Şekil 9.4 Gökbilimcilerin yaklaşık 176 ışık yılı uzaklıktaki Hydra takımyıldızında bulunan TW Hydrae yıldızının etrafında oluştuğunu tespit ettikleri diski gösteren bir görsel (Kaynak: NASA / JPL-Caltech / T. Pyle, SSC / Caltech).

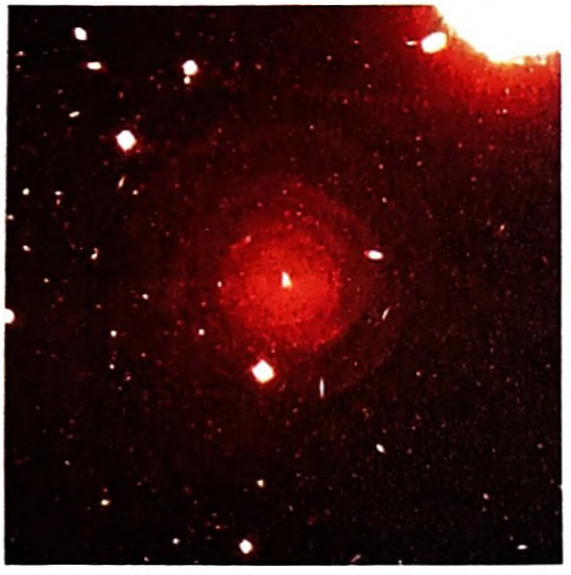
Ön gezegensel disk içinde büyük bir sıcaklık değişimi vardır. Dış diskin sıcaklığı düşüktür (10 K), ancak iç diskin sıcaklığı 10 AB'de yaklaşık 100 K ve 1 AB'de yaklaşık 1000 K'dir. Disk, yüksek sıcaklıklara ev sahipliği yapmasının yanı sıra, dağınık veya dev moleküler bulutlara kıyasla oldukça yoğundur. Tipik yoğunluklar yaklaşık 10^{16}–10^{21} m^{-3}'tür. Disk boyunca fiziksel koşullar da çeşitlilik gösterir. Moleküler gaz, dış diskteki toz taneciklerinde donar, ancak buzlar iç diskte buharlaşır. Tüm bu çeşitlilik, her tür bileşiğin farklı kimyasal koşullar altında sentezlenebildiği bir sera yaratır. Bir ön gezegensel diskinde meydana gelen kimyasal çeşitlilik tam olarak bilinmemektedir, ancak bunların, özellikle de sentezlenen materyal sistem içinde oluşmakta olan yeni gezegenlere yakın olacağından, karmaşık astrokimya için muhtemelen önemli

yerler olduğu açıktır. Yeni gezegenimsilerde yüzey kimyası için potansiyel bir dışsal bileşik kaynağı sağlarlar. Bir sonraki bölümde göreceğimiz gibi, bunun yaşanabilir gezegenlerde karbon bileşiklerinin oluşumu ve birikmesiyle özel bir alakası vardır.

Disk içindeki organiklerin üretimi, duman hattı* fikrine yol açmıştır. Duman hattı sıcaklıkları içeriye doğru, karmaşık organik bileşiklerin oluşması bakımından çok yüksektir ve bu bileşikler ısıl olarak bozunma eğiliminde olacaktır. Duman hattı dışındaki sıcaklıklar, karmaşık organik moleküllerin oluşması için yeterince düşüktür.

9.4.4 Karbon Bakımından Zengin Yıldızlar

Bazı yıldızlar karbon bakımından zengindir ve sonuç olarak karmaşık karbon moleküllerinin oluşumu için çok uygun yerlerdir. Şekil 9.5'te görülen IRC + 10216 (CW Leo) bu yıldızlara bir örnektir ve 390 ile 490 ışık yılı uzaklıktadır ('IRC'† adı Kızıl-altı Kataloğu ifade eder). Tipik bir karbon yıldızının içinde kimyasal reaksiyonların meydana gelebileceği, 15 km s^{-1} hızda genişleyen, uzun (yaklaşık bir ışık yılı) bir yıldız çevresi zarfı vardır. Bu zarf içinde, çoğunlukla doğrusal hidrokarbonlar olmak üzere yaklaşık 60 molekül tespit edilmiştir. Bir yıldızın içinde ışığın yayıldığı bölge olan yıldızın fotosferinin yakınında, kimyasal reaksiyonlar CO, N_2, HCN ve C_2H_2 gibi basit molekülleri üretirler.



Şekil 9.5 IRC + 10216 (CWLeo) –Çevresindeki zarfın izlerini gösteren karbon bakımından zengin bir yıldız (Kaynak: Izan Leao, Çok Büyük Teleskop).



Şekil 9.6 Süpernova patlamalarından gelen şok dalgaları. Burada, yaklaşık 20.000 ışık yılı uzaklıktaki 'Kepler süpernova' kalıntısının çoklu dalga boylu bir X-ışını, kızıl-altı ve optik derleme görüntüsü gösterilmektedir (Kaynak: NASA).

* [İng.] Soot line –çn.

† [İng.] Infra-Red Catalogue –çn.

9.4.5 Süpernova Patlamalarından ve Diğer Astrofiziksel Şiddetten Kaynaklanan Şok Dalgaları

Evren sessiz bir yer değil. Yeterli kütleye sahip yıldızlar süpernova olarak patlayarak yoğun ve çok şiddetli şok dalgaları oluştururlar. Evrendeki fiziksel koşullardaki bu hızlı düzensizlikler, kimyasal reaksiyonları harekete geçirmek için iyi olan türden dengesizlikler yaratmanın bir başka yoludur.

Süpernova patlamaları, yaklaşık 1 km^{-1} hızda süpersonik şok dalgaları oluşturabilirler. Bu şoklar, yıldızlararası ortamda gazı sıkıştırır ve ısıtır. Çok çeşitli şok türleri vardır (Şekil 9.6). J tipi şoklar, gazın yoğunluğunun dört ila altı kat artmasına ve yaklaşık 3000 K gaz sıcaklıklarına neden olabilir. Şok dalgası geçerken, gaz hızla soğur (yaklaşık birkaç on ila yüzlerce yıl içinde) ve soğudukça yoğunluğu daha da artar. Bu şoklarda üretilen ısı, daha karmaşık moleküller üreten nötr moleküller arasındaki endotermik kimyasal reaksiyonları (enerji gerektiren kimyasal reaksiyonlar) yönlendirmek için kullanılabilir.

9.5 Bileşikler Nasıl Oluştu?

Böylece moleküllerin oluşabileceği ve tespit edildikleri çeşitli ortamlar olduğunu görüyoruz. Bugüne kadar toplamda 300'ün üzerinde farklı molekül bulunmuştur.

Ama yıldızlararası uzaydaki çoğu yerin iki temel özelliği göz önüne alındığında bu kimya nasıl gerçekleşebilir?

1. *Düşük sıcaklıklar.* Sıcaklık düşük olduğunda, kimyasal reaksiyonların ısıl aktivasyonu için sınırlı bir potansiyel vardır. Sonraki bölümde daha ayrıntılı olarak inceleyeceğimiz Arrhenius ilişkisine aşinayız. Bu ilişki bize, sıcaklık ne kadar yüksek olursa kimyasal reaksiyon hızının o kadar hızlı olduğunu söyler. Yıldızlararası uzayın son derece düşük sıcaklıkları kimyasal reaksiyonları sınırlar ve bu problem evrenin çoğu yeri için geçerli görünmektedir. Bu fikrin bazı istisnalarını zaten daha önce gördük. Bir ön gezegensel diskin veya bir süpernova şok dalgasının içi çok yüksek sıcaklıklar oluşturabilir, ancak kesinlikle dev moleküler ve dağınık yıldızlararası bulutlarda, genellikle 100 K'nin altındaki sıcaklıklar, bize kimyaya hiç de elverişli olmayan fiziksel koşullar sunacaktır.
2. *Düşük basınçlar.* Bir kimya laboratuvarında, bir reaksiyonu başlatmak için bileşikleri birlikte eklemeye aşinayız, ancak bununla birlikte seyreltme problemlerine de aşinayız. Fazla miktarda suda seyreltilmiş iki reaktif kimyasalı birlikte eklersek, reaksiyonun ya çok yavaş gerçekleştiğini ya da hiç gerçekleşmediğini görürüz. Bazı muhteşem sonuçlar istiyorsak, bilim insanları olarak sezgisel biçimde, kimyasal bir reaksiyonu teşvik edecek belirli (ve oldukça yüksek) bir konsantrasyonda reaktifleri birlikte eklememiz gerektiğini biliyoruz. Başka bir deyişle, çarpışmaya dayalı aktivasyona ihtiyacımız var.

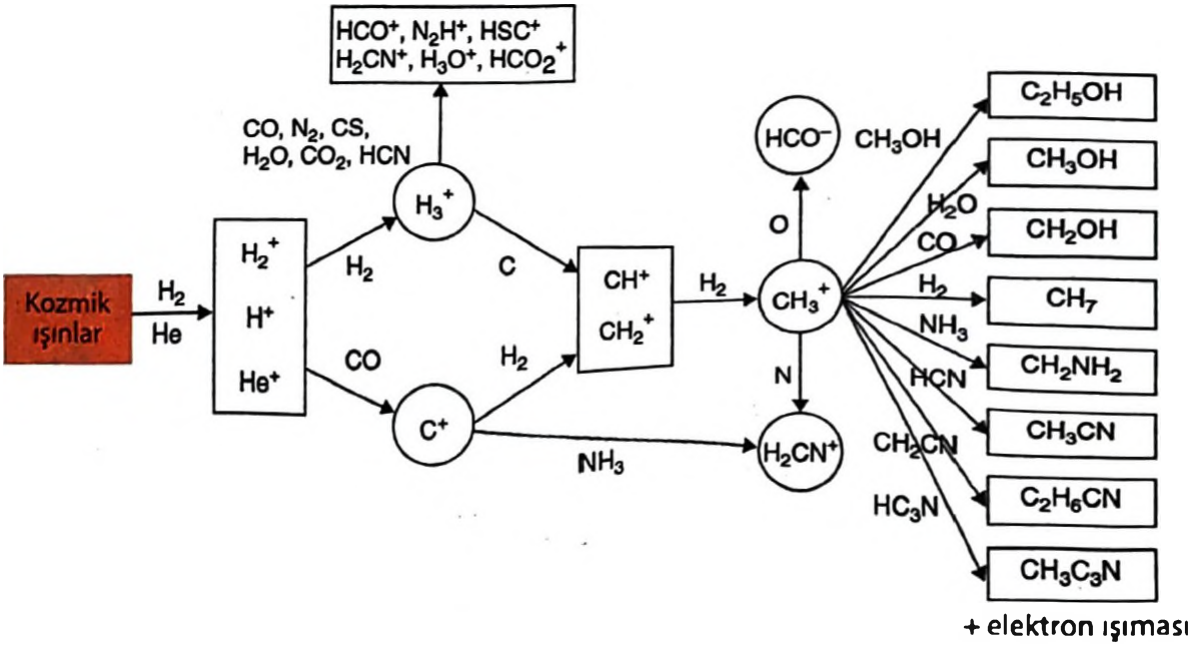
Uzaydaki düşük sıcaklıklar ve düşük basınçlar gibi sorunlara rağmen, kimya bu ortamlarda sahip olduğumuz tek bir şey tarafından yönlendirilebilir: yüksek radyasyon.

Proton, nötron ve demir gibi ağır elementlerin iyonlarından oluşan kozmik ışınlar, hidrojen ve helyumu iyonize edebilir. Örneğin yıldızlardan gelen morötesi radyasyonla fotoiyonizasyon, daha sonra karmaşık kimya ağlarına yol açan karbon iyonları da oluşturabilir. morötesi radyasyonu, temelde komşu yıldızlardan gelen Lyman α fotonlarından (122 nm) veya bulutlardaki materyal ile galaktik kozmik ışın etkileşimlerinin ikincil ürünü olarak üretilen UV fotonlarından oluşur.

Hidrojen, helyum ve karbonu kozmik ışınlarla bombardıman ederek veya bunları fotoiyonizasyona tabi tutarak, aşağıda gösterildiği gibi gaz fazında iyonlar üretebiliriz:

$$H + Cr \rightarrow H^{\bullet} + e^{-}$$
$$H_2 + cr \rightarrow H_2^{\bullet} + e^{-}$$
$$He + cr \rightarrow He^{\bullet} + e^{-}$$
$$C + v \rightarrow C^{\bullet} + e^{-}$$

burada 'cr' kozmik ışınlar anlamına gelir ve v ise UV radyasyonuyla fotoiyonizasyondur. Bu iyonlar daha sonra karbon içeren şaşırtıcı derecede karmaşık bazı kimyasal reaksiyonlar üreten ve sonuçta siyanür, alkol ve azotlu karbon bileşiklerini oluşturan reaksiyonları yürütmeye devam edebilir. Şekil 9.7'de, hidrojen ve helyumun kozmik ışınlarla ışımasıyla başlayan, karbon moleküllerinin oluşumu için bazı örnek reaksiyon şemaları gösterilmektedir.



Şekil 9.7 Hidrojen ve helyumun kozmik ışınlarla ışınlanmasının yol açtığı yıldızlararası ortamdaki çok çeşitli reaksiyonların bazı örnekleri. Oklar reaktanları, kutular ve daireler ise ürünleri gösterir.

Uzayda su oluşumu bile kozmik ışın etkileşimleriyle gerçekleşebilir, ancak oluşum yolları oldukça karmaşıktır. Aşağıda bir dizi reaksiyon gösterilmektedir.

$$H^2 + \text{kozmik ışıma} \rightarrow H_2^{\bullet} + e^-$$
$$H_2^{\bullet} + H_2 \rightarrow H_3^{\bullet} + H$$
$$H_3^{\bullet} + O \rightarrow OH^{\bullet} + H_2$$
$$OH_n^{\bullet} + H_2 \rightarrow OH_{n+1}^{\bullet} + H$$
$$OH_3^{\bullet} + e^- \rightarrow H_2O + H;\ OH + 2H, \text{ vb.}$$

Bu reaksiyonlara astrobiyolojik açıdan bakmak ilgi çekicidir çünkü hidrojeni kozmik ışınlarla ışınlayarak ve sonra onu basit oksijen iyonlarıyla reaksiyona sokarak, yıldızlararası ortamda oluşan yaşam çözücüsünü nasıl elde edebileceğimizi görebilirsiniz. Bölüm 3'te tartıştığımız gibi, su evrende bol miktarda bulunur.

Dikkat çekici bir örnek, Güneşten 20 milyar kat daha büyük bir kara deliği barındıran, 12 milyar ışık yılı uzaklıkta bulunan Kuasar APM 08279 + 525'tir ('APM'', astronomik görüntü plakalarını incelemek ve bu cismi bulmak için kullanılan bir tesis olan Otomatik Plaka Ölçüm Tesisi anlamına gelir.). Cismin çok miktarda su ürettiği gösterilmiştir. Dünya okyanuslarındaki tüm suyun 140 trilyon katına eşit olan su, cismin etrafını sarar.

Bu derlenen gözlemler, suyun yaşamın çözücüsü olarak belki de dikkat çekici ve olağanüstü bir şey değil, astrokimyanın oldukça mantıklı bir sonucu olduğunun altını çiziyor. Bu gözlemlere dayanarak suyun, evrenin herhangi bir yerindeki yaşam için olası bir çözücü olacağını tahmin edebiliriz, çünkü çok kolay ulaşılabilir, çok bol ve deneysel gözlemden biliyoruz ki yaşam için çok iyi bir çözücü.

9.6 Yıldızlararası Tanecikler

Uzayda gaz fazında gerçekleşebilecek çok çeşitli reaksiyonlar hakkındaki bu etkileyici bilgiye rağmen, hala büyük bir sorun var. Gaz fazı kimyası, uzayda gözlemlenen moleküllerin bolluğunu, özellikle de birçok karmaşık molekülü öngöremez veya açıklayamaz. Bileşiklerin üretimi için başka bir mekanizma meydana gelmelidir. Artık gaz fazı reaksiyonlarına ek olarak, yıldızlararası silikat ve buz tanelerinin karmaşık moleküllerin oluşumu için önemli yerler olabileceği düşünülüyor.

Yıldızlararası tanecikler, silikat çekirdekli küçük tanecikler veya buz kaplamalı karbon açısından zengin çekirdeklerdir. Şekil 9.8, tipik bir yıldızlararası taneciğin yapısını göstermektedir. Bu tanecikler astrokimyasal reaksiyonlar için ihtiyaç duyulan çok önemli üç özelliği karşılar: (i) Reaktanların yıldızlararası ortama göre çok daha yüksek konsantrasyonlarda toplanabileceği bir yüzey sağlarlar, (ii) reaktanların ışıyabileceği ve/veya diğer reaktanlarla temasa

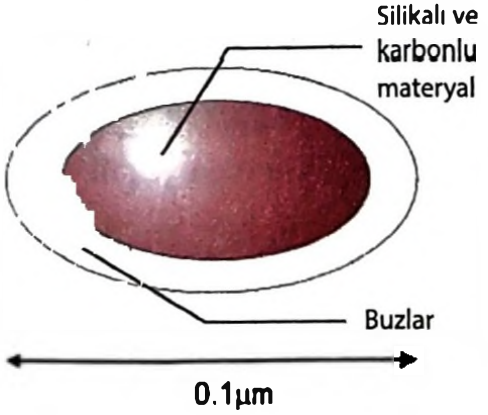
---

• [İng.] Automatic Plate Measuring Facility –çn.

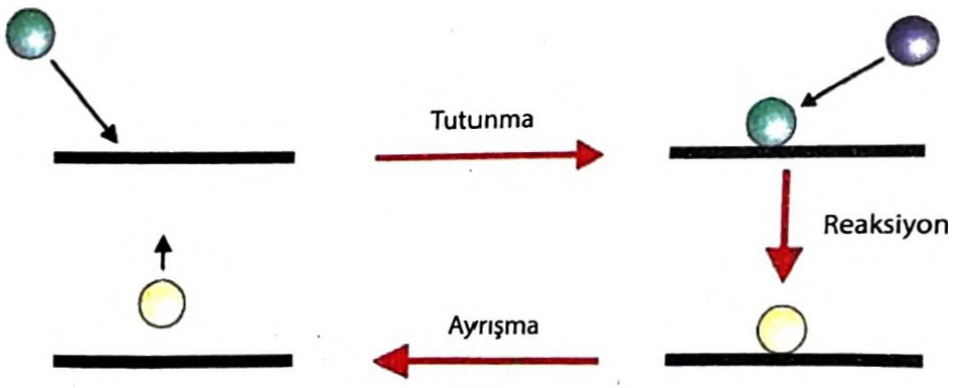
geçebileceği bir yüzey sağlarlar ve (iii) oluşan ürünler taneciklerin üzerlerinde toplanabilir ve sonraki reaksiyonlarda kullanılabilirler.

Yıldızlararası taneciklerin buzlu kenarlarında meydana gelebilecek çeşitli reaksiyonlar öne sürümüştür. Burada kısaca değineceğimiz üç ana tür vardır:

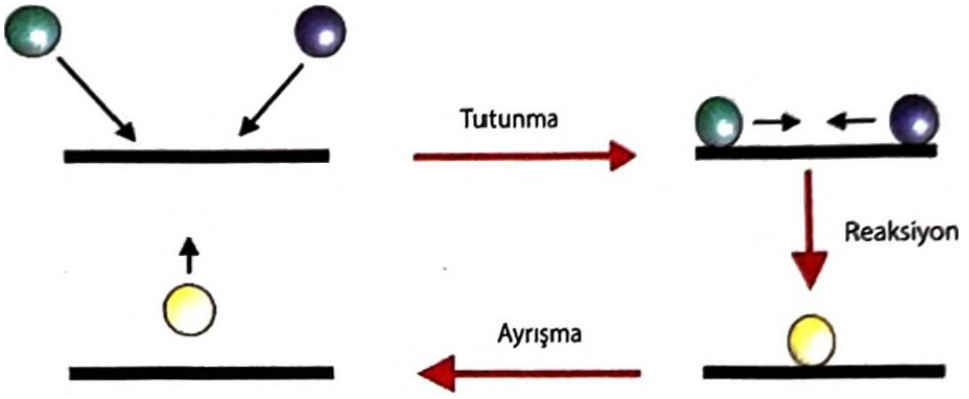
1. *Eley–Rideal reaksiyonları.* Burada sadece bir molekül veya atom, taneciğin yüzeyine bağlanır ve daha sonra yüzeyden ayrıştırılabilecek bir ürün oluşturmak için gaz fazında kalan bir molekül veya atomla reaksiyona girer (Şekil 9.9).
2. *Langmuir–Hinshelwood reaksiyonları.* Burada iki molekül birden taneciğin yüzeyine bağlanır ve sonra, örneğin, yüzey boyunca yayılarak, reaksiyona girerek ve ayrışabilecek bir ürün oluşturarak temasa geçer. (Şekil 9.10).
3. *Sıcak atom reaksiyonu.* Sıcak atom reaksiyonu, Eley–Rideal reaksiyonundan farklı değildir. Bu durumda, gaz fazından gelen bir atom, halihazırda soğurulmuş bir atomun yanına iner ve yüksek enerjiye (dolayısıyla 'sıcak atom'a) sahip olduğu için yüzey boyunca hareket edebilir, böylece onunla reaksiyona girer (Şekil 9.11).



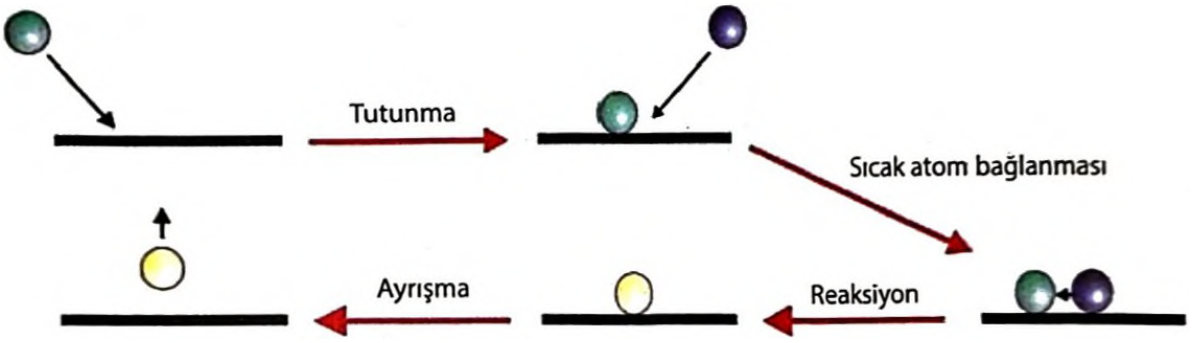
Şekil 9.8 Üzerinde kimyasal reaksiyonların gerçekleşebileceği donmuş uçucularla (buzlar) çevrili silikalı ve karbonlu materyalin çekirdeğini gösteren yıldızlararası bir taneciğin tipik yapısı (Kaynak: Charles Cockell).



Şekil 9.9 Eley–Rideal reaksiyonları (Kaynak: Charles Cockell).



***Şekil 9.10** Langmuir-Hinshelwood reaksiyonları* (Kaynak: Charles Cockell ve NASA).



***Şekil 9.11** Sıcak atom reaksiyonu* (Kaynak: Charles Cockell).

9.7 Karbon Bileşikleri Oluşturmak

Bölümün başında gözlemlediğimiz gibi, uzayda meydana gelen tüm kimyaların arasında, karbon bileşiklerinin oluşumu astrobiyologlar için en büyük ilgi konusudur. Karbon bileşiklerini inceleyerek, şekerler ve amino asitler gibi yaşamın yapı taşlarının uzayda sentezlenip daha sonra erken Dünyaya ulaşıp ulaşamayacağı ve uzaydaki karbon bileşiklerinin çeşitliliğinin ne olabileceği hakkında fikir edinebiliriz.

Öncüller oluştuktan sonra, potansiyel olarak prebiyotik moleküllerin öncülleri olan daha karmaşık karbon bileşikleri üretilebilir. Bu reaksiyon yolakları (Şekil 9.7'de yer alanlar da dâhil) kendileriyle ilişkili çeşitli isimlere sahiptir. İşte daha karmaşık karbon moleküllerine ve özellikle birden fazla karbon içeren bileşiklerin oluşumuna yol açabilecek çeşitli karbon reaksiyonlarından sadece birkaçı:

1. Karbon ekleme

$$C^+ + CH_4 \rightarrow C_2H_3^+ + H \rightarrow C_2H_2^+ + H_2$$

2. Yoğunlaşma

$$C_2H_2^+ + C_2H_2 \rightarrow C_3H_4^+ + H$$

3. Nötral–nötral reaksiyonlar

$$C + C_2H_2 \rightarrow C_3H + H$$

4. Atomik ekleme

$$N + C_3H_3^{\bullet} \rightarrow HC_3NH^{\bullet} + H$$

5. Radyasyon ilişkisi

$$CH_3^{\bullet} + H_2O \rightarrow CH_3OH_2^{\bullet} + h\nu$$

Birden fazla karbon atomuna sahip bileşiklere giden son yollar hala tam olarak anlaşılmamıştır ve uzayda gözlemlenen karbon bileşiklerinin çeşitliliği laboratuvarda sentezlenmemiştir. Bununla birlikte, yukarıdaki reaksiyonlar bize potansiyel kimyasal süreçler hakkında bir fikir verir.

Formaldehit, yıldızlararası ortamda tespit edilen ilk organik moleküldü. En yaygın moleküllerden biri, yıldızlararası bulutları haritalamak için kullanılacak kadar bol olan CO'dur.

Bu reaksiyon şemaları, CO gibi basit olanlardan şu anda uzayda gözlemlenen daha karmaşık bileşiklere kadar çok çeşitli karbon molekülleri üretir. Tablo 9.1'de tanımlanmış olduğu düşünülen gaz fazı karbon içeren moleküllerin sadece bir kısmını görebilirsiniz.

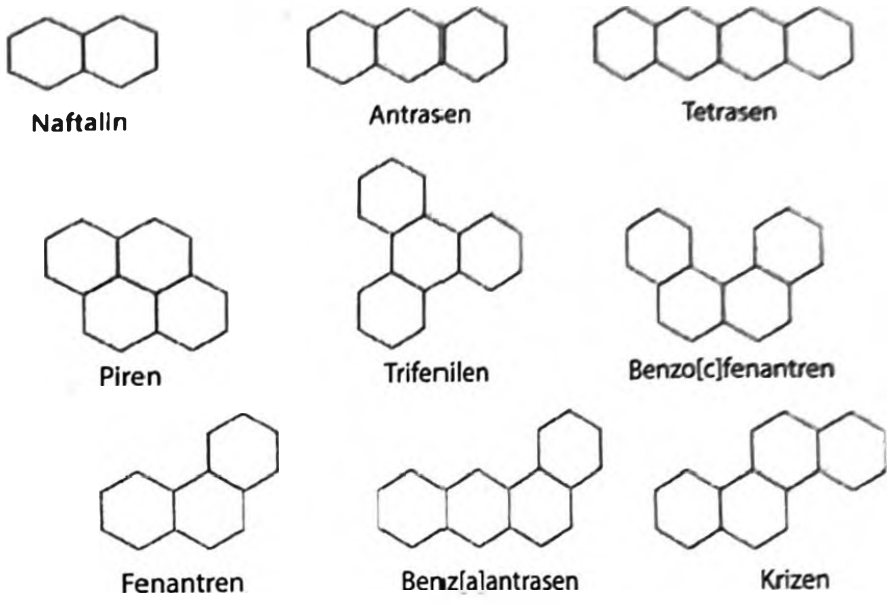
Tablo 9.1 Daha karmaşık PAH'lar ve diğer karbon bileşikleriyle bir karşılaştırma sağlayan, uzayda farklı bölgelerde gözlemlenen sadece 25 gaz fazlı karbon molekülü için kimyasal formüllerin bir seçimi (Şekil 9.12). Bu formüller, moleküllerin çeşitliliğini gösterir ve yaşamın temel elementlerini içeren karbon bileşiklerinin örneklerini sağlar: C, H, N, O, P, S.

CH_4	CO	CO_2	HC_8CN	C_3S
CH_3SH	C_2H_5CN	CSi	$(CH_2OH)_2$	HNCO
CH_3CN	CH_3COOH	CP	NH_2CN	C_2S
C_4H_2	HC_4CN	CH_3NH_2	HCOOH	SiC_3
CN	HC_6CN	CH_3CHO	C_3O	HNCS

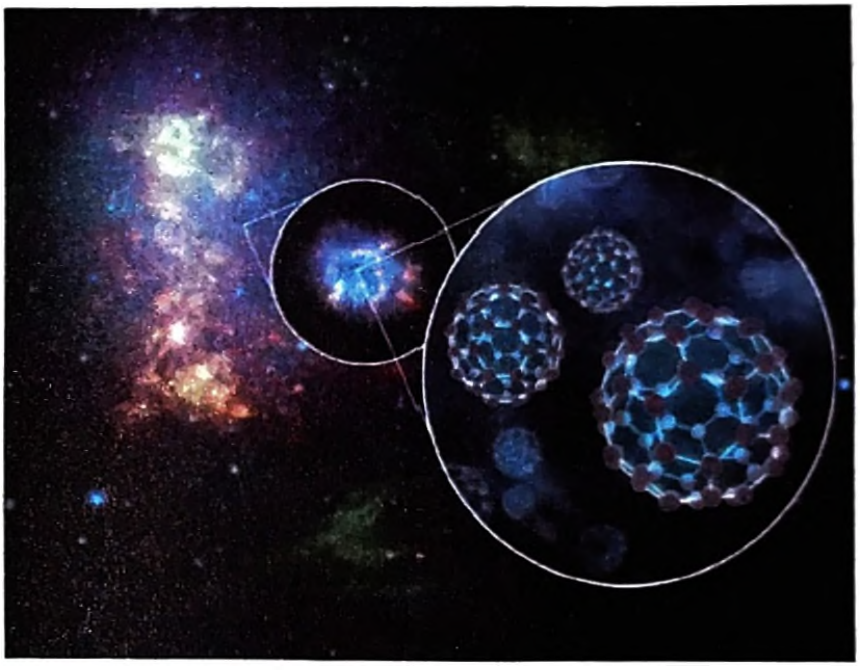
9.8 Polisiklik Aromatik Hidrokarbonlar

Uzayda gözlemlenen önemli karbon bileşiği sınıflarından biri **polisiklik aromatik hidrokarbonlardır** (PAH*'lar). Bunlar, çoğunlukla karbon halkalarından veya aromatiklerden oluşan kararlı bileşiklerdir (Şekil 9.12). Gökadadaki tüm karbonun yaklaşık %10-15'ini oluştururlar. Genellikle UV radyasyonuna dirençli oldukları için Dağınık Yıldızlararası Bulutlarda var oldukları düşünülmektedir. Göktaşlarında çok yaygındırlar ve bunun ön gezegensel diskindeki sentezin bir sonucu olduğunu varsayarsak, bu durum, bu bileşiklerin gezegen ve yıldız oluşum bölgelerindeki dağılımını açıklayabilir.

* [İng.] Policyclic Aromatic Hydrocarbons –çn.



(a)



(b)

*Şekil 9.12 (a) Aromatik yapılardan nasıl bir araya geldikleri gösterilen polisiklik aromatik hidrokarbonların bazı örnekleri. (b) Küçük Macellan Bulutunda bucky küreleri**'*nin* (C_{60}) *keşfini gösteren bir şekil* (Kaynak: NASA).

PAH'lar, kimyasal reaksiyonlarda dönüştürüldüğünde, kızıl-altı imzalarını kaybetme eğilimindedir ve yıldızlararası buz taneciklerinde tespit edilememelerinin, taneciklerin yüzeyinde karmaşık kimyasal reaksiyonlara girmelerinden kaynaklandığı öne sürülmüştür.

* Son derece kararlı, top şeklinde bir karbon molekülü –çn.

Erken biyokimyada PAH'ların rolü gösterilmemiştir. Birçoğu oldukça hareketsizdir. Bununla birlikte, oksidatif koşullar altında, biyolojik moleküllerin öncüsü olabilecek kinonlar ve diğer organik bileşikleri oluşturmak için reaksiyona girebilirler. Kinonlar, yaşamda enerji kazanımıyla ilgilidir. PAH'ların UV ışınlaması altında fotokimyasal dönüşüme uğradıkları bilinmektedir. Örneğin, bir PAH olan piren, fosfolipid zarlara dâhil edildiğinde, ışınlandıktan sonra elektronları serbest bırakabilir. Bu, olası bir erken ışık enerjisi yakalama mekanizması olarak önerilmiştir. PAH'lar ayrıca nükleik asitler gibi diğer moleküllerin oluşumu için moleküler yapı iskelesi görevi görebilir ve bu nedenle eylemsiz yapıları, erken biyokimyada onlar için potansiyel olarak bazı ilginç rolleri gizleyebilir.

9.9 Daha Fazla Karbon Çeşitliliği

PAH'lar karmaşık moleküllerdir, ancak karbon makromoleküllerinin büyüklüğü açısından hiçbir şekilde hikâyenin sonu değildir. C_{60} yapısına sahip olanlar da dâhil olmak üzere karbon 'bucky küreleri' ilk olarak Tc-1 bulutsusunda gözlemlendi ve NASA'nın Macellan Bulutlarındaki Spitzer Uzay Teleskobu tarafından tespit edildi (Şekil 9.12). C_{60} bucky küresi, 20 altıgen ve 12 beşgenden oluşan, bir futbol topunu andıran kafes benzeri bir kaynaşmış halka yapısına sahiptir. Karbon tüpler, aromatikler ve diğer karıştırılmış, spesifik olmayan karbon tabakalarından oluşan ilginç karbon soğanı yapıları ve basitçe 'kurum' olarak tanımlanabilecek aromatik zincirler gözlemlendi veya kızıl-altı gözlemleri açıklamak için önerildi.

9.9.1 Prebiyotik Bileşikler

Henüz yıldızlararası ortamda prebiyotik bileşiklere dair kesin bir kanıtımız yok. Yıldızlararası ortamda glisin tespiti konusunda tartışmalı bir iddia olmasına rağmen, bu iddia sürdürülemedi.

Kopenhag Üniversitesindeki gökbilimciler, Bölüm 11'de tartışılacak olan şeker oluşturan formoz reaksiyonunda yer alabilen şeker molekülü glikolaldehitin tespitini bildirdi. Molekül, Dünyadan 400 ışık yılı uzakta bulunan ikili sistem IRAS 16293–2422'de bulundu (IRAS,* Kızıl-altı Astronomik Uyduya atıfta bulunur).

Göktaşlarında amino asitlerin, şekerlerin ve hatta nükleobazların varlığı, bu moleküllerin ön gezegen disklerinde oluşabileceğini düşündürür. Bu, moleküler bulutlar veya karbon bakımından zengin yıldızlar gibi diğer yıldızlararası ortamlarda bulunup bulunamayacakları ve evrendeki karbon kimyasının her yerde bulunan bileşenlere sahip olup olmadıkları sorusunu akla getiriyor.

Yıldızlararası tanecikler üzerinde oluştuğu varsayılan Sagittarius yıldız oluşum bölgesinde *izo*-propil siyanür tespiti, bu alkil molekülünün dallı karak-

* [İng.] Infra-Red Astronomical Satellite –çn.

terlstiğinin göktaşlarında bulunan amino asitlerin dallı özelliklerine benzer olması nedeniyle yıldızlararası ortamda amino asit üretimi olasılığını artırmaktadır (Bölüm 11).

Odak Noktası: Astrobiyologlar. Sun Kwok



Ne üzerine çalışıyorsunuz? Yıldız evriminin son aşamalarında organik bileşiklerin sentezi.
Nerede çalışıyorsunuz? Hong Kong Üniversitesi, Hong Kong, Çin
İlk uzmanlık alanınız neydi? Fizik
Hangi bilimsel sorularını ele alıyorsunuz? Uydu tabanlı teleskopları kullanarak, ölümlerinden hemen önce eski yıldızlar tarafından sentezlenen karmaşık organik moleküllerin titreşimsel hareketinin ürettiği kızıl-altı tayfı gözlemliyorum. Evrimin son evrelerinde ölmekte olan yıldızları inceleyerek, asetilen gibi basit moleküllerden benzene ve ardından karışık aromatik-alifatik yapılara sahip karmaşık organiklere kimyasal sentez sırasını belirleyebiliriz. Bu karmaşık organikler yıldızlararası ortama fırlatılır ve ilkel Güneş Sistemini Dünyadaki yaşamın kökeni için olası imalarla zenginleştirmiş olabilir.
Astrobiyoloji konusunda sizi ne heyecanlandırıyor? En çok astrobiyolojinin disiplinler–arası doğası beni heyecanlandırıyor. Resmi eğitimim fizik alanında olmasına ve araştırmalarımın çoğu astronomi üzerine olmasına rağmen, astrobiyoloji araştırmalarım beni organik kimya, biyokimya, jeoloji ve gezegen bilimi okumaya sevk etti. Geleneksel disiplin sınırlarını aşan araştırmanın bilimde büyük atılımlara yol açma potansiyeline sahip olduğuna inanıyorum.

9.10 Kuyruklu Yıldızlar

Evrendeki organik materyal hakkında eve daha yakın cisimlerden de veri toplayabiliriz. Kuyruklu yıldızlar, gökbilimci Fred Whipple'ın (1906–2004) ünlü ifadesiyle çoktan 'kirli kartopu' olarak anlaşılıyor. Yaklaşık 20.000–100.000 AB uzaklıkta ve toroid şekilli **Kuiper Kuşağında** (Neptün'ün yörüngesinin ötesinde) küresel şekilli bir cisim rezervuarı olan **Oort bulutunda** bulunurlar. Sayılarına ilişkin tahminler büyük ölçüde değişiyor. Oort bulutunda bunlardan en fazla 10^{14} adet ve Kuiper Kuşağında çapı 1 km'den fazla olan potansiyel olarak 1–10 milyar cisim olabilir. Su buzu, organikler ve diğer uçucu maddelerden oluşan bileşimleri, tipik olarak 0,5–0,9 g cm^{-3} düzeyinde olan düşük yoğunluklarıyla doğrulanır. Kuyruklu yıldızların tümü aynı değildir ve farklı kuyruklu yıldız cisimlerinde bulunabilecek moleküllerin bolluğunda çeşitlilik olabilir.

Kuyruklu yıldızlar, iç Güneş Sistemine girerler ve Güneşten ışınımla ısınma altında buharlaşırken, karakteristik çift plazma ve toz kuyruklarıyla Dünyadan

gözlemlenebilirler. Bu kuyruklu yıldız toz partiküllerinden bazıları stratosferik Gezegenler Arası Toz Partikülleri (IDP*'ler) olarak üst atmosferde toplanabilir. Hale–Bopp'un gözlemleri ve Halley Kuyruklu Yıldızının doğrudan gözlemleri bilim insanlarına, ne içerdiklerine dair oldukça iyi bir fikir verdi. CO ve CO_2, kükürt içeren türler, formaldehit, amonyak ve diğer türlerin %1 veya daha az miktarda olduğu en bol buzlardır. Kızıl-altı bölgede metan, etan ve asetilen gözlemlenmiştir. Şekerin öncüsü olan formaldehit H_2CO'nun varlığı da astrobiyoloji için önemlidir.

Kuyruklu yıldızlar ayrıca bir dizi organik madde içerir. Avrupa Uzay Ajansının Giotto uzay aracı 1986'da Halley Kuyruklu Yıldızının yanından geçtiğinde, silikat taneleri ve organik madde tespit etti. Bu atomlara sahip moleküllerin görünüşte yüksek bolluğu nedeniyle bu taneler bazen CHON taneleri olarak adlandırılır. Onaylanmış moleküller arasında formik asit, izosiyanik asit, metil siyanür ve diğerleri bulunur. Kuyruklu yıldız çekirdeklerindeki koyu renkli materyal, karmaşık organik materyali temsil eden amorf karbon materyali içerebilir. Halley Kuyruklu Yıldızı PUMA kütle spektrometresi, en az 160 moleküler ağırlığa kadar büyük moleküler kütlelere sahip bileşikler gösterdi. Geçici yorumlara benzen, toluen ve önemli ölçüde adenin iddiaları dâhil edildi.

9.11 Kiralite

Yıldızlararası ortam, yalnızca yeni bileşiklerin doğduğu yer değil, aynı zamanda yaşamda gözlemlenen diğer kimyasal özellikler için ortam da sağlayabilir. Bölüm 3'te tartıştığımız gibi astrobiyolojinin kalıcı gizemlerinden biri, kiralitenin nasıl ortaya çıktığıdır. Yaşam biyokimyasında neden ağırlıklı olarak solak amino asitleri kullanıyor?

Bu bölümde daha önce sözü edilen Orion Bulutsusunun gözlemi, dairesel polarize kızıl-altı radyasyonun varlığını göstermektedir –diğer bir deyişle tercih edilen bir yönde döndürülmesi. Bu radyasyonun varlığı, dairesel polarize UV radyasyonunun da mevcut olabileceğini düşündürmektedir. Bir molekülün farklı enantiyomerleri, belirli bir polarize çeşidin ışığını alma eğilimindedir, bu nedenle L ve D olarak tanımlanırlar –bunlar, dalgaları bir yönde hizalanmış olarak hareket eden ışığın her birinin dönme eğiliminde olacağı yöne bir referanstır. Yıldızlardan polarize UV radyasyonu üretilirse, tercihen bir enantiyomer tarafından soğurulabilir ve bu süreçte onu seçici olarak yok edebilir ve diğer enantiyomerin fazlalığını bırakabilir. Bu fikir henüz kanıtlanmadı.

İlk hafif enantiyomerik fazlalığın yıldızlararası ortamda üretilmesi, sonunda yaşamın içine hapsolması ve karasal kimyaya hakim olduğunu gözlemlediğimiz L–amino asitler ve D–şekerlerin ortaya çıkması mümkün müdür? Göktaşlarındaki amino asitlerde kesinlikle hafif bir solak fazlalığı rapor

* [İng.] Interplanetary Dust Particles –çn.

edilmiştir. Yaşamın erken dönemlerine böyle bir fazlalık dâhil edilirse, tüm biyokimyasal reaksiyonlarda yalnızca tek bir tutarlı kiral form kullanarak yaşamın daha iyi işlemesi beklendiğinden, bunun daha da artması için bir eğilim olacağını hayal edebiliriz. Biyokimyasal reaksiyonlar büyük ölçüde moleküler tanımaya bağlıdır. Proteinlerde ve diğer moleküllerde L– veya D–amino asitlerin kullanımındaki tutarlılık, bağlanma bölgelerinin ve moleküller arası tanımanın da kiral olarak tutarlı olduğu biyokimyayla sonuçlanma eğiliminde olacaktır.

Kiral büyümeyi başarılı bir şekilde gösteren çeşitli deneyler vardır. Belirli protein sarmalları, kimyasal olarak polimerize edildiklerinde bir enantiyomeri diğerine tercih etme eğilimindedir. Ürünün reaktandan daha kiral olduğu katalitik reaksiyonlar gözlenmiştir. Bazı bileşiklerin polimerizasyon oranları, kiral bir tercih olduğunda artırılabilir. Dolayısıyla, biyolojik evrime ek olarak, kiral fazlalıkları olan erken kimyaların tek bir enantiyomerde saflaştırılması için kimyasal yöntemler olabilir.

9.12 Laboratuvar Deneyleri

Gelişmekte olan bir astrokimya alanı, laboratuvarda deneyler yapmaktır. Bu çabalar, buzların biriktirilebildiği soğuk bir aşamaya sahip bir vakum odasından yararlanmaktadır. Amonyak veya su buzları gibi tanımlanmış bileşimlerin karışımlarından yapılan bu buzlar daha sonra UV ışını veya protonlar veya ağır iyonlar gibi çeşitli iyonlarla ışınlanır ve elde edilen ürünler analiz edilir. CH_3OH, NH_3 veya CO'dan oluşan buzların UV ışıması, amino asit glisin yanı sıra asetamid, gliseramid ve çeşitli diğer karbon bazlı ürünlerin oluşumuyla sonuçlanır. Ağır kısımda, PAH'lar ve siklik bileşikler tespit edilmiştir.

Ayrıca, buz ışıması deneyleri, asit hidrolizi altında alanin, prolin ve valin gibi bir dizi amino asit üreten heksametilentetramin (HMT) üretimiyle sonuçlanır, ancak bu amino asitlerin yıldızlararası ortamda veya kuyruklu yıldızlarda üretilme derecesi bilinmemektedir.

He^+, N^+ veya Ar^+ iyonları dâhil yüklü partiküllerle ışınlama benzer şekilde iyonla üretilen hidrojenlemiş amorf karbon olarak adlandırılan karmaşık organik materyal üretir. HMT de bu koşullar altında sentezlenir. Bu deneylerin sonuçları, şaşırtıcı olmayan bir şekilde, kullanılan buz bileşimlerine bağlıdır, ancak genel olarak, yıldızlararası taneciklerin ve kuyruklu yıldızların yüzeylerinin, bazıları prebiyolojik öneme sahip olan karmaşık organik materyale yol açan, radyasyonla organik işlemenin meydana geldiği ortamlar olduğu sonucuna varılabilir. Bu, yıldızlararası ortamın, erken Dünyada birikmiş olabilecek karmaşık organik moleküllere yol açan bir yer olduğu genel görüşünü doğrular.

Tartışma Noktası: Laboratuvarda yıldızlararası koşulların kopyalanması

Astrokimyanın zorluklarından biri, laboratuvarda yıldızlararası koşulları tekrarlamaktır, böylece gaz fazı ve yıldızlararası tanecik kimyasal reaksiyonları daha ayrıntılı olarak incelenebilir (Şekil 9.13). Bilim insanları, hangi bileşiklerin, hangi bollukta oluştuğunu ve uzayda gözlemlenen bileşiklerin karmaşıklığına yol açmak için nasıl etkileşime girdiklerini bilmek isterler. Şimdiye kadar araştırmalar, buzlar temsili yıldızlararası koşullar altında ışınlandığında, amino asitler de dâhil olmak üzere çeşitli bileşiklerin oluştuğunu göstermiştir. Bu görevdeki zorluklar, yıldızlararası ortamdaki basınç ve sıcaklık koşullarını ve kimyasal türler üzerinde etkili olabilecek çeşitli radyasyon kaynaklarını yeniden üretmeyi içerir.



Şekil 9.13 Laboratuvarda astrokimyasal ortamların ışınlanması ve temsili için bir düzenek. Resim, Hawaii Üniversitesi W.M. Astrokimya Keck Araştırma Laboratuvarındaki ana odayı göstermektedir (Kaynak: Hawaii Üniversitesi).

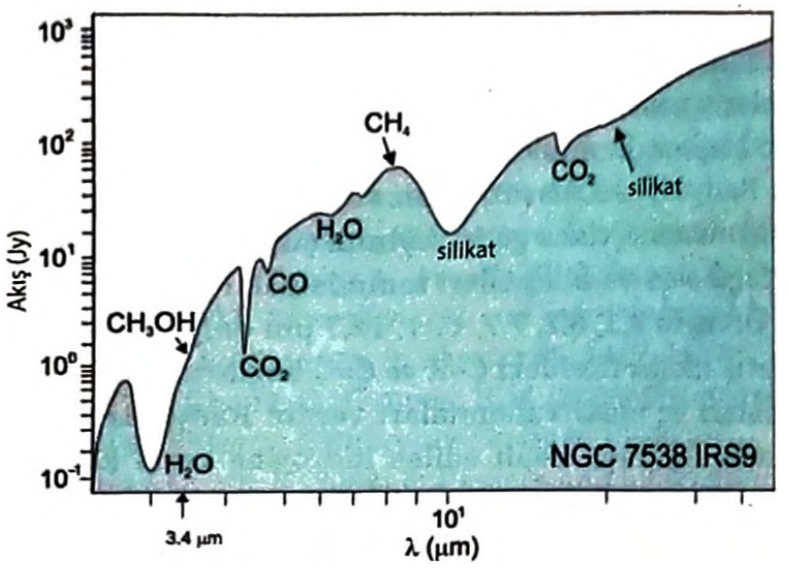
Laboratuvar simülasyonları kullanarak astrokimyasal koşulları anlamaya çalışmakla ilgili olabilecek hangi zorlukları listeleyebilirsiniz? Hangi teknik çözümler olabilir ve laboratuvar tabanlı çalışmaların yıldızlararası ortamdaki koşulları yeniden yaratmaya çalışırken neden olabileceği belirsizlik türlerini listeleyebilir misiniz? Bu bileşikleri doğrudan gözlemleme girişimlerine kıyasla laboratuvar tabanlı yöntemlerin avantajları nelerdir?

Smith, I.W.M. (2011) Laboratory astrochemistry: gas phase reactions. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **49**, 29–66.

9.13 Bu Molekülleri Gözlemlemek

Bilim insanları astrokimyadaki bu ilgi alanlarını nasıl gözlemliyorlar? Bu sorunun cevabı, ne gözlemlemek istediğimize bağlı. Tartışmakta olduğumuz molekülleri tespit etmek için iki yaklaşım vardır –soğurma ve yayınım spektroskopisi. Bu yöntemlerin arkasındaki ilkeler Bölüm 2'de tartışılmaktadır.

Soğurma spektroskopisi. Atomlar veya moleküller radyasyonu emdiklerinde, esasen belirli dalga boylarında enerjinin ışığını 'çalarlar', bu da bir molekül tarafından emilir ve tayfta düşüşlere neden olur. Çukurlar veya oluklar belirli bir moleküle oldukça spesifiktir ve bu nedenle bir molekülün tanısal özelliği,



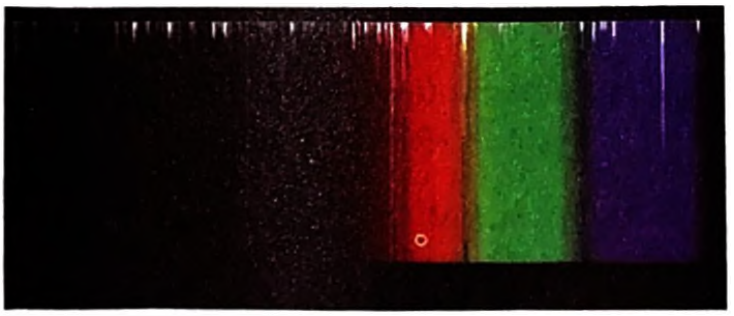
Şekil 9.14 Moleküler gaz bulutu NGC 7538 IRS9 için bir soğurma tayfı. Akış birimi, 10^{-26} Wm^{-2} Hz^{-1}'e eşdeğer SI olmayan bir birim olan jansky (Jy)'dir Soğurma özellikleri, CO_2 ve H_2O gibi katı veya buzlara atfedilir.

eğer isterseniz o molekülün veya molekül koleksiyonunun parmak izi olarak kullanılabilir. Şekil 9.14'te bir örnek gösterilmektedir ve devasa ön yıldız NGC 7538 IRS9 (NGC*, Yeni Genel Kataloğa atıfta bulunur) etrafındaki moleküler gaz bulutundaki katıları ve buzları göstermektedir.

Buluttaki bir dizi molekülü geçici olarak tanımlayabileceğimizi görebilirsiniz. Cihaz ne kadar güçlü olursa, çözünürlük o kadar iyi ve tayfın yapısı o kadar ince olur. Yapı ne kadar ince olursa, çeşitli molekülleri çözme ve ne olduklarını belirleme şansımız o kadar artar.

Kullanışlı bir özelliğe iyi bir örnek olarak, C–H bağlarının özelliği olan 3,4 μm soğurma özelliği verilebilir (Şekil 9.14). Gökada özeğinde, gökadanın dışında ve göktaşlarında organik karbon varlığının parmak izi olarak gözlemlenebilir.

Soğurma spektroskopisi kullanılarak gözlemlenen en karışık özellikler Dağınık Yıldızlararası Bantlardır (DIB'ler; Şekil 9.15). 300'den fazla gözlemlenmiş ve birbirleriyle korelasyon göstermemeleri, farklı moleküllerden oluştuklarını düşündürmektedir. Bu soğurma özelliklerinin taşıyıcılarının doğası kesin olarak karakterize edilmemiştir, ancak olası adaylardan biri PAH'lardır. DIB'ler



Şekil 9.15 Tayf boyunca Dağınık Yıldızlararası Bantların soğurma çizgilerine (beyaz çizgilerle gösterilen) bir örnek (Kaynak: NASA / P.Jenniskens ve F.-X. Desert).

* [İng.] New General Catalogue -çn.

' [İng.] Diffuse Interstellar Bands -çn.

karmaşıktır ve bunları yıldızlararası buzlar ve temsili ışınımlar kullanan laboratuvar deneyleriyle ilişkilendirmenin kolay olduğu kanıtlanmamıştır. DIB'lerin gücü, toz ve diğer maddelerin neden olduğu ışığın sönmesiyle ilişkilidir, bu da bir şekilde toz veya buzla bağlantılı olduklarını gösterir.

Yayınım spektroskopisi. Radyasyona maruz kalan enerjili bir gaz tarafından fotonlar üretildiğinde yayınım meydana gelir. Yayınım çizgileri yine belirli moleküllere veya atomlara özgü olan ve bileşenleri tanımlamak için kullanılabilen bir tür parmak izidir. Örneğin 3,3, 6,2, 7,7, 11,1, 12,7 μm dalga boylarındaki yayınım bantları aromatik moleküllerdeki C–H ve C=C bağlarına atfedilir.

Bu yöntemlerin sınırlamaları ve ideal kullanımları vardır. Radyo astronomisi, UV radyasyon aralığında daha iyi tespit edilen hidrojene karşı kördür. Ayrıca katı fazdaki molekülleri tespit etmek için tercih edilen yöntem değildir (yıldızlararası tanecikler üzerindeki bileşikler dâhil). Kızıl-altı spektroskopi birçok moleküler yapıyı saptar ve PAH'ları tespit etmek için kullanılmıştır. Ayrıca yıldızlararası taneciklerden geçebilir ve bu nedenle silika, buzlar ve yıldızlararası materyalin diğer bileşenlerini tespit etmek için kullanışlıdır. Bununla birlikte, moleküler nitrojeni tespit etmek için zayıf bir yöntemdir.

9.14 Sonuç

Bir zamanlar hareketsiz bir boşluk olduğu düşünüldüğünde, dış uzayın artık birçok karbon bileşiği de dâhil olmak üzere karmaşık bileşikler oluşturabilen çeşitli ortamlara sahip bir yer olduğu biliniyor. Uzaydaki kozmik ışınlar, UV radyasyonu ve yıldızlararası tanecikler üzerindeki reaksiyonların, yüksek konsantrasyonlar ve ısıl aktifleşme tarafından yönlendirilen Dünya üzerindeki bir laboratuvardaki geleneksel kimyadan farklı olarak, kimyanın meydana gelebileceği yollardan sadece birkaçı olduğu düşünülmektedir. Birçok yıldızlararası bileşiğin doğası hala muammalı, ancak kızıl-altı ve radyo astronomisi bu moleküller hakkında daha fazla bilgi toplamak için kullanılıyor. Bir yaşamın kökeni için gerekli olan çeşitli karbon bileşiklerinin makul bir kaynağı olabilirler.

İleri Okumalar

Kitaplar

De Duve, C. (1995) *Vital Dust: Life as a Cosmic Imperative.* Basic Books, New York.

Kwok, S. (2013) *Stardust: The Cosmic Seeds of Life.* Springer, New York.

Yayınlar

Belloche, A., Garrod, R.T., Müller, H.S.P., Menten, K.M. (2014) Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium: iso-propyl cyanide. *Science* 345, 1584–1586.

Bettens, R.P.A., Herbst, E. (1997) The formation of large hydrocarbons and carbon clusters in dense interstellar clouds. *Astrophysical Journal* 478, 585–593.

Bohme, D.K. (1992) PAH and fullerene ions and ion/molecule reactions in interstellar circumstellar chemistry. *Chemical Reviews* 92, 1487–1508.

Burgh, E.B., France, K., McCandless, S.R. (2007) Direct measurement of the ratio of carbon monoxide to molecular hydrogen in the diffuse interstellar medium. *Astrophysical Journal* 658, 446–454.

Ehrenfreund, P., Irvine, W., Becker, L., Brucato, J.R., Colangeli, L., Derenne, S., Despois, D., Dutrey, A., Fraaije, H., Lazcano, A., Owen, T., Robert, F., ISSI study team. (2002) Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life. *Reports on Progress in Physics* 65, 1427–1487.

Herbst, E., Chang, Q., Cuppen, H.M. (2005) Chemistry on interstellar grains. *Journal of Physics: Conference Series* 6, 18–35.

Inglesias-Groth, S. (2004) Fullerenes and buckyonions in the interstellar medium. *Astrophysical Journal* 608, L37–L40.

Kaiser, R.I. (2002) Experimental investigation on the formation of carbon-bearing molecules in the interstellar medium via neutral-neutral reactions. *Chemical Reviews* 102, 1309–1358.

Marty, B., Alexander, C., Raymond, S.N. (2013) Primordial origins of Earth's carbon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 75, 149–181.

McBride, E.J., Millar, T.J., Kohanoff, J.J. (2013) Organic synthesis in the interstellar medium by low-energy carbon irradiation. *Journal of Physical Chemistry* 117, 9666–9672.

Snow, T.P.,McCall, B.J. (2006) Diffuse atomic and molecular clouds. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 44, 367–414.

Tielens, A.G.G.M. (2008) Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules. *Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics* 46, 289–337.

10

ERKEN DÜNYA (İLK BİR MİLYAR YIL)

Öğrenme Çıktıları

- Dünyanın oluşumu, ilk okyanuslar ve atmosfer hakkındaki hipotezlerin anlaşılması.
- Dünyanın erken tarihinde meydana gelen olayların kronolojik sırasının öğrenilmesi.
- Dünyanın ilk dönemlerindeki çevresel koşullar hakkında bilgi veren bazı kanıtların öğrenilmesi.
- Yaşamın ortaya çıkmış olabileceği bazı çevresel koşulların tanımlanması.
- Bu koşulların yaşamın ilk dönemlerine etkilerinin açıklanması.
- Bu koşulların yaşamın ortaya çıkışının ilk dönemlerinde neden zorluklara yol açtığının kavranması.

10.1 Dünyanın İlk Milyar Yılı

Önceki bölümlerde, yaşam için elementlerin nereden geldiğine ve yıldızların ve gezegenlerin nasıl oluştuğuna dair evrensel bağlamı öğrenmiştik. Yaşam için önem arz eden tek bir karbon bileşiği kaynağının nasıl yıldızlararası ve henüz yeni oluşan gezegen öncesi çevre olabileceğini araştırdık. Artık Dünyaya odaklanacak, onun oluşumunu ve yaşamı ortaya çıkaracak ortamı sağlayan erken döneme ait yüzey koşullarını düşünecek bir durumda bulunuyoruz. Dünyanın ilk dönemindeki koşullar nasıldı ve en eski çevre, yaşamın devamlılığı için uygun olan bir noktayı vermek üzere nasıl gelişti? Erken dönemde Dünyadaki ortamın yaşama yönelik sonuçlarından bazıları neler olabilir? Bu bölümde bu soruları odağımıza almaya çalışacağız.

Genel olarak, Dünyanın 4,56 milyar yıl (veya giga annum, Ga) önce oluştuğu zamandan, yaşamın ilk kanıtının kaya kayıtlarında göründüğü 3,5 Ga (milyar yıl) öncesine kadar olan ilk milyar yılı ele alacağız. Dünya tarihinin bu dönemi Hadean çağını (4,56–4,0 Ga önce) ve Archean çağının (4,0'dan 2,5 Ga'ya kadar uzanan) bir bölümünü kapsar. Dünyanın jeolojik tarihini Bölüm 13'te daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz. Bu, Dünyanın oluştuğu, ilk kıtaların ve okyanus-

ların ortaya çıktığı, yaşamın ortaya çıktığı ve yaşamın başlangıcının kaya kayıtlarında tespit edilebilir izler bırakacak kadar yeterli bir biyokütle verecek kadar çoğaldığı son derece önemli bir zaman dilimidir.

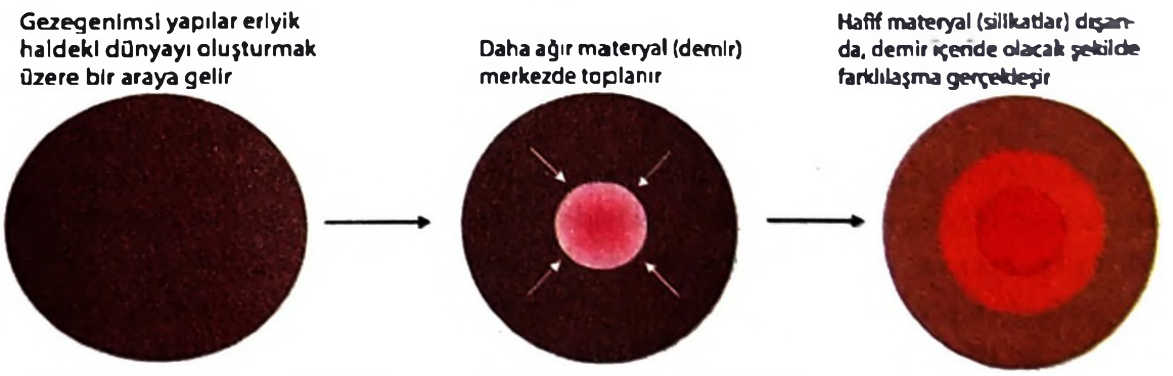
10.2 Dünya Oluşur ve Farklılaşır

Dünya, ilk-gezegen diskinde (Bölüm 8) oluştuğunda homojen bir erimiş kaya kütlesi halindeydi. O dönemde önemli olan üç ana ısı kaynağı vardı:

1. Çarpışmalar, kinetik enerjinin ısıya dönüşümünü sağlıyordu. Bu çarpışmalar Dünya ilk gezegenimsilerden oluşurken meydana geldi. Erken dönemdeki gezegenimsiler diskinde Dünyanın oluşumu sırasında çevredeki materyaller yüzeye çarparken gezegen ısındı.
2. Dünya oluşurken giderek daha fazla materyali sıkıştıran kütleçekim kuvvetleri ısı üretimine neden oldu. Dev gezegenimsilerin etkileri de bu sıkıştırma sürecine katkıda bulunurdu.
3. Elementlerin radyoaktivitesi, içsel ısı enerjisine katkıda bulundu. Gezegenleri oluşturan materyallerdeki radyoaktif bozunmadan enerji açığa çıkaran üç ana element uranyum (^{235}U ve ^{238}U), potasyum (^{40}K) ve toryumdur (^{232}Th).

Bu üç enerji kaynağı gezegeni eriyik bir halde tutuyordu. Bununla birlikte, nihayetinde, enerji, özellikle de çarpışma ve sıkıştırma enerjisi dağıldıkça, gezegen soğudu. Bir araya gelip toplanmadan sonraki ilk 50 milyon yıl boyunca Dünya içindeki sıcaklık demirin erime noktasına kadar düştü. Küresel kimyasal **farklılaşma** adı verilen bir süreçte (Şekil 10.1) demir de dâhil olmak üzere daha ağır elementler Dünyanın çekirdeğinde toplanırken silika gibi daha hafif elementler yüzeye doğru çıktı. Demir, gezegenin merkezinde bir demir çekirdek olarak katılaşmaya ve birleşmeye başladı. Sıvı haldeki demir ve sıvı haldeki silikatların birbirine karışmaması bu sürece yardımcı oldu. Bunlar tıpkı yağ ve su gibi birbirine karışamazlar ve ayrılma eğilimi gösterirler.

Küresel farklılaşma yaklaşık 4,3 Ga önce tamamlandı ve bu da bugün bildiğimiz kompozisyon ve yapıyla sonuçlandı (Şekil 10.1). Gezegenin iç kısmında



Şekil 10.1 Dünyanın farklılaşması (Kaynak: Charles Cockell).

çevresi sıvı demir bir dış çekirdekle çevrili olan katı bir demir-nikel çekirdek bulunur. Çekirdek, Dünyanın kütlesinin yaklaşık üçte birini oluşturur. Bunun üstünde manto ve mantoyla yüzey arasında da kabuk bulunur. Biyosfer yer kabuğun içindedir ve kabuk esas olarak silikatlardan oluşur (Bölüm 3; Şekil 3.15).

10.3 Ayın Oluşumu

Dünyanın oluşmasıyla yaklaşık aynı zamanda Ay da oluştu. Gezegen bilimlerinin ilk yıllarında, bunun nasıl olabileceğine dair birbiriyle rekabet halinde olan birkaç teori vardı. Bu rekabet halindeki her fikir test edilebilecek belirli tahminlere sahipti:

1. **Ortak köken hipotezi.** Gezegenimsiler ön-gezegen diskinden birikirken, o çevredeki materyallerin bir kısmı birleşerek Dünyayı oluşturdu ve sonunda bugün gördüğümüz gezegene doğru farklılaşırken bir kısmı da ayı oluşturdu.
2. **Bölünme (fizyon) hipotezi.** Dünya ilk dönemlerinde o kadar hızlı döndü ki sahip olduğu materyalin bir kısmı uçup ayı oluşturdu.
3. **Yakalanan nesne hipotezi.** Ay, Güneş Sisteminin oluştuğu ilk zamanlarda Dünyanın kütleçekimi tarafından tamamen ele geçirilmiş başka bir cisimdi.

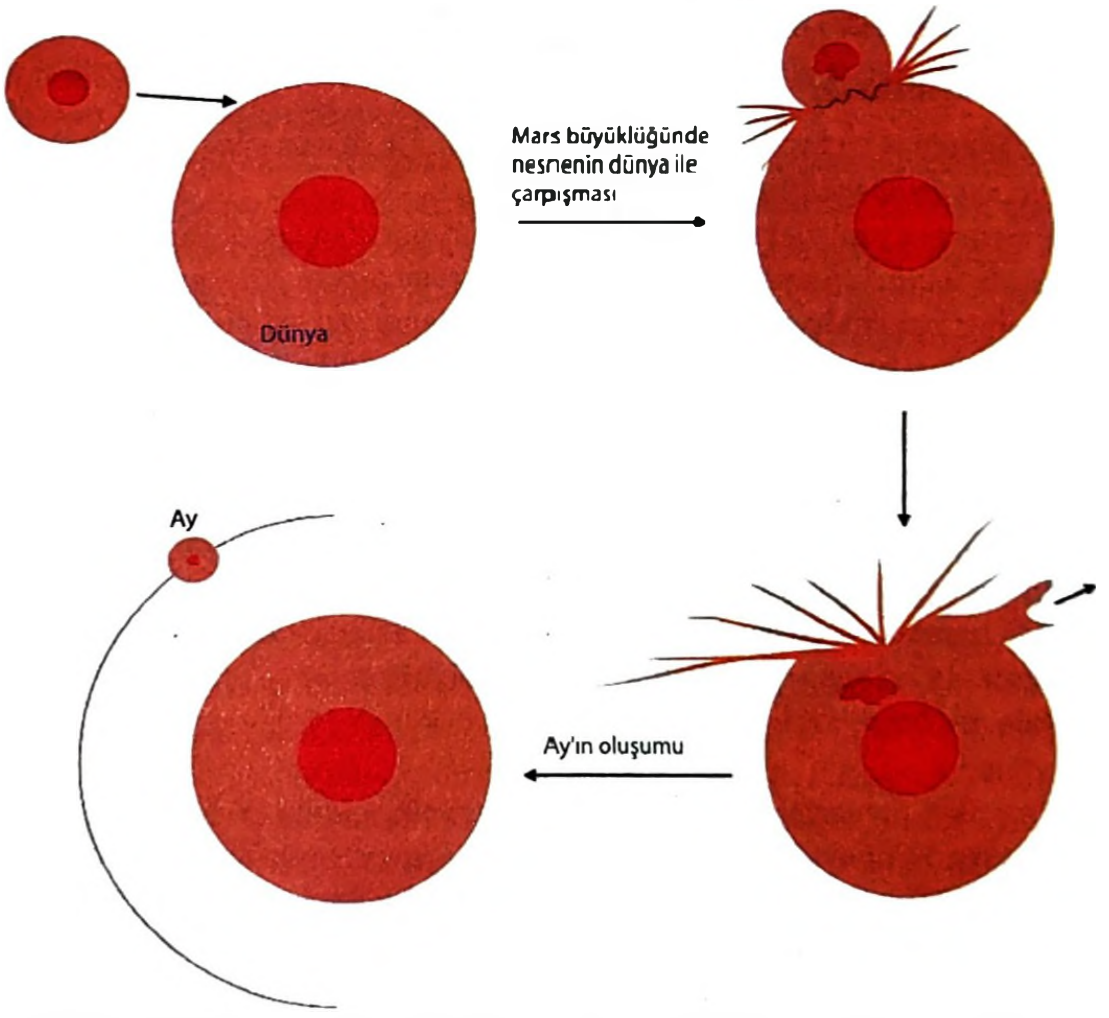
Ay ilginç ve sıra dışı bir cisimdir ve bu özelliklerden bazıları üzerinde düşünmeye değer. Başka hiçbir gezegen boyutuna göre bu kadar büyük bir uyduya sahip değildir (Plüton hariç). Ay Dünyanın %27'si çapındadır ve %1,2'si kadar bir kütleye sahiptir. Ayın yalnızca çok küçük bir demir çekirdeğe sahiptir ancak Dünyanın mantosu ile yaklaşık olarak aynı kütle yoğunluğuna sahiptir, bu da bileşimsel bir benzerlik olduğunu düşündürmektedir. Ayın tamamının yoğunluğu, Dünyanın toplam kütle yoğunluğundan daha azdır. Uçucu elementler ayda büyük oranda yok olmuştur ve Dünyaya benzer bir oksijen izotop bileşimine sahiptir. Tüm bu faktörler birlikte ele alındığında, Dünya ve ayın muhtemelen ortak bir tarihe sahip olduğuna işaret eder.

Bu veriler bazı orijinal teorileri bertaraf ediyor gibi görünüyor. Ay ve Dünya tam olarak aynı gezgen öncüsü materyalden geliyorsa kütle yoğunluklarının aynı olmasını beklerdik. Boyutlarının farklı olması, farklılaşmada farklılıklara yol açabilir ve dolayısıyla her iki cismin farklı bölgelerinin yoğunluğunun farklı olmasına neden olabilirdi fakat toplam yoğunluk hemen hemen aynı olmalıdır. Oysa Ay daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Alternatif teori olan fisyon hipotezi ise kütleçekim açısından bunun olası olmadığını ortaya koyan bilgisayar modelleri tarafından desteklenmemektedir. Bunun için Dünya inanılmaz bir hızla dönüyor olmalıydı. Ayın jeolojik yapısı, onun Dünya tarafından çekilip yakalanan yabancı bir cisim olduğu fikrini desteklemez. Burada, bu şekilde yakalanan nesneler olduğu düşünülen ve Mars'ın uyduları olan Phobos ve Deimos ile Neptün'ün uydusu Triton için geçerli olanın aksine

bir durum söz konusudur. Satürn ve Jüpiter'in bazı uydularının da yakalanmış olan nesneler olması muhtemeldir. Bu yüzden bu teori, bazı gezegenlerin etrafındaki uyduların nasıl oluştuğunu açıklamada konuyla hiç ilgisi olmayan bir teori değildir.

Dev Çarpma Modeli bu verileri açıklarken, Dünyadaki demirin çekirdeği oluşturmak üzere merkeze doğru batarak birikmesinden yaklaşık 10-20 milyon yıl sonra, Mars büyüklüğünde bir gezegenin (Ay tanrıçası Selene'nin annesi olan Yunan tanrıçasının sonra bazen oldukça romantik bakış açısıyla Theia olarak da adlandırılır) Dünyayla çarpıştığı tahmininde bulunur. (Şekil 10.2). Çarpışmayla etraf saçılan materyalin bir kısmı Dünyanın etrafındaki yörüngede kalmıştır.

Çarpışma ve yığılma sürecinde bu yörüngedeki materyal birleşerek Ayı oluşturmuştur. Bu teori, Ayın kütle yoğunluğunun neden Dünyadan biraz daha küçük olduğunu açıklıyor, çünkü çarpan dev cisim, yüzeyin üst kısmındaki (ilk manto) daha hafif materyalleri sıyırıp Dünya etrafındaki yörüngeye fırlatabilir.



Şekil 10.2 Ayın oluşumuna ilişkin dev çarpma hipotezi (Kaynak: Charles Cockell)

Bu fikir ilk olarak yaklaşık 30 yıl önce ortaya atıldı ancak fikrin uygulanabilirliğini kanıtlamaya yönelik hesaplamalar için modern yüksek hızlı bilgisayarlar gerekiyordu. Bu fikir bugün Ayın oluşumuna dair en akla yatkın hipotez olarak kabul edilmektedir. Kütle yoğunluğunun Dünyadan daha düşük olması ve benzer oksijen izotop bileşimi de dâhil olmak üzere Ayın birçok özelliğini açıklamaktadır.

Bugün Ay Dünya ile arasındaki gelgit etkileşimleri nedeniyle Dünyadan uzaklaşmakta ve yörünge mesafesi yılda 3,8 cm artmaktadır. Bu etkileşimin bir tezahürü, Dünyanın dönüşünün yavaşlamasıdır. Mercan büyüme halkaları üzerine yapılan araştırmalar, 370 milyon yıl önceki Devoniyen döneminde yılda 400 gün olduğunu, yani bir günün yaklaşık 22 saat sürdüğünü göstermektedir. Hadean'da gün yaklaşık 10 saat uzunlukta olabilir. Gün uzunluğundaki bu değişim, Dünyanın ilk zamanlarındaki (fotosentetik aktivite periyodu gibi) gün uzunluğuna bağlı olan mikrobiyal döngülere ve Dünya tarihinde çok daha sonraları, hayvanların Ay döngüsüne bağlı kendi döngülerine yönelik fikir verir. Bu, büyük boyutlu bir ayın astrobiyolojik etkilerine sadece bir örnektir. Kitabın ilerleyen bölümlerinde başka sonuçlar da gözden geçirilecektir.

10.4 İlk Okyanuslar

Dünya soğumaya ve farklılaşmaya başladığında, ilk okyanuslar yoğunlaşmaya ve oluşmaya başlayabilirdi.

Dünyanın okyanuslarını oluşturacak suyun nereden geldiğini açıklamaya yönelik bir takım hipotezler mevcuttur. Teorilerden birine göre, su Dünyaya sürekli olarak kuyruklu yıldızlar tarafından sağlanmıştır ve bu nedenle Dünya okyanuslarının hacmi zamanla artmıştır. Kuyruklu yıldızlardaki suyun bu cisimlerin Dünyayla çarpışmasından sonra kaldığı varsayılırsa, buna göre (zaman içinde teorik çarpma oranlarına dayanarak, var olduğu süre boyunca Dünyaya 2,2–8,5 × 10^{21} kg su gelmiş olmalıdır) şimdiki okyanus hacminin üç katı kadar suyun zamanla Dünyada birikmesi gerekir. Bu teori ilginç ancak daha sonra göreceğimiz gibi genellikle kanıtlarla desteklenmiyor.

Diğer insanlar, Dünyaya çarpan kuyruklu yıldızların okyanusların oluşumuna katkıda bulunan önemli bir su kaynağı olduğunu ancak bu sürecin erken dönemde, bu nesnelerin pek çoğu mevcutken çok hızlı biçimde gerçekleştiğini varsaymıştır.

Dünyadaki suyun kökenini belirlemenin bir yolu, sudaki iki hidrojen formunun oranına bakmaktır: (i) bir proton ve bir elektron içeren "normal" hidrojen (H) ve (ii) bir proton, bir nötron ve bir elektron içeren döteryum (D). Hidrojen ve döteryum izotoptur. Bölüm 13'te izotopik değerleri nasıl ölçebileceğimizi daha ayrıntılı olarak ele alacağız. Şimdilik bu iki izotopun oranının ölçülebileceğini ve bu oranı Güneş Sistemindeki farklı nesnelerle karşılaştırarak bunlardan birinin o nesnelerdeki değerlerle uyuşup uyuşmadığını görmek için yeterli ol-

duğunu bilmek önemli. Neyse ki, uzay aracı tarafından *in situ** olarak toplanan kuyruklu yıldızlardan (Halley ve 67P/Churyumov–Gerasimenko) ve astronomik gözlemlerden (Hale–Bopp ve Hyakutake) D/H oranına ilişkin ölçümlere sahibiz. Bu veriler kuyruklu yıldız oranının, Dünya okyanuslarındaki orandan ($1{,}55 \times 10^{-4}$ veya Standart Ortalama Okyanus Deniz Suyu veya SMOW değerinden) çok daha yüksek, yaklaşık iki ila üç kat daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da Dünyadaki okyanusların ağırlıklı olarak kuyruklu yıldızlardan gelmediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca Dünyadaki okyanusların sürekli biçimde Dünyaya gelen yıldızlardan kaynaklandığı fikrini de çürütmektedir. Kuyruklu yıldızlar okyanusları oluşturacak kadar çok su kaynağı sağlamamış olsalar da muhtemelen Dünyanın erken döneminin envanterine katkıda bulunacak CH_4, CO, NH_3, N_2 ve diğerleri dâhil olmak üzere bir dizi uçucu maddeyi getirdi.

Öyleyse suyu hangi nesneler getirdi? Göktaşlarındaki D/H oranı çalışmaları, özellikle kütlece %22'ye kadar su bileşimine sahip bir göktaşı türü olan karbonlu kondritlerin, karasal okyanuslara benzer şekilde yaklaşık 0,2 ila $7{,}3 \times 10^{-4}$ gibi değerler ortaya koymaktadır. Bu yapılar Mars ve Jüpiter arasındaki asteroit kuşağından gelir ve Dünyada bunlara ait birçok örnek toplanmıştır. İzotopik verilere dayanan kütle hesaplamaları, kuyruklu yıldızların, çoğu asteroit materyalden gelen, erken dönemdeki Dünya okyanuslarının yaklaşık %10'u kadar su sağladığını gösteriyor.

Bu nedenle, bugün öne çıkan hipotezlerden biri, suyun muhtemelen su içeren asteroit gezegensilerin birikmesiyle geldiği ve Dünya oluşurken suyun da bu yapıya dâhil olduğudur. Bu suyun daha sonra gezegenin iç kısmında gaz formundan çıkarak yüzeyde yoğunlaştığı düşünülmektedir. Bugün bile ilk materyallerin gazının uçtuğunu biliyoruz. Derin okyanus menfezlerinden gelen deniz suyunun incelenmesi onun daha yaygın olan ^{4}He'ye kıyasla helyumun ilkel bir izotopu olan ^{3}He bakımından zengin olduğunu ortaya koymaktadır. Neon ve helyum gibi hafif soy gazlar, Güneşin bileşimindekine çok daha benzer bir izotopik bolluğa sahiptir; bu, Dünyanın derinliklerindeki ilk oluşan uçucuların bugün yüzeye çıktığını düşündürmektedir. Suyun, Dünyanın farklılaşıp sıkıştığı ilk dönemlerinde katastrofik bir gaz çıkışıyla iç kısımdan serbest bırakıldığı düşünülmektedir.

Bu suyun tamamı yüzeyde tutulmadı. Biriktirme sırasında kalan toplam su, bugün Dünyadaki okyanuslarda bulunandan neredeyse kesinlikle daha yüksekti. Bu suyun bir kısmı, Dünyanın erken döneminde suyu bileşenleri olan hidrojen ve oksijene parçalayacak ultraviyole (UV) radyasyonuyla verdiği reaksiyonlar sırasında kaybolacaktı. Oksijen yüzeydeki kayaları ve atmosferdeki gazları oksitledi; hidrojen, hafif olduğu için uzayda kayboldu. Bu zamanda devam eden asteroit çarpması ve bombardıman periyodu da atmosferde çarpma kaynaklı yıkıma ve suyun bir kısmının kaybına neden olacaktı.

---

* Yerinde –yn.

Dünyanın yüzeyi okyanusların oluşmasını sağlayacak kadar soğukluğa ne zaman erişti? Okyanusların kalıcı şekilde ortaya çıkmasını engelleyen olaylardan biri kesinlikle ayın oluşumuna neden olan çarpma olayı olurdu. Bu olay sırasında açığa çıkan enerjiye ilişkin tahminler bu enerjinin okyanusları (ve aynı zamanda büyük miktarda silikat kayasını da) tamamen buharlaştıracağını gösteriyor. Bu çarpmanın sonucunda mevcut atmosfer basıncının 300 ila 500 katı arasında bir basınç ve su ile karbondioksitten oluşan bir atmosfer ortaya çıkmıştır. Birkaç milyon yıl içinde atmosfer soğudu ve Dünyanın yüzeyi bir kez daha katılaştı. Sıcaklık ~600 K'e düştüğünde, çok kısa bir zaman diliminde (yaklaşık 1000 yıl) su yoğunlaştı ve 4,4 Ga önce Dünya yüzeyinde okyanuslar oluştu. 4,3 Ga öncesine kadar, okyanusların sıcaklıklarının yaşamı destekleyecek kadar düşük (yani yaşam için üst sıcaklık sınırının altında; bkz. Bölüm 7) olması muhtemeldir. Bununla birlikte, okyanuslar muhtemelen bugünkünden daha sıcaktı ve sıcaklık değerinin 50 ila 80°C arasında bir yerde olma ihtimali yüksekti.

Dünyanın erken Hadean döneminde okyanuslar olduğuna dair doğrudan kanıtlar mevcuttur. Bilim insanları antik zirkonları araştırdılar. Zirkonlar zirkonyum silikatlardır ($ZrSiO_4$). Çok serttirler ve erozyona karşı oldukça dayanıklıdırlar. Genellikle yaklaşık 0,1-0,3 mm boyutlarında olan küçük kristallerdir ancak çoğu kaya türünde yaygın olarak bulunurlar. Ayrıca zirkonlardaki zirkonyum, radyometrik tarihlemede kayaları tarihlemek için kullanılabilen uranyum gibi diğer elementlerle değiştirilebilir (Bölüm 13). Zirkonlar, Avustralya'daki Jack Hills'te bulunan kayalardan başarıyla çıkarılmıştır. Bu zirkonlar Dünyadaki en eski minerallerden bazılarıdır. Metamorfizmaya maruz kalmış granitlerin kaydını saklayan Kanada'nın kuzeyindeki Acasta Gneisses, 4,2 Ga önceki Hadean'a tarihlenen bir başka nadir kaya çıkıntısıdır.

Jack Hills'in zirkonları tarihlendirildiğinde bunların yaşının 4,4 Ga olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu zirkonların oksijen izotopik değerleri de ölçülmüştür ($\delta^{18}O$ değerlerinin 5–8‰ olduğu bulunmuştur. Bu gösterim bir sonraki bölümde geçtiğinde bu ifadeyi gözden geçirmek isteyebilirsiniz). Bu izotop değerlerinin, zirkonun kristalize olduğu lavın, sıvı suyla reaksiyona giren materyal içerdiğini gösterdiği düşünülmektedir. Bu oksijen izotop değerleri düşük sıcaklık değişimlerine (yani okyanus suyundaki kaya reaksiyonları) işaret etmektedir. Öyle görünüyor ki Dünyanın yüzeyi 4,4 Ga'da okyanusların oluşacağı kadar soğuktu.

Bu erken okyanusların daha sıcak olmasının yanında kimyası da muhtemelen bugünkünden çok farklıydı. Suda çözünen CO_2'nin yüksek kısmi basıncı (pCO_2), pH'ın 4,8-6,5 civarında olmasına neden oldu (bugünkü pH değeri yaklaşık 8,0'dir). Her ne kadar en eski okyanusların kimyasal bileşimini bilmesek de Avustralya'daki kayalardan elde edilen 3,5 Ga'lık sıvı kesesi ve modelleme çalışmaları, 3,5 Ga önceki okyanusun sodyum ve klorür bakımından çok daha yoğun olduğunu (günümüz deniz suyunun yaklaşık iki katı) ve brom bakımından da zengin olduğunu göstermektedir. Kalsiyum konsantrasyonunun bugün-

kü değerin 20 katı olması mümkündür. Bundan önceki tarihler için okyanus suyuna dair doğrudan kimyasal ölçümlerimiz yoktur.

Erken Archean döneminde okyanusların var olduğuna kanıt sağlayan tam olarak oluşmuş en iyi ve en eski kayalardan bazıları, Batı Grönland'daki Akilia ve Isua bölgelerinde bulunmaktadır. Radyometrik tarihleme (ki bunu 13. Bölümde inceleyeceğiz) Akilia ve Isua kayalarının sırasıyla yaklaşık 3,87 ve 3,81 Ga yaşına olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kayaların sahip olduğu pek çok özellik onların oluşurken sıvı suyla temas halinde olduklarını düşündürmektedir. Kalsiyum karbonatın abiyotik çökelmesi sonucunda (ya da Dünyanın yakın tarihinde görüldüğü gibi foraminiferler gibi deniz canlılarının karbonat iskeletlerinden)genellikle sulu ortamlarda oluşan kireçtaşları (karbonatlar) içerirler. Kayalar esasen büyük miktarda parçalanmış kuvars (SiO_2) kristalleri ve diğer safsızlıklardan oluşan kumtaşları içerir. Bu kuvars kristalleri, kayalar rüzgâr ve su etkisiyle yıprandığında veya parçalandığında ortaya çıkar. Bunların Isua kayalarında bulunmaları, kıtasal kayaların (esas olarak kara kütlelerinin) bu dönemde aşındığını ve kuvars malzemesinin daha sonra sığ sularda veya okyanuslarda biriktiğini göstermektedir. Son olarak, kayalar ayrıca, suyla karıştığında anında katılaşarak yuvarlak dev damlalara dönüşünce aldıkları şekil olan "yastık" benzeri bir şekle (yastık lav) sahip olan lavları da içerir. Bu kayalar ayrıca okyanusların bu zamana kadar oluşmuş olduğunu da ortaya koymaktadır. Batı Avustralya'daki Pilbara'da bulunan ve 3,5 Ga öncesine tarihlenen kayaçlar antik karbonatlar ve sülfatlar, yine sıvı su ortamlarıyla ilişkili mineraller ve muhtemelen sığ kıyı tortullar için kanıtlar içermektedir.

10.5 Erken Dönemde Yerkabuğu

İlk kara kütleleri oluşmadan önce Dünya bir magma okyanusu tarafından kaplanmış olmalıdır. Okyanuslar ortaya çıktığında ve yaşam başladığında Hadean Dünyasında ne kadar kıtasal kara alanı oluştuğu oldukça tartışmalıdır. Kıta kara alanının günümüzdekine oranla ne kadar olduğu da tartışılmaktadır. Bazı tahminlere göre, Hadean kara alanı günümüz kıtalarının %10-15 kadarı kadardır. Öte yandan bu tahmine yönelik sınır çizecek Hadean kaya kaydı çok azdır. Çok erken dönem Hadean Dünyasındaki kara kütlelerinin çoğu muhtemelen plakalar ve volkanik sıcak noktalar üzerinde oluşan bazalt volkanik adalardı. Levha tektoniğinin erken bir formunun Hadean döneminde oluştuğu ve kabuğun hızlı bir şekilde geri dönüştürülmesinden, muhtemelen yaklaşık 100.000 yıl içinde tüm yüzey malzemesinin sürekli olarak mantoya geri dönüştürülmesinden, sorumlu olduğu düşünülmektedir. Hadean Dünyasının yüzeyinden mantosuna doğru sıcaklığın dereceli olarak farklılaşması, bugün gözlemlediğimizden çok farklı bir levha tektoniği rejimine yol açmış olabilir (Şekil 10.3). Levha tektoniğini Bölüm 13'te daha ayrıntılı olarak tartışacağız. Yüksek ısı akışlarında oluşan ve günümüzde nadir bulunan komatiitler gibi kayaçlar



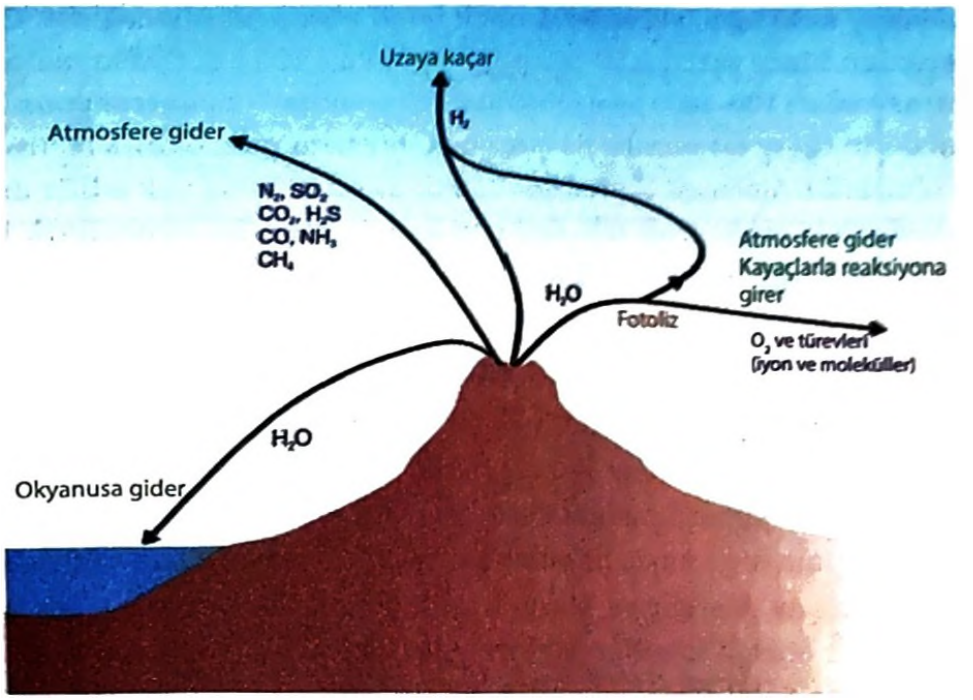
Şekil 10.3 Bir ressamın Hadean Dünyasının ilk kıtalarına ilişkin izlenimi (Kaynak: Science Photo Library).

var olmuş olmalıdır. Yaklaşık 4 Ga önce Dünya daha da soğumuştu ve muhtemelen istikrarlı bir levha tektoniği yapılanması kurulmuştu. Bununla birlikte, daha sonra Archean'a kadar, günümüze kadar varlığını sürdüren kayalar hidrotermal damarların varlığına ilişkin kanıtlar sunmaktadır, bu da, erken Dünyadaki daha yüksek ısı akışının varlığıyla tutarlı olarak kayaların arasından sıcak su aktığını düşündürmektedir.

10.6 Erken Dönemde Atmosfer

Oluşumunun hemen ardından Dünyanın öncelikle helyum ve hidrojen gazlarından oluşan ince bir atmosfere sahip olduğu düşünülmektedir. Kütleçekim bu hafif gazları tutamadı ve gazlar kolayca uzaya kaçtılar. Bugün H_2 ve He atmosferimizde çok az miktarda bulunur (sırasıyla yaklaşık % $5{,}5 \times 10^{-5}$ ve $5{,}2 \times 10^{-4}$). Sonraki birkaç yüz milyon yıl boyunca volkanik gaz çıkışı, Dünya oluştuğunda uçucu nitelikteki orijinal yelpazenin bir parçası olan çok çeşitli gazlardan oluşan daha kalın bir atmosfer yaratmaya başladı. Salınan gazlardan bazıları muhtemelen modern volkanik patlamaların yarattığı gazlara benziyordu (Şekil 10.4). Bu atmosferin %85'inden fazlasının okyanusların oluşumuna da katkıda bulunan ilk yıkıcı gaz çıkışıyla, geri kalanının ise "sürekli" gaz çıkışı yoluyla oluştuğu düşünülmektedir.

Erken dönemdeki atmosfer, volkanik gaz çıkışıyla üretilen kükürt dioksit (SO_2) ve hidrojen sülfür (H_2S) gibi bileşenlerden oluşan indirgeyici bir niteliğe sahip olmuş olmalıdır. Karbon dioksit (CO_2) ve karbon monoksit (CO), kuyruklu yıldız çarpmalarından veya çarpan cisimlerle atmosfer arasındaki reaksiyonlardan salınmış ve üretilmiş olmalıdır. Metan (CH_4), erken aşamalardaki gaz çıkışıyla üretilmiş ve belki de mikrobiyal metanojenezle artırılmıştır. Atmosfer, günümüzdeki basınç seviyesi kadar bir basınca sahip nitrojen gazını (N_2) ve bu gazın yıldırımlar ve çarpan cisimler tarafından üretilen nitrojen oksitler gibi türevlerini içermiştir. Amonyak (NH_3), atmosferdeki ömrü kısa olmasına rağmen, ilk gaz çıkışı, hidrotermal bacalarda üretim ve okyanuslarda nitrojen oksitlerin indirgenmiş demir (Fe^{2+}) ile reaksiyonu sonucunda oluşmuş olabilir. Atmosferin, onu UV radyasyonunun tahribatından koruyacak hidrokarbonlu sis tabakaları olsaydı, varlığı daha uzun süre devam edebilirdi. Hidrojen (H_2),



Şekil 10.4 Volkanik patlamalar sonucunda ortaya çıkan bazı gazlar Dünyanın çok erken dönemdeki atmosferine önemli ölçüde katkıda bulunurdu (Kaynak: Charles Cockell).

suyun fotoliziyle üretilen hidrojenle birlikte sonunda uzaya uçup gidecek gaz çıkışıyla üretilmiş olmalıdır. Bu şekilde üretilen oksijen, oksitlenmiş bileşikler oluşturmak üzere atmosferdeki indirgenmiş gazlarla veya yüzey mineralleriyle reaksiyona girmiştir. Çevre daha fazla oksitlendikçe, CO_2'nin oranı indirgenmiş gazlardan daha fazla olmuş ve atmosfer ancak zayıf bir şekilde indirgenmiş halde bulunmuştur. Bu CO_2, Hadean boyunca volkanik kayalardaki (gazın karbonat minerallerine dönüştürüldüğü) karbonatlaşma reaksiyonları nedeniyle azalmış olabilir.

Bu erken atmosfer insanlar için çok zehirliydi. Neredeyse hiç oksijen içermiyordu. Bize erken dönemdeki atmosferin çok düşük O_2 konsantrasyonlarına sahip olduğunu söyleyen kanıtlara 14. Bölümde daha ayrıntılı olarak bakacağız.

10.7 Dünyanın Erken Dönemindeki Sıcaklığı

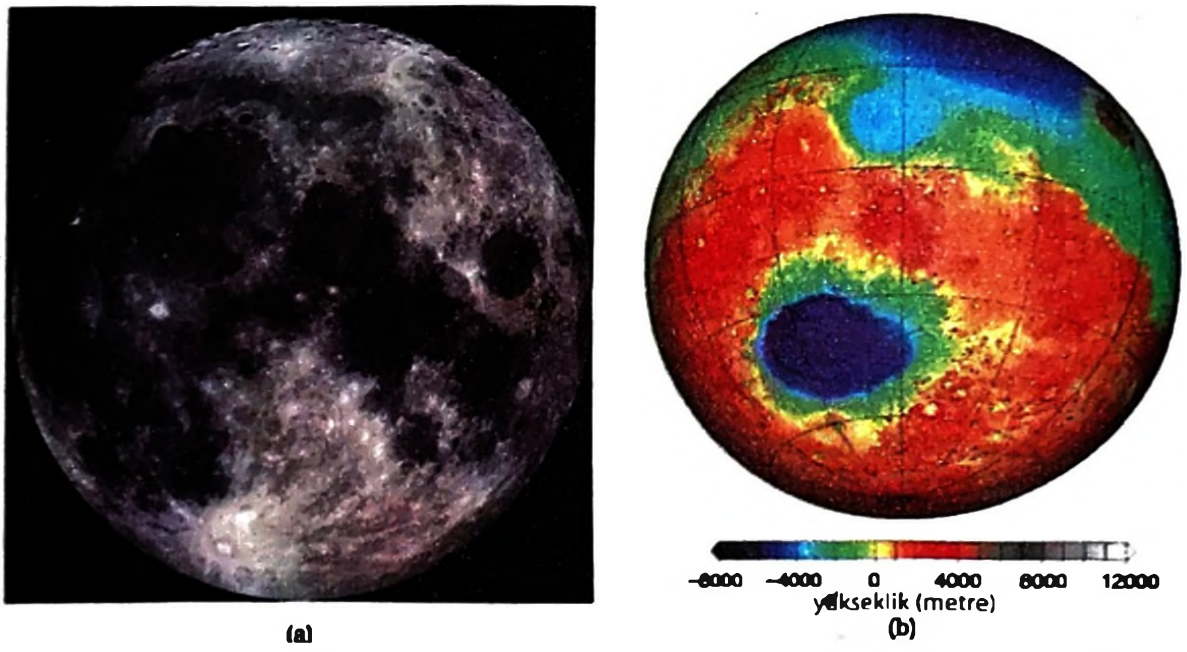
Hadean döneminde Güneşin bugünkünden en az %30 daha az parlak olduğu düşünülüyor. Daha düşük Güneş akısı Güneşe maruz kalmayı önemli ölçüde azaltacaktır. Bunun, o sırada gezegende var olan sıvı haldeki suyu açıklamada sorun yarattığı uzun zaman önce anlaşılmıştı. Bu, **soluk genç Güneş paradoksu** olarak bilinir. Gezegenin iç kısmından gelen daha yüksek ısı akışı, yüzeyi ısıtmak üzere bir miktar etkili olsa da (özellikle yığılmadan sonraki ilk yıllarda), Hadean ve erken Archean boyunca sıvı haldeki suyun nasıl muhafaza edildiği konusu açıklamak kolay değildir. Bir olasılık, CO_2 ve CH_4 gibi sera gazlarının ge-

zegenin yüzey sıcaklığını yükselterek bunu telafi etmiş olabileceğidir. CO_2 konsantrasyonları binde yaklaşık 50–500 ppt (bugünkü ~400 ppm'ye kıyasla) ve CH_4 konsantrasyonları 100–1000 ppm (bugünkü 1,7 ppm'lik konsantrasyona kıyasla) kadar olabilir. Diğer bir olasılık da çok güçlü bir sera gazı olan NH_3'ün, yüzeyi ısıtmış olmasıdır. Amonyak UV radyasyonu tarafından hızla yok edilir ancak erken atmosferdeki organik sis tabakası onu korumuştur. Bu atmosferik bileşenlerin bir kısmı, birlikte hareket ederek erken dönemdeki Dünyayı ısıtmış olabilir.

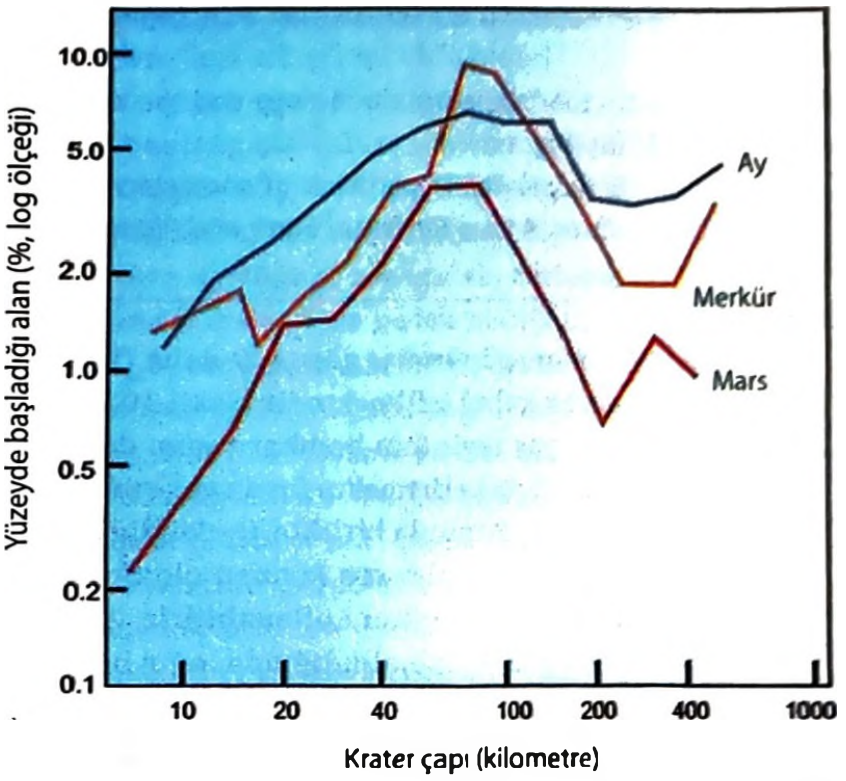
10.8 Geç Dönemdeki Ağır Bombardıman

Yaklaşık 4,1 ile 3,9 Ga arasında, Güneş Sisteminin erken dönem tarihi boyunca, iç kısımlardaki gezegenlere asteroit materyallerinin dev havzalar şeklinde etki bırakan ağır bombardımanının söz konusu olduğuna dair kanıtlar vardır. Levha tektoniğinin bir sonucu olarak bu kanıtların çoğu Dünya yüzeyinden silinmiştir. Ancak Ay, Merkür ve Mars üzerindeki büyük havzalar, bu bombardımana yönelik önemli kanıtlar sağlar. Ay ve Mars'taki örnekler Şekil 10.5'te gösterilmektedir. Şekil 10.6'daki grafik, bu ilk dönemki kraterlerin kapsamını ve iç kısımdaki gezegenlerde kapladıkları yüzeye dair bilgi vermektedir.

Aydan gelen kayaların tarihlendirilmesi (Bölüm 13) bu havzaların çoğunun 4 Ga'dan hemen sonra oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, bu havzaların oluşması için oldukça fazla miktarda materyale ihtiyaç duyulacağını da biliyoruz. Örneğin, Aydaki Mare Orientale'yi (yaklaşık 330 km çapında) oluşturmak için 100 km'lik bir materyal çarpması gerekebilir.



Şekil 10.5 Dev çarpışma havzaları, karanlık bölgeler olarak Ayda (solda) ve Mars'ta (sağda). Mars Global Surveyor uzay aracındaki Mars Orbiter Lazer Altimetre (MOLA) cihazının elde ettiği topografik haritada güney yarımkürede gösterilen 2300 km çapında bir krater olan Hellas Planitia oldukça belirgindir. (Kaynak: NASA).



Şekil 10.6 *Güneş sisteminin iç kısmındaki gezegenler, yüzeylerinde büyük çarpma olaylarının kaydını tutar. Grafik, belirli bir çaptaki kraterlerin yüzeyde kapladığı alanın Ay, Merkür ve Mars için benzer olduğunu ve Güneş Sistemi tarihinin başlarında benzer bir bombardımana maruz kaldıklarını düşündürmektedir. Mars'taki çok daha düşük krater sayısı, kısmen erken döneminde bir atmosferin varlığının yanı sıra aktif yüzey erozyonuyla da açıklanmaktadır. Dünya, çoğu krater levha tektoniği tarafından aşındırıldığı, yok edildiği ve böyle bir grafiği güvenilmez kıldığı için gösterilmemiştir. Venüs'ün yüzeyi, yoğun bombardımandan bu yana yeni lavlarla yeniden şekillendi ve bu nedenle, bu analizi yapacak eski bir yüzey yok. Eksenler logaritmik ölçektedir.*

Tartışma Noktası: Kraterleri kullanarak yaş tarihlemesi yapmak

Gezegenlerin yüzeylerinin tarihlemesini yapmak için kullanılan yaygın yöntem gezegenlerin üzerlerindeki veya ilgilenilen bir bölgedeki kraterleri saymaktır. Güneş sistemindeki kraterleşme oranı hakkında bir fikrimiz varsa, kaç tane krater beklediğimizi hesaplayabilir ve bunu gözlemlenen sayıyla karşılaştırabiliriz. Böylece yüzeyin yaşı belirlenebilir. Daha yeni yüzeylerde daha az krater, eski yüzeylerde daha fazla krater bulunur. Sizce bu yöntem ne kadar güvenilir? Ne tür belirsizlikler olabilir? Tüm jeolojik zaman boyunca çarpma olayları hakkında kesin ve doğru verilerin eksikliği bir belirsizlik kaynağıdır. Çok az kraterin olduğu genç arazilerde, özellikle küçük bir alanı tarihlendirmeye çalışıyorsak, istatistikler kuşkulu olabilir. Bazı kraterler, diğerlerini kaplayabilir (doygunluk kraterleri) ve böylece kraterlerin gerçek sayısı gizlenmiş olur. İkincil kraterler, birincil kraterleşme olaylarından dışarı atılan materyallerle oluşabilir. Bu yöntemle ortaya çıkabilecek belirsizlikleri listeleyiniz ve tartışınız. Uzak (telesko-

pik veya yörüngesel) bilgileri kullanarak bu sorunlardan bazılarının üstesinden nasıl gelirsiniz?

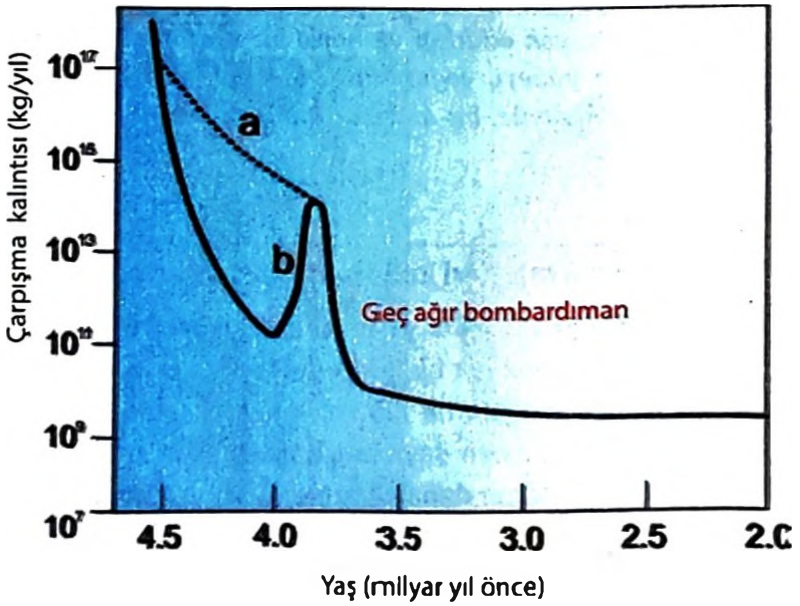
Hartmann, W.K., Neukum, G. (2001) Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Science Reviews* **96**, 165–194.

McEwan, A.S., Bierhaus, E.B. (2006) The importance of secondary cratering to age constraints on planetary surfaces. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **34**, 535–567.

Özetle, geç ağır bombardıman, günümüze göre çok daha fazla çarpma olaylarının olduğu bir zaman olarak kabul edilmektedir (Şekil 10.7).

Aydaki kayaların doğrudan yaş tayininin bombardıman dönemini tarihlendirmemize olanak tanıdığını burada belirtmekte fayda var çünkü Aydaki parçalara erişebildiğimiz için şanslıyız. Bununla birlikte, ilgilendiğimiz bir yeri kaya örneklerine sahip olmadığımız gezegenler söz konusu olduğunda, yüzeylerini tarihlendirmek için bombardımanın kanıtını kullanabiliriz. Zaman içinde varsayılan belirli çarpma olayları göz önüne alındığında, ağır bombardıman gibi ani artışları hesaba katarak, bir gezegen yüzeyindeki kraterleri sayabilir ve böylece o yüzeyin ne kadar eski olduğunu hesaplayabiliriz. **Krater yaşı tayini**, gezegenlerle ilgilenen bilim insanlarının diğer gezegenlerin yüzeylerini tarihlendirmesine yardımcı olmak konusunda oldukça başarılı olmuştur.

Astrobiyologları ilgilendiren sorulardan biri, bu bombardımanın, Güneş Sisteminin erken döneminin kalıntılarının sürüklenmesinden kaynaklanan



Şekil 10.7 Geç ağır bombardıman olarak adlandırılan, Dünyanın erken dönemindeki daha yüksek çarpma kalıntılarını gösteren basit bir şematik grafik. Yüksek miktardaki çarpma kalıntısı, o andaki genellikle daha yüksek çarpma kalıntısının son kısmından (a çizgisi) veya nispeten kısa bir süre boyunca çarpma olaylarındaki gerçek bir tepe noktasından (b çizgisi) kaynaklanıyor olabilir (Kaynak: Charles Cockell).

daha yüksek etkili çarpma olayının sonu mu yoksa daha temel bir şey (çarpma sıklığında gerçek bir "ani artış") mi olduğudur.

Bir teoriye göre, çarpma olaylarında gerçek bir artış olmuştur. Bu hipotezin arkasındaki fikir, başlangıçta Güneş Sisteminin Satürn'ün ötesinde bulunan ve buzlu yapılardan oluşan büyük bir popülasyona sahip olmasıdır. Bunlar birkaç yüz milyon yıl boyunca Güneşin etrafında sabit yörüngelerdeydiler. Bununla birlikte, zamanla, Satürn ve Jüpiter arasındaki kütleçekim etkileşimleri, gaz devlerinin yörüngelerinde bozulmalara neden olarak Uranüs ve Neptün'ü dışa doğru itti. Bu gezegenler göç ettikçe, aralarındaki çekim etkileşimleri kalan gezegenimsileri Güneş Sisteminin iç kısımlarına doğru dağıtmaya başladı. Küçük bir kısım Ayı ve kayalık gezegenleri etkileyerek devasa kraterler oluşturdu. Hesaplamalar, bombardımanın 100 milyon yıldan daha az sürmüş olabileceğini gösteriyor.

Çarpma olaylarının Dünyanın erken dönem üzerinde çevre bakımından önemli sonuçları olmuştur. Çarpmanın olduğu bölgede kaya, su ve varsa organizmalar buharlaşacaktır. Daha derindeki kayalar, yüksek basınç ve sıcaklıklarda şiddetli bir şekilde sarsılır, kırılır veya erir. Çarpma okyanuslarda olursa, dev tsunamiler kıyı bölgelerinde muazzam dalgalar oluşturur (karada çok hücreli organizmalar olmasa da, minimum biyolojik etki olabilirdi). Atmosferdeki kalın toz, olayın ölçeğine bağlı olarak aylar veya yıllar boyunca Güneş ışığını keserek gezegeni potansiyel olarak soğutmuş olabilir. Patlamalar ve buharlaşmanın neden olduğu aerosoller, atmosfer kimyasını değiştirerek onlarca yıl boyunca atmosferde kalmıştır.

Geç ağır bombardımandan sonra bile, ortaya çıkan etkilerin hala, aralıklı olarak, yaşamın ilk dönemleri için bir zorluk oluşturacağına dair kanıtlar var. Atmosferde uçuşan ve yağmur damlalarına benzer şekilde küreler halinde katılaşan erimiş kayaların oluşturduğu tahmin edilen küçük küre şeklindeki kayaların, erken çarpışmalara kanıt oluşturduğu düşünülmektedir. Bunlar tektit olarak bilinirler. Bunların katmanları Güney Afrika'nın Barberton kayalarında ve Avustralya'nın Pilbara kayalarında (her ikisi de 3,5–3,2 Ga yaşındadır) bulunmuştur.

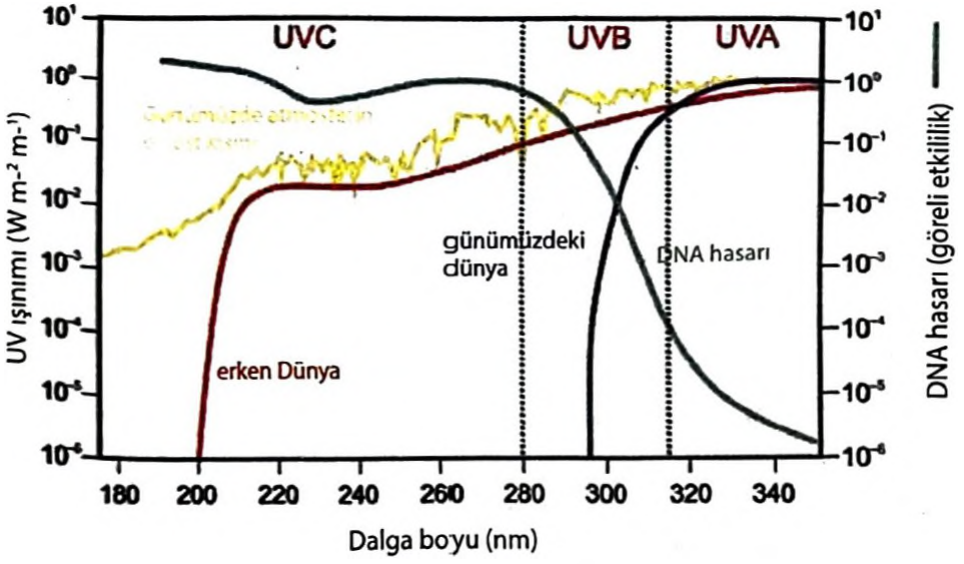
10.9 Erken Dönemdeki Çevrenin Yaşama Etkileri

Dünyanın erken döneminin bazı özelliklerine ve koşullarına baktık. Bu koşulların yaşam açısından sonuçları ne olabilir? Bu dönem bir bakıma günümüz Dünyasına benziyordu. Okyanuslar yaşam için habitat sağlıyorken ilk kıtalar ilk mikroorganizmalar için yüzey habitatları oluşturuyordu. Belki de hidrolojik bir döngü, okyanusların buharlaşması ve ardından yağışlar yoluyla, karada belirli mikroorganizmalar için barınak sağlayacak tatlı su kütleleri oluşmuştu. Bununla birlikte, Dünyanın ilk milyar yılında birbirinden çok farklı olan birçok özelliği vardır. Atmosfer oksijenden yoksundu ve çarpma olaylarının etkisi daha büyüktü. Bu iki farkı daha derinlemesine inceleyeceğiz.

Atmosferde oksijenin (O_2) bulunmaması, ozon (O_3) kalkanının olmadığı anlamına geliyordu. Günümüzde oksijen, stratosferde solar UV radyasyonuyla reaksiyona girerek ozon gazını oluşturur. Bu gaz tabakası, tek bir tabaka halinde sıkıştırıldığında sadece 3 mm kalınlığında olmasına rağmen, kısa dalga boylu ultraviyole radyasyonuna karşı güçlü bir koruma sağlar (Şekil 10.8). UV radyasyonunu yaklaşık 295 nm'de keser. Ozon tabakası olmadığında 200 nm gibi kısa dalga boyları, CO_2 varlığıyla elenerek daha da kısa dalga boylarıyla Dünyanın yüzeyine ulaşabilir. Burada önemli olan bu daha kısa dalga boylarının daha fazla biyolojik hasara neden olmasıdır. Şekil 10.8'de DNA hasarına yönelik **aksiyon spektrumunu** görebilirsiniz. Aksiyon spektrumu, belirli dalga boylarındaki radyasyonun neden olduğu biyolojik hasarın bir ölçüsüdür. Yaklaşık 200 nm'lik kısa dalga boylarının DNA'ya verdiği hasarın, spektrumun daha uzun dalga boylu UV bölgesindeki 340 nm'nin neden olduğundan yaklaşık altı kat daha fazla olduğunu görebilirsiniz. Aksiyon spektrumunu verilen ışık spektrumlarıyla çarpabilir ve daha sonra biyolojik olarak etkili ışımayı elde etmek için tüm dalga boyu aralığına entegre edebiliriz.

$$E_{eff} = \sum_{\lambda=200\,nm}^{\lambda=400\,nm} S_\lambda E_\lambda \Delta\lambda \qquad (10.1)$$

Burada Eeff biyolojik olarak etkili ışınımdır, S_λ spektral ışınımdır (belirli bir dalga boyunda alınan ışığın yoğunluğu) ve E_λ, belirli bir dalga boyundaki aksiyon spektrumunun değeridir. Bu iki miktar, spektrum boyunca farklı dalga boylarında çarpılır ve toplanır (Σ sembolüyle gösterilir). Burada, Dünyanın er-



Şekil 10.8 Erken Dünyadaki (kırmızı) ve günümüz Dünyasındaki (mavi) varsayılan UV akışının, bugün Dünya atmosferinin tepesindeki Dünya dışı akışla (sarı) karşılaştırılmasını gösteren bir diyagram. Ayrıca DNA molekülünü UV radyasyonunun (yeşil) farklı dalga boylarına duyarlılığı da gösterilmiştir ve bu da kısa dalga boylarında orantısız olarak daha büyük hasar ortaya çıktığını ortaya koymaktadır.

ken döneminin yüzeyindeki UV radyasyon dalga boyu aralığı olduğu düşünülen 200 ila 400 nm arasındaki hesaplama gösterilmektedir. Dalga boyu aralığı, günümüz Dünyası veya diğer ortamlar için değiştirilebilir.

Bu gibi hesaplamalar, en kötü senaryoda (atmosferdeki organik pusular gibi başka emiciler olmadan) DNA gibi biyomoleküllere verilen hasarın, Dünyanın erken döneminde bugünkünden yaklaşık bin kat daha fazla olacağını göstermektedir.

Şekil 10.8'de UV radyasyonunun farklı dalga bantlarına ayrıldığını fark edeceksiniz. UVC radyasyonu 100 ila 280 nm arasındadır (burada yalnızca Dünyanın erken dönemiyle ilgili kısım gösterilmiştir), UVB radyasyonu 280 ila 315 nm arasındadır ve UVA radyasyonu 315 ila 400 nm arasındadır (Şekil 10.8'de yine bu aralığın sadece bir kısmı gösterilmiştir).

Yaşamın başlangıcı açısından iyi haber şu ki UV radyasyonu oldukça kolay filtre edilebiliyor. Toprak, demir, kaya ve diğer alt tabakaların parçacıkları UV radyasyonunu hızla zayıflatır, böylece bileşenler bu katmanların altında korunduğunda radyasyonun etkisi önemli ölçüde azaltılmış olur. Yine de, Dünyanın ilk dönemlerinde açıkta kalan yüzeyler üzerinde gelişen herhangi bir şeyi önlemede veya en azından o gelişimi zorlaştırmada önemli bir faktördür. UV radyasyonunun gerçek kapsamı da büyük ölçüde bilinmemektedir. Erken dönemdeki atmosferde daha yüksek bir toz yüklemesi varsa veya bazı araştırmacıların önerdiği gibi, metan ve uçucu organik bileşiklerin UV ışınımıyla reaksiyonu sonucu ortaya çıkan bir tür hidrokarbon sisi olsaydı, biyolojik olarak etkili ışınım bin kat daha fazla olmayabilir.

Dünyanın ilk dönemindeki yüksek çarpma etkilerinin de benzer şekilde yaşamın ilk ortaya çıkış sürecini zorlayacak bir faktör olabileceği öne sürülmüştür. Çok güçlü çarpma etkisinin gezegeni steril ettiği ya da 2000 K'yi aşan atmosferik sıcaklıklara neden olarak okyanusların ilk birkaç yüz metresini buharlaştırdığı öne sürülmüştür. Bu çarpma etkileri, erken Dünyada büyük hidrotermal sistemler üretmiş olabilir. Geç ağır bombardımanın evrim süreci bakımından bir darboğaza neden olabileceğine ve filogenetik hayat ağacının temelinde hipertermofillerin baskın olmasına neden olabileceğine dikkat çekilmiştir. Okyanusların sık sık kaynaması, erken organizmalar üzerinde yoğun bir seçilim baskısı oluşturabilir ve sıcağı seven özelliklere sahip olanları tercih edebilir. Yaşam tarihi bakımından hipertermofilik ataya dair genetik kanıt, ciddi bir tartışma konusu olmuştur (Bölüm 7). Şimdi, bu erken dönemdeki etkilerin küresel düzeyde bir steriliteye neden olmadığı muhtemel görünüyor. Bu nedenle, erken dönemdeki çarpma etkilerinin evrimsel süreci değiştirmedeki rolünün kesin bir cevabı yoktur.

Bu farklılıklara ve erken yaşamın karşı karşıya kaldığı başka zorluklara rağmen, yaklaşık 3,5 Ga önce Dünyanın farklılaştığını, okyanusların oluştuğunu ve erken kara kütlelerinin ortaya çıktığını biliyoruz. Okyanuslarda ve kara kütlelerinde yaşam için uygun olan habitatların çoğu mevcuttu. Erken yaşa-

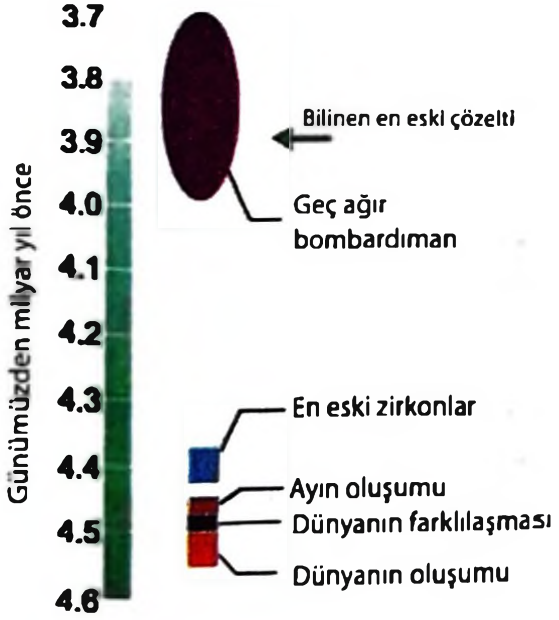
mın başladığı, geliştiği ve kanıtlarını kaya kayıtlarında bıraktığı çevre işte bu çevredir. Bir sonraki bölümde, yaşamın kökeni hakkındaki fikirleri inceleyeceğiz. Bu erken yaşam formlarının özelliklerini ve varlıklarının kanıtlarını Bölüm 12'de keşfedeceğiz. Şekil 10.9'da Dünya tarihinin ilk bir milyar yıllık dönemindeki önemli olaylarından bazılarını özet olarak görebilirsiniz.

Tartışma Noktası: Radyasyon, yaşam için iyi midir?

Hem UV hem de iyonlaştırıcı radyasyon genellikle yaşam için kötü olarak kabul edilir. Etkilerinden biri DNA'da mutasyonlara neden olmaktır. Örneğin UV radyasyonu *serbest oksijen radikalleri* üretebilir ve bunlar dolaylı olarak DNA'ya zarar verebilir. DNA'daki timin bazları arasında kovalent bağların oluştuğu timin (pirimidin) dimerleri dâhil olmak üzere UV radyasyonunun neden olduğu çeşitli hasar biçimleri vardır. Pirimidin dimerlerini bölen ışık kaynaklı bir enzim olan ve eksizyon onarımı yapan fotoliyaz enzimi, hasarlı DNA'nın bir bölümünü ortadan kaldıran ve yeniden sentezleyen bir yolak da dâhil olmak üzere DNA lezyonlarını ortadan kaldıracak şekilde evrimleşmiş çeşitli biyokimyasal yollar ve moleküller vardır. Bu yolaklardan anlaşıldığına göre, radyasyonun neden olduğu hasarı ortadan kaldırmaya yönelik güçlü bir seçilim baskısı olduğu açıktır. Bununla birlikte, daha yüksek UV radyasyonu, mutasyon oranını artırarak evrimi hızlandıracak bir etkide de bulunabilir mi? Belirli bir düzeydeki radyasyon yaşam için iyi olabilir mi? Bu konuda ne düşünürsünüz? Radyasyon yaşamın erken dönemleri için kötü mü yoksa iyi mi, yoksa her iki durum da mümkün mü?

Pfeifer,G.P.,You, Y.H., Besaratinia, A. (2005) Mutations induced by ultraviolet light. *Mutation Research* **57**, 19–31.

Todd, P. (1994) Cosmic radiation and evolution of life on Earth: Roles of environment, adaptation and selection. *Advances in Space Research* **14**, 305–313.



Şekil 10.9 Dünya tarihinde ilk bir milyar yıldaki bazı önemli olaylar

10.10 Sonuç

İlk bir milyar yıl, gezegenimizin tarihinde biyolojik olarak en önemli olaylardan bazılarının meydana geldiği zamandır. Eldeki kanıtlar, gezegeni oluşturacak parçaların bir araya gelip bütünleşmesinden kısa bir süre sonra yüzeyin yaşam için uygun hale geldiğini, Ayı oluşturan çarpma olayları ve erken bombardıman nedeniyle bu sürecin kesintiye uğradığını gösteriyor. Okyanuslar, uçucu maddelerin sıvılaşmasıyla oluştu ve oluşumu süresince birkaç yüz milyon yılı içinde, Dünyanın bugün bildiğimiz birçok habitata sahip olduğu görülüyor. Bu paralelliklere rağmen, Dünyanın erken döneminin bugünkünden çok farklı bazı özellikleri vardı. Çarpma olaylarının ciddi etkileri, günümüzden çok farklı bir anoksik atmosferik bileşim, yüksek UV radyasyonu ve kabuk boyunca geçen yüksek ısı akışı, yaşam için enerji mevcudiyetini ve habitatların dağılımını önemli ölçüde etkileyecek farklılıklardan sadece birkaçıdır. Bu bağlamda, artık yaşamın bu ortamlarda nasıl ortaya çıkmış olabileceğini inceleme ve daha sonra bilim insanlarının erken döneme ait kayalardaki kayıtlarda yaşam kanıtı aramaya nasıl başladıklarını araştırabiliriz.

İleri Okumalar

Kitaplar

Dalrymple, G.B. (1991) *The Age of the Earth*. California: Stanford Üniversitesi Yayınları, Stanford.

Lunine, J.I. (1999) *Earth: Evolution of a HabitableWorld*. Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge.

Makaleler

Albarède, F., Ballhaus, C., Blichert-Toft, J., Lee, C.T.,Marty, B., Moynier, F., Yin, Q.Z. (2013) Asteroidal impacts and the origin of terrestrial and lunar volatiles. *Icarus* 222, 44–52.

Altwegg, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J.J., Bieler, A., Bochsler, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M., De Keyser, J., Eberhardt, P., Fiethe, B., Fuselier,S., Gasc,S., Gombosi,T.I., Hansen,K.C., Hässig, M., Jäckel, A., Kopp, E., Korth, A., LeRoy, L., Mall, U., Marty, B., Mousis, O., Neefs, E., Owen, T., Rème, H., Rubin, M., Sémon, T., Tzou, C.-Y., Waite, H., Wurz, P. (2014) 67P/Churyumov–Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science* doi: 10.1126/science.1261952 Halliday, A.N. (2008) A young Moon-forming giant impact at 70–110 million years accompanied by late-stage mixing, core formation and degassing of the Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 366, 4163–4181.

Harrison, T.M. (2009) The Hadean crust: evidence from >4Ga zircons. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science* 37, 479–505. Hazen, R.M. (2013) Paleomineralogy of the Hadean Eon: a preliminary species list. *American Journal of Science* 313, 807–843.

Hopkins, M., Harrison, T.M., Manning, C.E. (2008) Low heat flow inferred from>4 Gyr zircons suggests Hadean plate boundary interactions. *Nature* 456, 493–496.

Kasting, J.F. (2005) Methane and climate during the Precambrian era. *Precambrian Research* 137, 119–129. Kasting, J.F., Zahnle, K.J., Pinto, J.P., Young, A.T. (1989) Sulfur, ultraviolet radiation and the early evolution of life. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 19, 95–108.

Schaefer, L., Fegley, B. (2010) Chemistry of atmospheres formed during accretion of the Earth and other terrestrial planets. *Icarus* 208, 438–448.

Valley, J.W., Peck, W.H., King, E.M., Wilde, S.A. (2002) A cool early Earth. *Geology* 30, 351–354.

Wood, B.J.,Walter, M.J.,Wade, J. (2006) Accretion of the Earth and segregation of its core. *Nature* 441, 825–833.

Yang, X.Z., Gaillard, F., Scaillet, B. (2014) A relatively reduced Hadean continental crust and implications for the early atmosphere and crustal rheology. *Earth and Planetary Science Letters* 393, 210–219.

Zahnle, K., Schaefer, L., Fegley, B. (2010) Earth's earliest atmosphere. *Cold Spring Harbour Perspectives in Biology* 2, a004895.

11

YAŞAMIN KÖKENİ

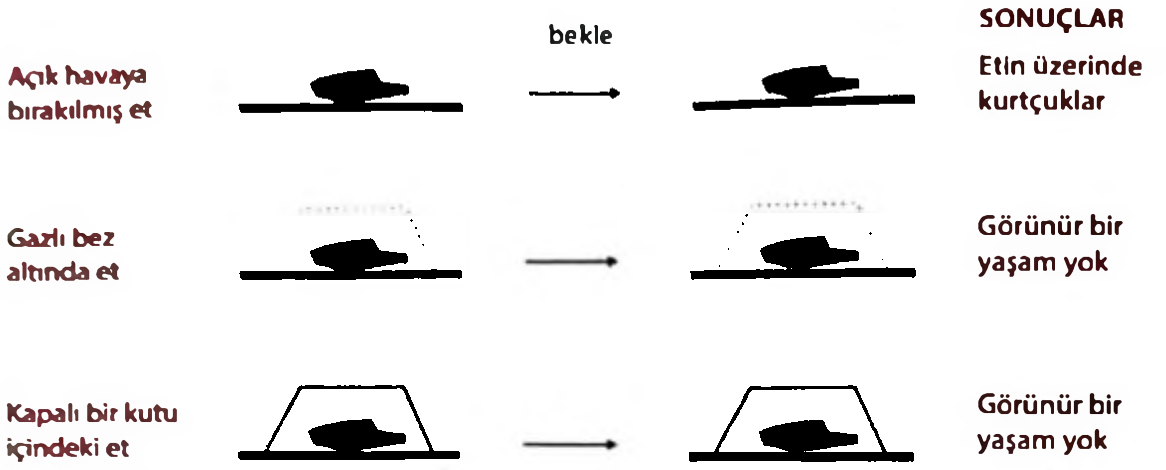
Öğrenme Çıktıları

- Yaşamın kökeni hakkındaki fikirlerin tarihinin anlaşılması.
- Gezegenler arası çevredeki karbon türlerini ve Dünyanın ilk haline taşınmasının anlaşılması.
- Dünyanın ilk döneminde organik madde üretimine giden bazı olası yolakların anlaşılması.
- RNA dünyasının ve ona atfedilen bazı özelliklerin anlaşılması.
- İlk hücrelerin varsayılan doğasının tanımlanması.
- Yaşamın kökenine ilişkin yolaklara hakkındaki düşüncelerin tartışılabilmesi.

11.1 Yaşamın Kökeniyle İlgili İlk Düşünceler: Kendiliğinden Oluşum

Karbon moleküllerinin yıldızlararası ortamda nasıl sentezlenebileceğini araştırmıştık ve bu da karbon kimyasının evrende yaygın olduğunu ortaya koymuştur. Astrokimya bilgisi, yaşamın temel atomik ve moleküler yapılarının anlaşılması ve Dünya tarihinin ilk milyar yılındaki çevresel koşullara ilişkin kavrayışa sahip olarak astrobiyolojinin en temel sorularından birini sormaya başlayabiliriz: yaşam nasıl ve neredeydi ortaya çıktı? Bu bölümün konusunu bu soru oluşturmaktadır.

Başlangıç olarak geçmişte yaşamın ne olduğuna ilişkin ortaya atılmış fikirleri ve insanların yaşamın abiyotik dünyadan nasıl ortaya çıktığı hakkındaki düşüncelerini anlamak için biraz tarihe bakabiliriz. Eski Yunanlılar bir düşünce biçimi olan "materyalizm"i kabul ediyordu: buna göre evrendeki fiziksel süreçler maddenin yapısı tarafından açıklanabilir. Bu düşünce hattı en güçlü şekilde, tüm maddenin parçacıklardan oluştuğuna inanan Demokritos (yaklaşık MÖ 460-370) gibi atomcular tarafından geliştirildi. Onlar için atomlardan yapılmış bir tür ateş olan ruh, yaşayan varlıkların bir parçasıydı. Eski Hintli ve İslami düşünürler de benzer düşünceler geliştirmiştir. Bu düşünce okulu, maddeyi belirli özelliklerle dolduran ruhlar, tanrılar ve çeşitli güçler gibi daha batıl etkenlerle açıklayan önceki fikirlerden ayrılıyordu.



Şekil 11.1 Francesco Redi'nin kendiliğinden oluşumu çürüttüğü zarif deneyi (Kaynak: Charles Cockell).

Öte yandan kimyasal elementler bir kez keşfedildikten sonra, yaşamın onu bir şekilde farklı kılan kısmını fiziksel bir temelde tanımlamak giderek daha zor hale geldi. On yedinci yüzyılda Avrupa Aydınlanmasının ilk yıllarında, "canlılık" (vitalizm) kavramı yeniden gündeme geldi: yaşam, ölüleri canlılara dönüştüren hayati bir güçle aşılanmıştı.

Bu değişen fikirlerin yanı sıra, iki bin yıllık bir kavram olan ve **abiyotik** materyalin canlı maddeye dönüştürülebildiğini ifade eden **kendiliğinden oluşum** (spontnous generation) kavramı da etkili oldu. Bu süreç, maddenin maruz kaldığı çevresel koşullar ile abiyotik materyale "hayati ısının" geçmesinin bileşimi sonucunda meydana geldi. Kendiliğinden oluşum, farelerin buğdaydan ve kurtçukların etten nasıl ortaya çıktığını açıklıyordu. On altıncı yüzyıldaki pek çok metin, eski iç çamaşırlarıyla buğday kabuklarının bir kavanozda fare oluşturmak amacıyla karıştırılarak kullanılabileceğine ilişkin garip deneylere örnekler verir.

İtalyan bir doktor ve doğa bilimci olan Francesco Redi (1626-1697), et kullandığı zarif bir deneyle kendiliğinden oluşuma meydan okuyan ilk insanlardan biriydi ve etin üzeri bir kapakla kapatıldığında kurtçuk oluşmayacağını gösterdi. Ancak aynı zamanda, üzerinde "hayati güce" izin verecek fakat sineklerin girmesine izin vermeyecek kadar küçük delikleri olan gazlı bezle örtülse bile kurtçukların oluşmayacağını da gösterdi. Deneyin kontrolü, kurtçukların ortaya çıktığı atmosfere tamamen maruz kalan etti. Redi'nin deneyi (Şekil 11.1) bugün bize saçma ve basit görünüyor ancak kendi dönemi için et üzerinde kurtçukların oluşmasının canlı bir güçle açıklanamayacağını zarif bir şekilde göstermişti.

Bu veriler, kurtçukların, sinek olduğu belirlenen bir tür taşıyıcı tarafından üretilmesi gerektiği gerçeğine ilişkin bazı ilk çıkarımlar yapılmasını sağladı.

Öte yandan sinekler için kendiliğinden oluşumun söz konusu olmadığı kanıtlansa da bu düşünce o kadar kolay bir şekilde ortadan kalkmayacaktı. Zamanının saygın bir bilim adamı olan Turbevill Needham (1713-1781), ünlü

Mutton-Gravy deneyini yayımladı. Artan et suyundan biraz almış ve onu ateşte ısıtmıştı. Bunu tıpalı şişelere aktardıktan sonra et suyunun, dış dünyadan yalıtıldıktan sonra, ısıtılmış olsun ya da olmasın, nasıl mikroskobik yaşamla dolup taştığını gösterdi. Böylece, kendiliğinden oluşumun kanıtlandığını tahmin etti. Et suyunun organik maddesi bir "yaşam gücüyle" aşılanmıştı.

Artık günümüzde et suyunun ya ateşten alındıktan sonra şişelere dökülmek üzereyken havadaki mikroplarla kontamine olduğunu ya da spor oluşturan bakteriler içerdiğini biliyoruz (Bölüm 7).

Kurbağa gibi hayvanlarda organların yenilenmesi konusundaki öncü çalışmalarıyla tanınan İtalyan bilim adamı Lazaro Spallanzani (1729-1799), teoriye yönelik iyi bir deneme yapan ilk kişi oldu. Et suyu kullanarak Needham'la aynı deneyleri yaptı ancak daha dikkatliydi. Et suyu yapmak için kullanılan ıslatılmış tohumları önce şişelere koydu, onları çevreden yalıttı ve sonra içlerindeki her şeyi öldürmek üzere onları ısıttı. Bu şekilde havadaki partiküllerin şişenin içindekileri kirletmesi önlenebilir. Kısa süreler boyunca ısıtılan tüplerde büyük organizmalar çok hızlı bir şekilde öldüler (şimdi bunların büyük amipler olan protozoa olması gerektiğini düşünüyoruz. Bunlar ısıya dayanıklı değildirler). Spallanzani "alt sınıf" olarak adlandırdığı organizmaların, hareket etmeyene kadar dakikalarca ısıya tahammül edebildiklerini fark etti. Bunlar neredeyse kesinlikle bakteriydi. Spallanzani bu önemli deneyde, mikropların ısıdan farklı şekilde etkilendiğini, bazılarının diğerlerinden daha duyarlı olduğunu göstermişti. Sonunda, yeterince uzun süre ısıtılırsa şişelerinin, kendi sözleriyle "mutlak bir çöle" dönüştürülebileceklerini ortaya koydu. Sterilizasyon kavramını ortaya çıkarmıştı.

Şimdi, bu olağanüstü bir dizi deneyin kendiliğinden oluşum fikrini sona erdireceğini düşünebilirsiniz ama öyle olmadı. Onu eleştirenler, Spallanzani'nin şişelerini kapatarak organik maddenin atmosferle ve dolayısıyla herhangi bir "yaşam gücüyle" temasını önlediğini ileri sürdüler. Bunun, Avusturyalı bir bilim adamının bu yeni eleştiriyi ele almak üzere deneysel bir cihaz yapmasından 38 yıl önce olması dikkat çekicidir.

Et suyuna mikropları bulaştırmadan hava sağlamanın bir yolu, tüpün havanın girdiği üst kısmını ısıtmaktır. Steril etmek amacıyla alt kısmından alevle ısıtılan açık bir tüpün düzeneğe eklenmesi, Theodore Schwann'ın (1810-1882) kaynatılmış şişelerine temiz hava sağlamasına olanak vermişti. Schwann, elde ettiği sonuçları 1837'de *Annals for Physics and Chemistry*'de yayımladı ve bu sonuçlar kuşkuları ortadan kaldırıyordu.

Buna rağmen kendiliğinden oluşum teorisinin ortadan kalkmaması insanı biraz çileden çıkabilir. Başkaları Schwann'ın deneylerini tekrarlamakta zorlandı, kaynatıp ısıtılmış havanın içinden geçmesine olanak sağladıklarında şişelerde yaşamın yine de ortaya çıktığını gördüler. Elde ettikleri sonuçlardaki bu tutarsızlık tartışmanın sürmesini körüklemişti.

Schwann'ın gözlemleri, mayaların nasıl çoğaldığını anlamak üzere deneyler

yapan Fransız Charles Cagniard de la Tour (1777-1859) tarafından da doğrulandı. 1838'de *Annals of Chemistry and Physics*'te astrobiyoloji ve yaşamın sınırlarına ilişkin önemli bazı temel keşifler hakkında bir rapor yazdı.

Çalışması sırasında maya hücrelerinin donarak hayatta kalabileceğine dair ilk gözlemleri yaptı. Bu, birçok yüksek organizasyonlu hayvandan önemli bir farklılıktı ve daha sonra yaşamın permafrost ve kutup ortamlarında nasıl sürebileceğini anlama konusunda kayda değer bir veriydi. Bu gözlem, donmuş haldeki Dünya dışı ortamlarda, eğer varsa, yaşamın nasıl devam edebileceğine ilişkin değerlendirmeler bakımından hala büyük öneme sahip. de la Tour, mikropların oksijen olmadan da çoğalabileceğini gösteren ilk kişi olarak tanınmayı hak ediyor. Kendisi mayaların karbondioksitli atmosferde fermantasyona neden olabileceğini de göstermiştir. Gözlemleri bununla da kalmadı. Su olmadığında maya hücrelerinin ölmediğini fark etti. Böylece mikropların donmaya, kuru ortamlara toleransı ve oksijensiz ortamda üremesi gibi konuları kayda geçirmiştir.

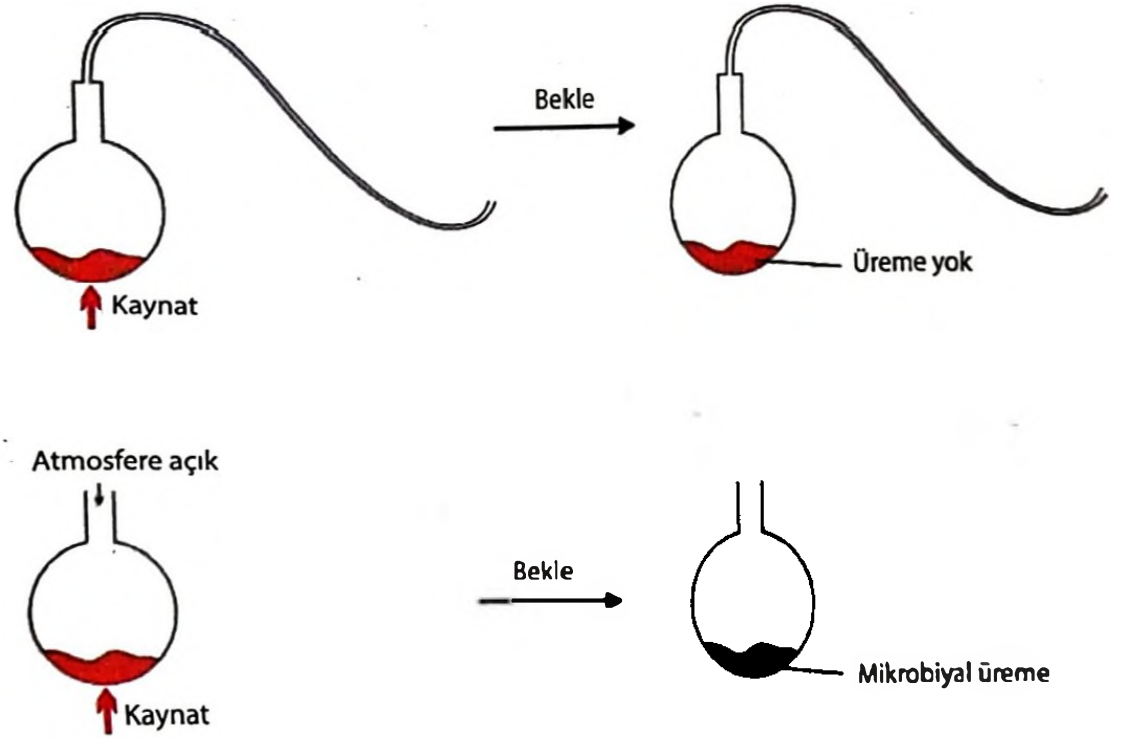
Mayayla yapılan harikulade gözlemlere rağmen, mikrop teorisi (germ teori) biraz daha mücadele vermeden kabul görmeyecekti. Alman bilim adamı Justus von Liebig (1803-1873) bu sonuçlardan etkilenmemişti. Bir kimyager olarak, bu yeni çıkmış organizmalara atfedilen tüm reaksiyonların aslında kimyasal olduğuna ve bunları biyolojiye başvurmadan açıklayabileceğinize inanıyordu. 1839'da cesurca "Fermantasyona neden olma yeteneği"... mayayla temas yoluyla ortaya çıkan bir etkiye bağlı değildir" diye yazmıştı. Bu görüş yazılarına ve derslerine de yansıyacaktı. Fermantasyon için gerekli olan tek şeyin kimya olduğu konusundaki ısrarı suları bulandıracaktı. Bilimin birçok alanında geçerli olduğu gibi, tamamen yanılmış değildi.

1890'ların sonlarında, Eduard Buchner (1860–1917) aslında maya hücrelerinin sadece özütüyle şekeri mayalandırabileceğinizi gösterdi. Artık maya hücrelerinin kendileri ölü olsa bile fermantasyon sürecinde gereken enzimleri saldığını biliyoruz. Bu bazı yönlerden Liebig'in fikirlerini doğruladı; kimyasal reaksiyonların fermantasyon için yeterli olduğunu ve burada söz konusu olanın sadece canlılardan kaynaklanan kimyasal reaksiyonlar olduğunu göstermişti. Buchner'in yaşama ilişkin kimyasal reaksiyonları inceleme bilimi olan biyokimyanın kurulmasına katkıda bulunduğu söylenebilir. Bununla birlikte, Liebig'in fermantasyonun nedeni olarak tamamen kimyaya odaklanması, mikrop teorisini kabul etmek isteyenle üzerinde bir süreliğine olumsuz etkide bulunmuştur.

Hikâyenin bu kısmında ünlü Fransız Louis Pasteur (1822-1895) sahneye çıkıyor. Deney planlaması söz konusu olduğunda Pasteur harikulade bir berraklığa sahipti. Maya çoğalması üzerine yaptığı gözlemlerini yayımlamaya başladı. Daha sonra, sütün hızlı ve kısa süreli ısıtılmasının, tadını değiştirmeden mikropları öldürebileceği ve böylece sütün korunmasına yardımcı olabileceği Pastörizasyon sürecini ortaya koyacaktı. Bilimsel ivmesi arttıkça, zamanı-

nın bazı temel inançlarına meydan okumaya başladı. Kendisini ve diğer bilim insanlarını kendiliğinden ortaya çıkma (spontan generasyon) düşüncesinden daha fazla rahatsız eden bir şey yoktu.

Bu asırlık soruya verdiği yanıt, ustaca yapılmış basit bir deneydi. Ünlü kuğu boyunlu cam kapları icat etti (Şekil 11.2). Bu cam kaplar, maya özleri, su biberi ve idrar gibi çeşitli sıvılar içeriyordu. Onları birkaç dakika kaynayana kadar ısıttı ve sonra da soğuttu. Kuğu boyunlu cam kaplar, Schwann tarafından kullanılan şişelerin çok basit bir modifikasyonuydu. Kuğu boyunları, havadan taşınan organizmaların et suyuna girmesini engelledi. Buna karşılık, kuğu boynunun çıkarıldığı cam kaplar hızla kontamine oldu orada mikroplar çoğaldı. Bu deney, et sularının havadaki organizmalar tarafından kontamine olduğunu ve steril bir ortamda kendiliğinden yaşamın oluşamayacağını ortaya koymuştu. Pasteur, sonuçları olağanüstü netlik ve önem taşıyan bir cümleyle bildirdiği dikkat çekici makalesini şu şekilde sonlandırıyordu: "Havada sürekli olarak gerçek mikroplardan ayırt edilemeyen organize varlıklar bulunmaktadır." Bu cümleyle birlikte mikrobiyoloji, tıp ve çevre anlayışımızda merkezi bir öneme sahip olmuştu. Pasteur'ün deneyi, Fransız Bilimler Akademisinin 1859'da bilim insanlarını kendiliğinden oluşumu çürütmelerine yönelik ödülüne bir yanıt olmuştu.



Şekil 11.2 Louis Pasteur'ün kuğu boyunlu cam kapları ve kendiliğinden oluşumu çürütme deneyi. Kuğu boyunları, et suyu ısıyla steril edildikten sonra mikropların doğrudan şişelere düşmesini önler. Açık boyunlu şişeler temasa açıktır ve mikrobiyal çoğalma meydana gelir (Kaynak: Charles Cockell).

Yaşamın Dünyada süreklilik arz eden bir süreç içinde oluşumuna yönelik bir fikir olarak kendiliğinden oluşum teorisi sona ermesine rağmen, bunun bir kez gerçekleşmiş olması gerektiğini biliyoruz. Hayat ilk ortaya çıktığında cansız kimyadan canlılığa geçiş oldu. Yani kendiliğinden oluşum sorunu hala tam anlamıyla ortadan kalkmadı. Bununla birlikte, kendiliğinden ortaya çıkmanın modası geçmiş eski fikirleriyle karıştırılmaması amacıyla bu geçiş bugün genellikle abiyogenez olarak adlandırılır. Basit moleküller daha karmaşık olanları ve nihayetinde kendi kendini kopyalayan bir organizmayı oluşturmak üzere nasıl bir araya geldi?

11.2 Yaşamın Kökenine Yönelik Bazı Olası Fikirler

Yaşamın kökenini açıklayan çok sayıda kapsamlı teori vardır. Bunlardan biri, yaşamın başka bir yerden gelmiş olmasına dair teoridir (panspermi). Elbette bu, sorunu yalnızca başka bir yere taşıdığı için sorunumuzu çözmüş olmuyor. Bunun böyle olduğuna dair kanıt bulsak bile, yaşamın nerede ve hangi ortamda ortaya çıktığı sorusuyla karşı karşıya kalırdık. Yaşam başka bir tür yıldızın etrafındaki uzak bir gezegende ortaya çıktıysa, yaşamın başlangıcı için olası çevreyi kopyalamak veya incelemek çok zor olacaktır. Bununla birlikte, yaşamın gezegenler arasında aktarılabilmesi olasılığı daha sonra tartışılacaktır.

Başka bir olasılık da, yaşamın, eğer bu tür fikirlere katılırsanız, Tanrı veya uzaylı bir ırk gibi daha yüksek düzeyde bir varlık tarafından yaratılmış olmasıdır. Bu kitapta bu fikirleri çürütmeye çalışmakla zaman harcamayacak olsam da, deneysel olarak sınanamayacakları için çok bir değer arz etmemektedirler. Zira bu fikirler de ilk moleküllerin nasıl bir araya gelerek Dünyadaki yaşamın ataları olan kendi kendini kopyalayan ilk organizmaları oluşturduğu sorusundan, bunu kim ya da ne yapmaya karar vermiş olursa olsun, hala kaçamıyorlar.

Dolayısıyla, yaşamın başlangıcına ilişkin süreç ve çevre hakkındaki görüşümüz ne olursa olsun, şu anda bu probleme deneysel olarak sınanabilir olan tek yaklaşım, onun Dünya benzeri bir ortamda (ve böyle bir ortamın uygun bir sıvı gerektirdiğini düşündüğümüzü göz önünde bulundurarak) meydana geldiğini varsaymak ve daha sonra bu kökene giden yollar önermek üzere Dünyanın ilk dönemleri ve evrendeki organik kimya hakkındaki bilgilerimizi kullanmaktır. Bu bölümün konu edineceği yaklaşım budur.

11.3 Yeryüzündeki Organik Bileşiklerin Sentezi

Yaşamın nasıl ortaya çıktığı sorusu, uzun zamandır biyologların ilgisini çekmiştir. Bilindiği üzere Charles Darwin (1809-1882), 1871'de arkadaşı Joseph Hooker'a (1817-1911) yazdığı özel bir mektupta şöyle diyordu: "Ama eğer (ve Ah! Ne büyük bir eğer!) Her türlü amonyak ve fosforik tuzlar, ışık, ısı, elektrik vb ile birlikte, bir protein bileşiğinin kimyasal olarak daha karmaşık değişikliklere

uğramaya hazır olarak oluştuğunu tasavvur edebilsek, günümüzde bu tür maddeler anında yutulur veya yok edilir, ama şimdi var olan canlılar oluşmadan önce durum böyle olmazdı".

Darwin'in spekülasyonları önemliydi, çünkü yaşamın kökeninin, bir enerji kaynağı sağlayacak belirli bir ortam ve kimyasal sentezlerin gerçekleşeceği uygun bir çevre gerektirdiğini belirlemişti. Ayrıca, enteresan bir şekilde, üretilen organik materyali yemesi muhtemel olan yaşayan organizmalar (heterotroflar) nedeniyle bugün yaşamın kökenini bulmanın zor olabileceğine işaret eden ilk kişiydi.

Yirminci yüzyılın başlarında, Aleksandr Oparin (1894–1980) ve John Haldane (1892–1964), birbirinden bağımsız olarak, sulu ortam UV radyasyonuyla bombardıman edildiğinde okyanusun karmaşık organiklerin sentezlendiği dev bir prebiyolojik reaktör olabileceğini öne sürdüler. Oparin, koaservatlar olarak adlandırdığı organik kümelenmelerin oluştuğunu ve bunların art arda daha karmaşık bir kimya ortaya koymak üzere geliştiğini öne sürdü. Bunlar sonuçta ilk hücrelere benziyorlardı. Bu Oparin-Haldane hipotezi, yaşamın kökenine ilişkin ilk fikirlerin zeminini hazırladı.

Organik maddelerin Dünyanın erken dönemlerine benzeyen bir ortamda sentezlenip sentezlenemeyeceği sorusunu yanıtlamaya çalışan ilk başarılı deney, 1953'te Stanley Miller (1930–2007) ve Harold Urey (1893–1981) tarafından gerçekleştirildi. Bu deneyde, elektrik boşalması varlığında karşımda reaksiyonlar gerçekleştiğinde ne olacağını araştırmak üzere Dünyanın ilk dönemlerindekine benzeyen yapay bir atmosferi kullandı.

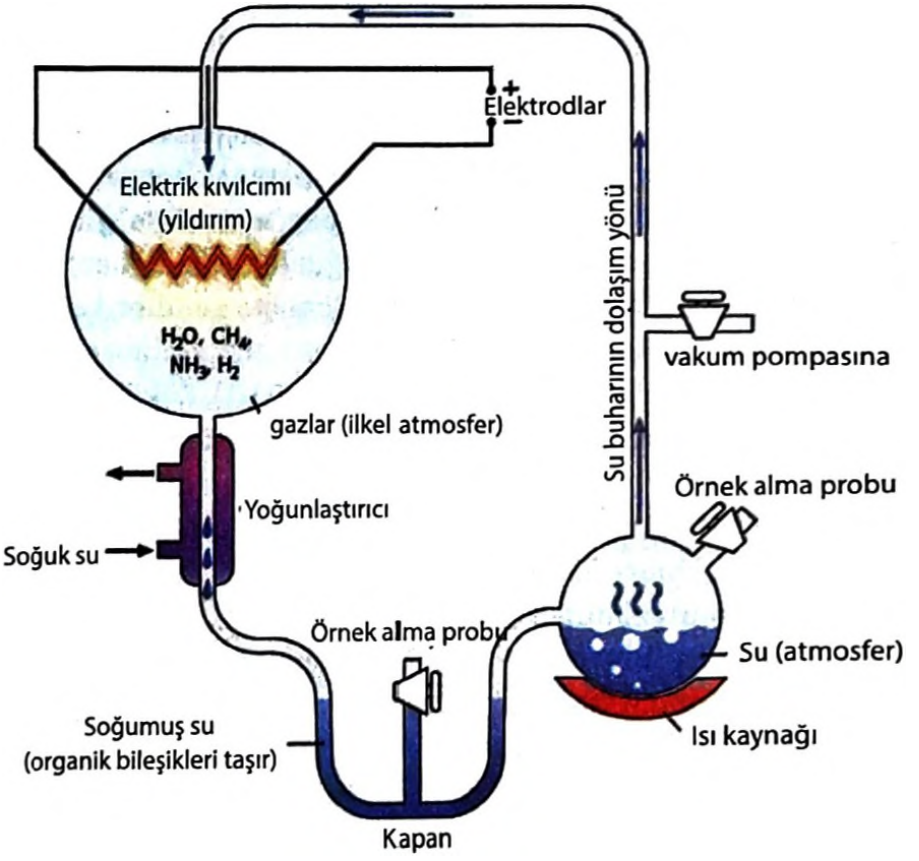
Deney düzeneği (Şekil 11.3) oldukça basitti. Su içeren bir kap, erken dönemdeki okyanus yerine geçiyordu. Su buharının metan, amonyak ve hidrojen karışımında elektriksel deşarja maruz kaldığı yapay "atmosfere" girmesi için ısıtılır. Bu işlemden çıkan buhar daha sonra bir yoğunlaştırıcı kullanılarak soğutulur ve aparatın altındaki bir kapanda toplanır. Sonuçta amidler, karboksilik asitler ve en önemlisi alanin, aspartik asit ve diğerleri gibi aminoasitler dâhil olmak üzere çeşitli moleküllerin ortaya çıkmıştı (Tablo 11.1). Kükürt içeren aminoasitler yoktu, ancak Urey-Miller deneyi kükürt içeren gazlar (örneğin H_2S) içermediğinden bu şaşırtıcı değildi. Reaksiyona H_2S dâhil edildiğinde kükürt içeren aminoasitler üretilir. Aromatik aminoasitlerin (triptofan, tirozin, fenilalanin ve histidin) üretilmemesi, Urey-Miller deneylerinde gaz fazı reaksiyonlarında halka yapılarının sentezlenmesinin zorluğuyla açıklanabilir. Bu da, bu aminoasitlerin başka reaksiyonlardan veya çevreden geldiğini ortaya koyuyor olabilir.

Urey ve Miller'ın kullandığı karışım fazlasıyla indirgeyiciydi ve bugün Dünyanın ilk dönemlerindeki atmosferinin bu kadar indirgeyici olmadığını düşünüyoruz. Atmosfer CO_2 içeriyordu ancak deneye kıyasla muhtemelen daha düşük H_2 ve CH_4 konsantrasyonlarına ve daha yüksek N_2 konsantrasyonuna sahipti. Gaz fazı kimyasından elde edilecek organik bileşik verimi genellikle bir CH_4 / CO_2 oranının 1'den büyük olmasını gerektirir. Ancak daha modern deney-

ler, Dünyanın daha okside haldeki yapay ilkel atmosferlerinin de aminoasitleri üretilebileceği fikrini doğrulamıştır. Yapay atmosferinde CO_2, N_2 ve H_2O'nun kullanıldığı deneylerde (asiditeden kaynaklanan aminoasit yıkımını önlemek için pH'ı tamponlayan kalsiyum karbonat ve demir varlığında) aminoasitler üretilmiştir. Bu deneyler basit kimyasal bileşiklerin, enerji sağlandığında, reaksiyon vererek prebiyolojik öneme sahip bileşikleri üretebileceği fikrini başarılı bir şekilde gösterse de şimdi başka bölgelerin de (daha sonra tartışacağımız hidrotermal menfezler vb) atmosferdeki gaz fazı reaksiyonlarına ek olarak prebiyotik kimya için uygun bölgeler olabileceği düşünülmektedir.

Urey-Miller deneyinin sonuçları, Güneş Sisteminin diğer kısımlarından elde edilen verilere gerçekten çarpıcı bir benzerlik gösteriyor. Venüs ve Mars'ın CO_2 ve N_2'nin hâkim olduğu atmosferlerinde organik moleküllerin olmaması, Satürn'ün uydusu olan Titan'ın hidrokarbondan oluşan sisli yapısıyla taban tabana zıttır. Yüksek metan konsantrasyonu bu uydunun atmosferinin kimyasında önemli bir rol oynar ve radyasyon etkisi altında HCN, etan, propan, benzen ve özellikleri henüz belirlenmemiş daha karmaşık hidrokarbonlar dâhil olmak üzere çeşitli bileşikler üretir.

Urey-Miller deneyi elektrik deşarjlarına odaklanmıştı ancak enerji, UV radyasyonu, jeotermal ısı, darbe şoku ve kozmik ışınlarla da sağlanabilir. Dünya-



Şekil 11.3 Urey-Miller deneyinde kullanılan aygıtı gösteren bir şema (Kaynak: wikicommons, YassineMrabet).

nın ilk dönemlerindeki en büyük *sürekli* enerji kaynağı, bugün olduğu gibi, Güneş ışığıydı. Miller'in zamanından bu yana, Dünyanın erken dönemdeki teorik koşulları altında organik bileşiklerin verimlerini incelemek üzere kısa dalga boyuna sahip UV ışığı ve farklı ilk gaz karışımları kullanılarak birçok deney yapılmıştır. Bu deneyler organik moleküllerin üretildiğini ortaya koymuştur. Dünyanın erken dönemindeki bir başka enerji kaynağı, asteroit ve kuyruklu yıldız çarpmalarının neden olduğu şok basınçlarıyla ilişkiliydi. Laboratuvarda yapılan şok deneylerinin, UV radyasyonundan yaklaşık bir milyon kat daha verimli şekilde HCN, aldehit ve aminoasit ürettiği gösterilmiştir. Seyrek olarak ortaya çıkan bu büyük etkiler, büyük miktarlarda prebiyotik materyal üretmiş olabilir. Darbe şokları, Urey-Miller deneyine benzer şekilde, daha okside durumdaki atmosferlere kıyasla indirgenmiş atmosferlerde aminoasitler gibi prebiyotik bileşiklerin üretilmesinde çok daha etkilidir.

Tablo 11.1 Urey-Miller deneyinde CH_4, NH_3, H_2O ve H_2'ye elektrik deşarjı verilerek üretilen bileşiklerden sadece birkaçı.

Ortaya çıkan bileşik	(%)
Glisin	2,1
Glikolik asit	1,9
Alanin	1,7
Laktik asit	1,6
N-Metil alanin	0,07
α-Amino-*n*-bütirik asit	0,34
α-Aminoizobutirik asit	0,037
β–Alanin	0,76
Suksinik asit	0,27
Aspartik asit	0,024
Glutamik asit	0,051
Iminodiasetik asit	0,37
Formik asit	10
Asetik asit	0,51

11.3.1 Olası Reaksiyon Yolakları

Günümüzde yapılan kapsamlı organik kimya deneyleri, yaşamın ilk moleküllerinin veya "yapı taşlarının" nasıl ortaya çıkmış olabileceği konusunda oldukça tatmin edici bazı fikirler vermiştir. Dünyanın erken döneminde var olan moleküllerin envanterinin önemli bir bileşeni olduğu düşünülen (ve uzayda da tespit edilmiştir) hidrojen siyanür (HCN), bir dizi önemli bileşik oluşturmak üzere reaksiyona girebilir. Örneğin, aminoasitleri inceleyen bir Alman kimyager olan Adolph Strecker'in (1822-1871) adından alınan Strecker sentezinde, HCN'nin amonyak ve bir aldehit ile reaksiyonu ve ardından gerçekleşen hidroliz sonucunda aşağıda gösterildiği gibi bir aminoasit oluşur:

$$R\text{-}CHO\ (aldehit) + HCN + NH_3 \rightarrow R\text{-}CH(NH_2)\text{-}CN + H_2O \quad (11.1)$$

Daha sonra gerçekleşen hidroliz:

$$R\text{-}CH(NH_2)\text{-}CN + H_2O \rightarrow R\text{-}CH(NH_2)\text{-}CONH_2 \quad (11.2)$$

$$R\text{-}CH(NH_2)\text{-}CONH_2 + H_2O \rightarrow R\text{-}CH(NH_2)\text{-}COOH\ (aminoasit) + NH_3 \quad (11.3)$$

Bu reaksiyondaki sorun, yaşam için gerekli olan farklı aminoasitleri oluşturmak için aldehitlerin tamamını gerektirmesidir. Bu reaksiyonların doğal çevre koşulları altında dikkate değer bir verimle meydana gelebileceği henüz gösterilmemiştir. Bununla birlikte, Strecker sentezi makul bir yol sağlar ve gezegeni oluşturacak disk yapısında ve sonunda karbonlu kondritler gibi karbonlu meteoritlere dâhil olan materyalde aminoasitleri ortaya çıkaracak bir yol olabilir.

İlkel yapıdaki şekerleri ortaya çıkarabilecek kimyasal reaksiyonlar tespit edilmiştir. HCN'ye benzer şekilde formaldehitin (HCHO) polimerizasyonu, formoz reaksiyonu yoluyla şeker oluşumuna yol açabilir. Reaksiyon, glikolaldehit yapmak üzere yoğunlaşan iki formaldehit molekülüle başlar, bu da gliseraldehit yapmak üzere başka bir formaldehit molekülüyle reaksiyona girer. Gliseraldehitin izomerizasyonu dihidroksiaseton oluşturur, bu da glikoaldehitle reaksiyona girerek şeker, ribuloz ve başka bir izomerizasyon yoluyla, nükleik asitler için çok önemli bir şeker olan riboz oluşturur. Dihidroksiaseton ayrıca şekerler, tetrüloz ve aldoltetroz üretmek üzere formaldehit ile reaksiyona girebilir. Bu reaksiyonlar, yüksek konsantrasyonlarda formaldehitin ve alkali koşulların varlığını gerektirir. Dünyanın erken döneminde bunların ne miktarda bulunduğu bilinmemektedir. Formaldehit gaz fazında oluşabilse de (örn. kısa dalga boylu ultraviyole radyasyonun CO_2 ve H_2O üzerindeki etkisiyle ortaya çıkan radikallerin üretimi yoluyla), formoz reaksiyonunu sürdürecek yüksek konsantrasyonlarda formaldehitin birikebildiği karasal bölgelerin daha uygun bölgeler olduğu düşünülmektedir.

Hidrojen siyanür (HCN), prebiyotik reaksiyon süreçlerinde oldukça yaygın olarak bulunur ve hipotez olarak önerilen aminoasit ve şeker oluşumu yolaklarında bir rol oynamakla kalmaz aynı zamanda nükleobazların üretiminde de yer almış olabilir. Diğer HCN molekülleriyle birlikte yoğunlaşıp HCN diaminomaleonitril oluşturabilir. Bu molekül, adenin oluşturacak şekilde daha fazla HCN ile reaksiyona girebilir. Reaksiyon veriminin fazla olması için HCN konsantrasyonlarının yüksek olması gerekebilir ancak bu muhtemelen buharlaşan su kütlelerinde veya donmanın taneler arası boşluklardaki bileşiklerin konsantrasyonunu artıracağı mevsime bağlı olarak donmuş havuzlarda meydana gelmiş olabilir. HCN'nin amonyak içindeki reaksiyonları, sitozinin öncüsü ve CN içeren bir başka bileşik olan guanin ve siyanoasetilen üretebilir. Fosfatlar ve şekerlerle karıştırılıp dehidrasyon reaksiyonlarına maruz bırakılan bu bileşenler, nükleik asitlerin yapı taşları olan çok sayıda nükleosit ve nükleotit verebilir.

Polimerizasyon ve ardından daha küçük prebiyolojik moleküller halinde hidrolize ulaşmanın bir başka yolu da Urey-Miller tipi ortama geri dönmektir. Gaz karışımları, özellikle indirgenmiş gazlar, UV radyasyonuna veya iyonlaştırıcı radyasyona maruz kaldığında, ortaya çıkan önemli bir ürün, Carl Sagan (1934–1996) ve Bishun Khare (1933–2013) tarafından 'tholins' olarak adlandırılan (eski Yunancada çamurlu anlamına gelen *tholos* sözcüğünden türetilmiştir) kahverengi-turuncu-kırmızımsı bir maddedir. Tholinler, çeşitli amino asitleri ve diğer bileşikleri vermek üzere hidrolize olabilen (suda reaksiyona giren) içeriği belirlenmemiş bileşime sahip (radyasyon koşullarına ve ilk gaz bileşimine bağlı olarak değişir) yüksek düzeyde çeşitli polimerize organik moleküllerdir.

Burada ortaya çıkan sorulardan biri, Dünyanın erken döneminde azotlu bileşiklerin nasıl oluştuğudur. N_2 gazındaki azot-azot bağı çok güçlüdür ve kolayca ayrılamaz. Prebiyotik dönemde, biyolojik azot fiksasyonu olmadan önce, böyle bir dönüşüm nasıl sağlandı? Bunun gerçekleşmesinin pek çok yolu olabilir. Şimşekler N_2'yi ikiye bölebilir. CO_2'nin baskın olduğu erken bir atmosferde, her yıl 3×10^9 ila 10^{10} mol NO oluşabileceği öne sürülmüştür. Atmosfere giriş ve çarpışma sırasında atmosfere verilen enerji, bu reaksiyonlar için yeterli olan yerel sıcaklıkları ~1500 K'ye yükseltebildiğinden, çarpma olaylarında da azot oksit üretimi meydana gelebilir. Amonyak, uçucu maddelerin erken dönemdeki bileşiminde mevcut olabilir. Bu nedenle, biyolojik azot fiksasyonu olmadığında dahi, daha sonra prebiyotik kimyada rol oynayabilecek tutuklanmış azot bileşiklerinin üretimine giden yollar var gibi görünüyor.

Tartışma Noktası: Yaşamın başlangıcı kaçınılmaz mı?

Organik bileşiklerin oluşumu için uygun hidrotermal alanlar veya diğer ortamların olduğu her yerde yaşamın ortaya çıkması kaçınılmaz mıdır? Bu soru astrobiyoloji için kritik bir sorudur, çünkü eğer bu kaçınılmazsa, o zaman başka bir yerde de istatistiksel olarak yaşamın ortaya çıkma şansı çok yüksektir. Eğer bu olağandışı bir durumsa, yaşam nadiren ortaya çıkabilir. Yaşamın kökeni olağandışı bir durumsa, yaşanabilir gezegenlerin sayısı çok fazla olsa bile, istatistiksel olarak ciddi bir ölçüde yaşam gelişmeyebilir. Yaşamın bir bileşeninin bir araya gelmesi için gerekli olan çok önemli bir reaksiyon, kimyasal olarak olağanüstü nadir bir olaysa ve çok özel bir ortam gerektiriyorsa, daha yaşanabilir gezegenleri keşfetmek, yaşam bulma olasılığı açısından pek de bir şey ifade etmeyebilir. Siz ne düşünüyorsunuz? Yaşamın başlangıcı kaçınılmaz mıdır ve eğer gerçekleşecekse sizce ne kadar zamana ihtiyaç vardır? Bu soruya kesin bir cevap bulmanız beklenmiyor! Bununla birlikte, bununla ilgili bir tartışma, yaşamın ortaya çıkması için gerekli olan reaksiyonlar hakkında çeşitli derinlemesine tartışmaları teşvik edebilir.

11.4 Dünya Dışı Ortamdan Geliş

Bölüm 9'da, yıldızlararası çevrede, moleküler gaz bulutlarından gezegenleri oluşturacak disklere kadar çok çeşitli ortamda karmaşık organik bileşiklerin oluşabileceğini gördük. Prebiyolojik bileşiklerin uzaydan gelmiş olabileceğine ve Dünyanın ilk dönemlerinde onun yüzeyine ulaşabileceğine dair kanıtlar göktaşlarının incelenmesiyle desteklenmektedir.

Bu göktaşları arasında en çok incelenenlerden biri, Mars ve Jüpiter arasındaki asteroit kuşağına ait, Güneş Sisteminin en eski maddelerini içeren bir asteroid parçası ve bir tür karbonlu krondrit olan Murchison göktaşıdır (Şekil 11.4).

Karbonlu kondritlerin, Dünyadaki prolin ve valin gibi biyolojik sistemlerde bulunanlar dâhil çeşitli aminoasitleri (Tablo 11.2) ve norvalin ve a-aminoizobutirik asit dâhil olmak üzere 50'den fazla protein olmayan aminoasit içerdiği gösterilmiştir. Yaklaşık 10-60 μg g^{-1} göktaşından yaklaşık 70 farklı aminoasit karakterize edilmiştir. Bunlar, bu cisimlerdeki organik karbonun yaklaşık %30'unu oluşturan çözünür karbon fraksiyonunun bir parçasıdır, geri kalanı ise Bölüm 9'da tartışılan PAH'lar da dâhil olmak üzere oldukça karmaşık refrakter bileşikleri oluşturur. Yine de aminoasitlerin meteoritlerdeki toplam organik karbon varlığına katkısı düşüktür.

Tablo 11.2 Karbonlu krondritlerde tanımlanan bazı karbon bileşikleri örnekleri (Sephton, 2002'den).

Bileşik	Konsantrayon (ppm)
Makromoleküler materyal	% 1,45
Aminoasitler	60
Püriner	1,2
Pirimidinler (urasil ve timin)	0,06
Ketonlar	16
Aldehitler	11
Alkoller	11
Alifatik hidrokarbonlar	12-35
Aromatik hidrokarbonlar	15-28
Sülfonik asit	67
Fosfonik asit	1,5
Karboksilik asit	372,5
Şekerli bileşikler	~60

Bu aminoasitlerin yapısı bize onların oluşum biçimleri hakkında bir şeyler söyler. Biyolojik aminoasitlerin çoğu α-aminoasitlerdir, yani aminoasitteki amin grubu (NH_2) α karbonu üzerindedir (Şekil 11.5). Ancak meteoritlerdeki Dünya dışı aminoasitlerin sadece %65'i α formundadır. Geri kalanlar β, γ ve δ konumlarındadır. Bu gözlemler, aminoasitlerin gezegeni oluşturacak disk yapı-

sında, daha önce tartışılan Strecker sentezi gibi geniş ölçüde seçici olmayan yöntemlerle sentezlendiğini ve meteoritlerde gözlemlenen çok çeşitli bileşiklere yol açtığını göstermektedir. Buradaki zor soru, yaşamın neden bu amino asitlerin yalnızca bir kısmını kullandığı ve eğer gerçekten yaşam kökenlendiğinde bu Dünya dışı amino asitlerin tüm çeşitliliğine sahipse, hangi faktörlerin bu amino asitlerin seçilmesine yol açtığıdır.



Şekil 11.4 Avustralya'nın Murchison kasabasında 1969'da Dünyaya düşen Murchison göktaşı (Kaynak: ABD Enerji Bakanlığı).

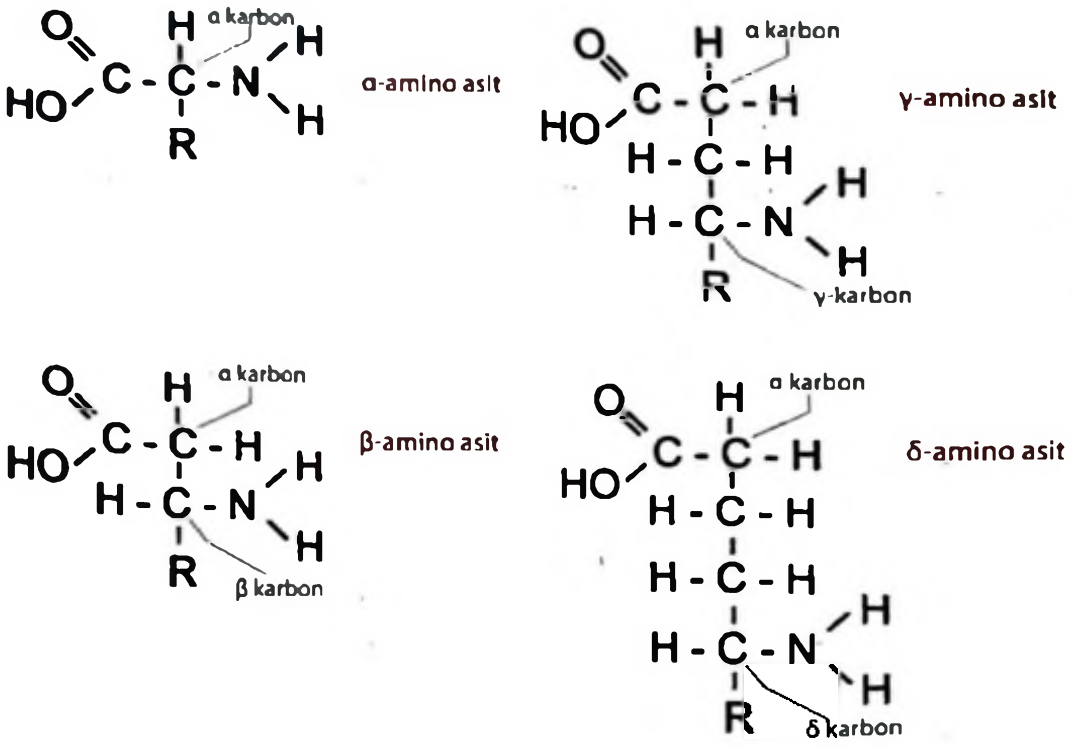
Göktaşlarında peptit bulmak üzere araştırmalar yapıldı. Glisin-glisin peptitlerinin varlığı rapor edilmiştir, ancak tespit edilen diğer aminoasitler arasında başka peptit bağlarının (örneğin glisin ve alanin arasında) olmaması, glisin-glisin peptitlerinin oluşumunun kopolimerizasyondan ziyade dehidrasyon reaksiyonlarıyla gerçekleştiğini düşündürmektedir. Göktaşlarında henüz protein tespit edilmedi. Göktaşları içindeki aminoasitlerin de, karasal yaşamdakine benzer şekilde, L-aminoasitlerin enantiyomerik fazlalığına sahip olduğu öne sürülmüştür. Pizzarello ve Cronin (2000), meteoritlerin karasal ortamdaki organik maddelerle kontaminasyonu sorununu önlemek için, meteorlardaki biyosferde nadir bulunan α-metil aminoasitleri inceledikleri bir makale yayınladılar. Meteoritlerde L-amino asitlerin %1 ile 9 arasında enantiyomerik fazlalığının olduğunu buldular, bu da meteorlardaki amino asitlerin, kimyasal ve biyolojik tepkimelerin arttığı yaşamın erken döneminde kiral zenginleşmeyi sağlayabileceğini düşündürdü.

Meteoritlerde aminoasitlere ek olarak, örneğin guanin ve adenin gibi nükleobazlar tespit edildi ve bu, genetik materyalin moleküllerinin de uzaydan gelmiş olabileceğini düşündürdü.

Göktaşlarında karboksilik asitler, sülfonik ve fosfonik asitler, aminler, amidler, alkoller ve şekerler dâhil olmak üzere dikkate değer sayıda başka bileşik bulunmuştur.

Bugüne kadar toplanan veriler, dış kaynaklı yapı taşlarının yaşamın kökenine yardımcı olabileceğini ve ilk hücrelerin bir araya gelmesi için en eski moleküllerin mevcut olabileceği bir dizi yol olduğunu göstermektedir.

Dünyaya ulaşan materyalin kapsamı önem arz edebilir. Yaklaşık 4 Ga önce, organik materyalin kuyruklu yıldızlardan yılda yaklaşık 10^5-10^6 kg, göktaşları için yaklaşık iki kat daha az, ancak yıldızlararası tozdan yılda 10^8 kg veya daha fazla olabileceği tahmin edilmektedir ancak etkili akış azaldıkça miktar da



Şekil 11.5 α-, β-, γ- ve δ- amino asitlerin yapısı (Kaynak: Charles Cockell).

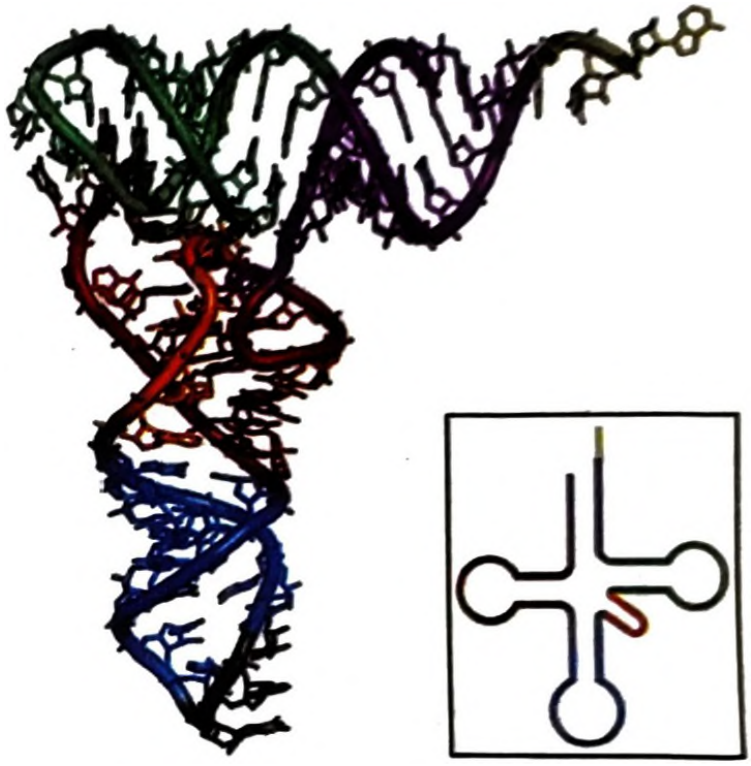
azalır. 3,9 Ga öncesine kadar Dünyaya ulaşan tüm materyalin tahmini miktarı 10^{16} ila 10^{18} kg civarında olabilir (bunu, bugün Dünyadaki yaşamda 6×10^{14} kg mertebesindeki toplam organik karbonla karşılaştırın). Bu materyalin büyük kısmı Gezegenler Arası Toz Parçacıkları (IDP'ler) olarak boyut bakımından yaklaşık 100 μm boyut aralığında zirve yapar. Boyut aralığı santimetre, metre gibi ölçeklere ulaştığında, nesneler artık meteoritik materyal olarak sınıflandırılır.

11.5 RNA Dünyası

Geriye yaşamın kökeniyle ilgili bir soru kalıyor. İlk moleküller kendi kendini kopyalayan bir organizmayı oluşturacak şekilde nasıl bir araya geldi? 1980'lerde fikir olarak önerilen ve daha sonra Sidney Altman ve Thomas Cech'e 1989 Nobel Ödülü verilmesine yol açan bir bulgu, ribonükleik asidin, RNA'nın (Bölüm 3) bir biyolojik katalizör, bir enzim oluşturacak şekilde katlanmasının keşfinden elde edilmişti. Yaptıkları keşif, RNA'nın egemen olduğu prebiyolojik bir dünya olan **RNA Dünyası** fikrine yol açtı.

RNA genellikle tek sarmallı bir molekül olarak bulunur, ancak baz çiftleri tamamlayıcı olduğunda çift sarmallı RNA oluşturabilir, bu da çıkıntıların, ilmeklerin ve saç tokası yapılarının oluşumuna yol açar ve tek boyutlu RNA molekülünün üç boyutlu hale katlanmasına neden olur (Şekil 11.6). tRNA bu tür moleküllere bir örnek teşkil eder (Bölüm 4).

Altman ve Cech'in küçük RNA parçalarının kimyasal reaksiyonları katalize edebildiğini ortaya koydu ve daha sonra bu RNA'ların kendi replikasyonlarını yapabildiği de gösterildi. Bu parçalar beş baz çifti kadar küçük olabilir. Bu ribozimler (Şekil 11.7) RNA'nın biyokimyasal reaksiyonlarda baskın olduğu zamanların bir kalıntısı olabilir ve proteinler olmadan gerçekleşen ilk biyokimyasal reaksiyonları yansıtıyor olabilir.



Şekil 11.6 RNA, burada maya tRNA molekülü için görüldüğü gibi, karmaşık yapılar oluşturacak şekilde katlanabilir. Küçük şekil, 2 boyutlu halini göstermektedir (Kaynak: wikicommons, Yikrazuul).

Ribozimler kimyasal olarak reaktiftir çünkü riboz şekerinde 2' pozisyonunda reaktif bir hidroksil grubuna sahiptirler, bu nedenle, oksijenden yoksun DNA'ların, yani *deoksi*ribonükleik asitin aksine ribonükleik asit adı verilir. RNA molekülünün bu göreli reaktivitesi ve dolayısıyla bir anlamda kararsızlığı, onun DNA'nın öncüsü olarak önerilmesinin nedenlerinden biridir.

Tüm yaşamın kökeni teorilerinde olduğu gibi, bu RNA moleküllerinin kimyasal reaksiyonları yürütmek için nasıl yeterince konsantre hale geldikleri ve sonunda küçük hacimlerde çok sayıda ribozimlere kopyalanarak daha sonra daha karmaşık kimyasal reaksiyonları yürütmeye devam edebilecekleri henüz çözülmemiş bir sorudur. Bunun bir çözümü, RNA'nın kil, montmorillonit gibi mineral veya kil yüzeylere bağlanmasıdır. Yüzeyler, moleküller için bir konsantrasyon mekanizması görevi görebilir ve söz konusu materyale bağlanma kuvvetinin çok yüksek olmaması koşuluyla, replikasyondan sonra yüzeyden sıyrılabilir. Esasen yüzey, kopya RNA moleküllerini kodlayan RNA'yı yerinde tutmak üzere bir iskele görevi görür. Killerin kendileri kimyasal reaksiyonlar için katalizör görevi görebilir ve monomerlerin uzun nükleotid zincirlerine birleştirilmesine yardımcı oldukları gösterilmiştir. RNA'yı konsantre etmenin ikinci yolu, bir sonraki bölümde tartışılacak olan veziküller içine alınmasıdır.

Bekleneceği gibi, hücrelerde bulunan modern nükleik asit onarım mekanizmalarının yardımı olmadan, RNA'da *mutasyon* oranı oldukça yüksek olur, öte yandan bu hatalar farklı RNA dizileri ve konformasyonlarında (şekillerde) çok sayıda yeni dizi üretir ve bu sayede en hızlı çoğalanlar diğerlerini geride bıra-

kır. Böylece diğerlerinden daha hızlı çoğalan her RNA molekülünün yerel RNA havuzuna hükmedeceği ve sonuçta başka mutasyonların meydana geleceği bir kalıp oluşturacağı bir tür kimyasal Darwinci evrim başlamış olabilir.

Modern dünyada RNA ve DNA'nın varlığı, RNA ve DNA'dan önce gelmiş olabilecek ve çoktan ortadan kaybolmuş olabilecek diğer nükleik asit türlerinin olasılığını göz ardı etmemize engel olmamalıdır. Baş döndürücü çeşitlilikte bir dizi nükleik asit sentezlenmişti. Bazıları RNA'ya bazı avantajlar sağlamış ve bu nedenle RNA'nın öncüleri olmuş olabilir. Bunlardan biri, bazların bir poliamidik omurgaya bağlandığı PNA'dır (peptid nükleik asit). Çift sarmal oluşturduğu ve RNA sentezi için bir şablon görevi görebileceği gösterilmiştir. Kiral değildir ve bildiğimiz şekliyle yaşam mimarisinin gerektireceği kiral seçicilik ihtiyacını ortadan kaldırır. TNA (treoz nükleik asidi), dört üyeli basit bir halkaya sahip bir şeker olan treoz içerir. TNA, DNA ve RNA'ya bağlanabilir ve bu da onun modern genetik materyalle uyumluluğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, şeker kararsız yapıdadır. Diğer öneriler arasında, sarmallar oluşturabilen ve/veya RNA, DNA veya nükleotidlerin kısa zincirlerine bağlanabilen HNA (heksitol nükleik asit) ve ANA (altritol nükleik asit) yer almaktadır. Bu alternatif yapıların biyokimyası hala tam olarak anlaşılamamıştır, ancak Dünyanın erken dönemlerinde bulunmasalar bile, o dönemdeki biyokimyasal sistemlerin nasıl evrimleşmiş olabileceğini araştırmak üzere model sağlarlar.



***Şekil** 11.7 Bir ribozim. Proteinlere benzer bir şekilde, RNA molekülleri içindeki belirli bölgelerdeki geri dönebilir kesme ve birleştirme reaksiyonlarını katalize edebilen çekiç başlı ribozim* (Kaynak: wikicommons, William G. Scott).

Nükleobazların birçoğunun biyokimyada birden fazla yerde bulunduğu biyokimyacılar tarafından gözden kaçırılmamıştır. Örneğin, ATP hem enerjiyi taşımak için bir molekül olarak hem de DNA montajı için bir yapı taşı olarak kullanılır (Bölüm 4). Adenin, moleküllerin biyosentezinde çeşitli koenzimlerde ve öncülerde ortaya çıkar. Hatta guanin bile enerji açısından zengin molekül olan guanozin trifosfatta (GTP) bulunur ve bu molekül bazı enerji transfer reaksiyonlarında ATP gibi rol oynar. Biyokimyasal reaksiyonlar sürerken nükleobazların ve nükleotitlerin yaygın biçimde bulunması, enerji üretimi ve bilgi depola-

manın aynı molekül grubundan ortaya çıktığı kimyasal evrimin erken bir aşamasını yansıtıyor gibi görünüyor.

Astrobiyolojide çözülmemiş bir soru şudur: hangisi önce ortaya çıktı, metabolizma mı yoksa genler mi? Protein sentezi RNA gerektirdiğinden, RNA'nın önce ortaya çıktığı, proteinlerin RNA iskelesine daha sonra eklendiği ve daha karmaşık replikasyon yapılarıyla sonuçlandığı düşünülebilir. RNA'nın hem enzim katalizli reaksiyonları gerçekleştirme hem de bilgi depolama yeteneği, onu kendi kendini kopyalamanın geçerli olduğu biyokimya dünyası için erken bir sistem adayı olarak uygun bir molekül haline getirir. Buna karşılık, proteinlerin katalitik aktiviteye sahip olmasına rağmen, kendilerini nasıl kopyalayabileceklerini ve evrimsel baskılara ve gelişmelere maruz kalabilecek gelecek nesil proteinlere nasıl bilgi aktaracaklarını görmek zordur.

Tartışma Noktası:

Önce hangisi ortaya çıktı? Yaşamın kökeniyle ilgili kafa karıştırıcı bir soru, moleküler mimari anlamında ilk ortaya çıkanın hangisi olduğudur? Proteinler, önemli işlevleri yerine getiren üç boyutlu yapılardır. Yine de bir noktada, onları yapacak bilgi, bugün gözlemlediğimiz transkripsiyon ve translasyon sistemine ulaşacak şekilde, tek boyutlu lineer bir nükleik asit zincirinde kodlandı. Bu nasıl oldu? Önce proteinler mi evrimleşti? Eğer öyleyse, bu üç boyutlu bilgi tek boyutlu bir moleküle nasıl kodlandı ve bu evrime hangi ara süreçler izin verdi? Proteinler nasıl kopyalanabildi? Diğer yöndeki evrim de başka sorunları beraberinde getirmektedir. Önce DNA var olduysa baz çiftleri proteinler için gerekli olan üç boyutlu bilgiyi kodlamayacak şekilde nasıl evrimleşti? Bazıları kararlı bir şekilde çoğalana ve nihayetinde yaygınlaşana kadar rastgele çok sayıda protein yapıları mı ürettiler? Proteinler ve nükleik asitler ve aralarındaki ilişkiler hakkında bildiklerimizi tartışın. Gerekirse Bölüm 3 ve 4'ü gözden geçirin. Şu soruyu düşünün: hangisi önce ortaya çıktı, nükleik asit mi yoksa protein mi, yoksa birlikte mi ortaya çıktılar ve eğer öyleyse, nasıl?

Joyce, G.F. (2002) The antiquity of RNA-based evolution. *Nature* **418**, 214–221.

11.6 Erken Hücreler

Bir noktada biyokimyasal reaksiyonlar hücre zarlarının içinde gerçekleşmiş olmalıdır. Bölüm 4'te gördüğümüz gibi zarlar, molekülleri küçük bir alanda yoğunlaştırma ve böylece kimyasal reaksiyonların sayısını artırma işlevini yerine getirir. Zarlar olmadan, moleküller su içinde seyrelme eğiliminde olacaktır. Bölüm 4'te de tartıştığımız gibi, zarlar bir ucunda hidrofobik ve diğer ucunda hidrofilik özellikte olan (yağ asitleri veya lipidler) amfifilik moleküllerden oluşur. Bu özellikleri sergileyen yağ asitleri, suyla karıştığında, hidrofilik başları dışa dönük ve hidrofobik kuyrukları içe dönük küreler olan lipid çift katmanları veya daha basit miseller oluşturacak şekilde kendiliğinden düzenlenme eğili-

mindedir. Amfifillerin zar oluşturma özelliği, günümüzde organizma zarlarının yapısını açıklamaktadır.

Oldukça ilkel malzemeler kullanılarak bile veziküllerin oluşumunu göstermek nispeten basit bir iştir. Murchison göktaşından ekstrakte edilen nonanoik ve dekanoik asit gibi karboksilik asitler suya eklendiğinde kendiliğinden zar yapıları oluşturduğu gösterilmiştir. Göktaşlarından gelen uzun zincirli karboksilik asitlerin zarlar oluşturabilmesi olgusu, günümüzdeki zarların yapısının, en eski zarların yerel olarak mevcut bileşikleri kullanarak ilk dönemki biyokimyada geçerli olan mekanizmayı geniş ölçüde yansıttığını düşündürebilir.

Yapay kesecikler içinde şekerleri ve proteinleri kullanan basit yapılı metabolizmalar, zarların, ister RNA ister protein bazlı olsun, erken dönemdeki kimyasal reaksiyonların çevresini nasıl sarabileceğini göstermek için de kullanılmıştır.

Şekil 11.8, glikoz-1-fosfat gibi basit bir molekülün bir zardan nasıl asimile edilebileceğini ve bir glikojen fosforilaz tarafından enzimatik dönüşüm yoluyla uzun zincirli molekül olan nişastaya nasıl dönüştürülebileceğini gösteren bir şemayı sunmaktadır. Büyük moleküller vezikül içinde tutulur ve daha yoğun hale gelirler. Bu moleküllerin bir amilaz tarafından iki birim şekere, maltoza parçalanması, hücreden serbest bırakılan bir ürünle sonuçlanır. Bu basit deney, bir kaynakların hücreye nasıl girdiğini, atık ürünlerin nasıl çıktığını ve bir hücre içinde karmaşık moleküllerin nasıl biriktiğinin genel ilkelerini gösterir.

Şekil 11.8'de gösterilene benzer sistemlerde, veziküller içinde bir RNA polimerazın kapsüllendiği deneyler yapılmıştır. ADP'nin veziküllere dışarıdan sağlanması, veziküllerin içine girmesi ve veziküllerin içindeki RNA polimerlerinin üretimini yönlendirmesi için yeterliydi. Polimeraz Zincir Reaksiyonu, yapay kesecikler içinde de başarıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm bu deneyler, kapsüllenmenin ilkelerini ortaya koymaktadır - lipitlerden yapılan oldukça basit veziküller, dış ortama bir bariyer sağlamanın yanı sıra yerel ölçekteki kimyasal reaksiyonların oluşmasına olanak sağlamak üzere reaktifleri yeterince yoğunlaştırma yöntemi olarak işlev görebilir.

Bu deneyler aynı zamanda basit hücresel yapıların büyümeye olanak sağlayabileceği ilkesini de ortaya koymaktadır ve özellikle nükleik asit deneyleri ilk hücrelerde bilginin ilkel biçimdeki replikasyonunun olma olasılığını gösterir.

Odak: Astrobiyologlar: Dave Deamer

Hangi konuda çalışıyorsun? Hücresel yaşamın kökeniyle ilişkili olan kendi kendine toplanma süreçleri.

Nerede çalışıyorsun? Kaliforniya Üniversitesi, Santa Cruz.

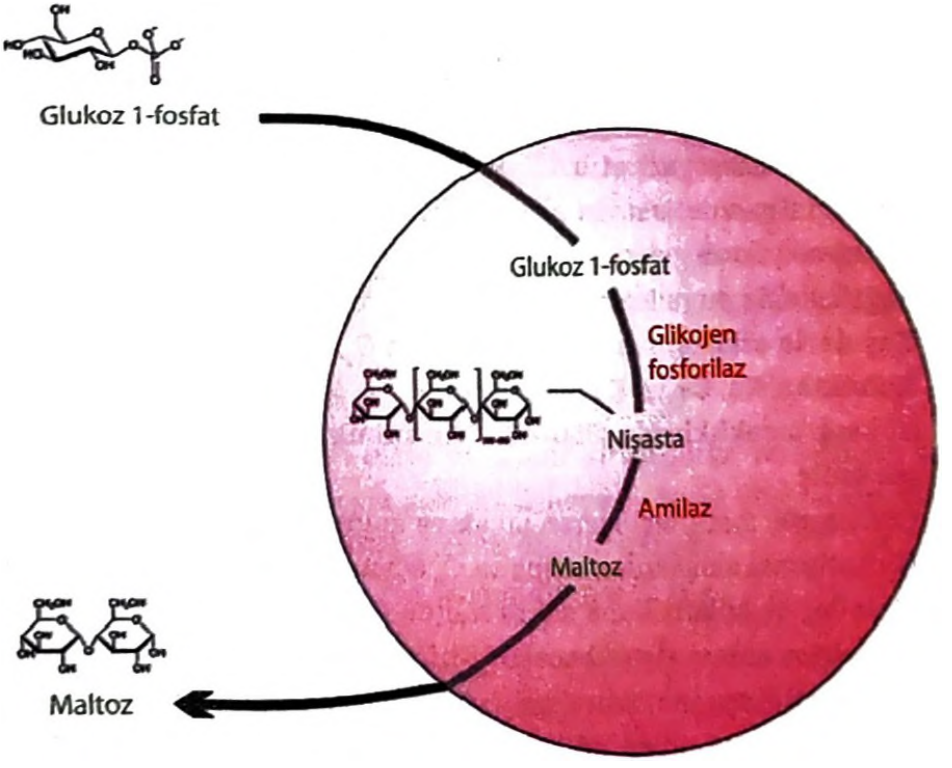
Asıl çalışma konunuz neydi? Kimya.

Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz? Hücresel yaşamın kökeni ile moleküler düzeyde kendi kendine toplanma süreçleri nasıl ilişkilidir?



Astrobiyoloji alanında sizi heyecanlandıran nedir? Yıllar önce Murchison göktaşında amfifil adı verilen sabun benzeri moleküllerin bulunduğunu ve suda hücre boyutunda kesecikler oluşturduğunu keşfettim. Bu tür amfifilik bileşikler, prebiyotik dünyada mevcut olsaydı, ilkel hücreler için gerekli olan zarlarda bir araya gelebilirlerdi. Şimdi, amfifillerin yalnızca zarlarda bir araya gelmekle kalmayıp, kendi kendine oluşan yapıların da RNA gibi polimerlerin enzimatik olmayan sentezini destekleyebildiğini de bulduk. Polimerler sentezlendikten sonra, ön-hücreler oluşturmak üzere veziküller içinde kapsüllenir. Bunlar canlı değiller, daha çok ilk yaşam biçimlerine doğru evrimin erken bir aşamasını temsil ediyorlar.

Lipitler, modern hücrelerde kendini gösteren ilgi çekici özelliklere sahiptir. Veziküller oluştuktan sonra, hidrofobik maddeleri kendi içlerinde yoğunlaştırma eğilimi gösterirler, bu da bir yoğunlaştırma mekanizması sağlar ve yararlı fonksiyonel özelliklere sahip diğer moleküllerin yapıya dâhil edilebileceği araçlar sunar. Lipid keseciklerinin dışının şeker moleküllerini bağlayabildiği ve hücre duvarına benzer bir karbonhidrat "kaplamasına" yol açabildiği gösterilmiştir. Bu erken hücreler, basit biyokimyasal reaksiyonları yüzünden ve ribozomlar gibi hacimli moleküllerin bulunmaması nedeniyle modern prokar-



Şekil 11.8 *Kapalı zarlarda basit metabolizmalar ortaya çıkabilir. Burada kapalı bir ilk-hücre içinde meydana gelen uzun zincirli karbonhidrat (nişasta) üretimi gösterilmiştir* (Kaynak: Charles Cockell).

yotik hücrelerden çok daha küçük olabilirdi, belki de tipik modern prokaryotlardan neredeyse on kat daha küçük (~0,1 μm çapında) olabilirdi.

Çeşitli yapılar ve ilk moleküller bir kez kapsüllendiğinde, Darwinci evrim izole moleküller yerine tüm hücre üzerinde çalışacak ve tüm hücrenin iyileştirilmesi için seçilim baskılarıyla sonuçlanacaktı. Bu noktada yaşam, hücresel süreçler tarafından belirlenen ve kendi kendini kopyalayan bir varlığa gerçekten geçiş yapmıştı.

11.7 Nerede Ortaya Çıktı?

Yaşamın Dünyada ortaya çıktığını varsayarsak, o zaman temel bir soru şudur: Bu nerede gerçekleşmiş olabilir? Yaşamın kökeni için olası yerler hakkında çeşitli hipotezler vardır.

Herhangi bir ortamın yaşamın başlangıcı için gerekli kimyasal reaksiyonlara elverişli olması için üç özelliğe sahip olması gerekir:

1. Kimyasal sentezleri yürütecek bir enerji kaynağı.
2. Molekülleri yoğunlaştırmanın bir yolu.
3. Karmaşık moleküllere ve bunların bir araya gelmesine elverişli fiziksel bir ortam.

Bu özelliklere sahip birçok yerin yaşam için uygun yerler olduğu varsayılmıştır.

11.7.1 Derin Deniz Hidrotermal Bacaları

Okyanus ortasındaki çıkıntıların yakınında, soğuk su, kabuktan geçerek bu çıkıntıların etrafındaki jeotermal olarak ısıtılan bölgelere girer ve yüksek sıcaklıklarda okyanuslara geri atılır. Kabuktaki bu hidrotermal sirkülasyon süreci sırasında, günümüzde sırayla aşağıdakileri içeren birçok kimyasal değişiklik ve etkileşim meydana gelir:

1. Soğuk deniz suyu kabuktan aşağı doğru iner.
2. Kayalarla etkileşim sırasında sıvıdan O_2, K, Ca, SO_4 ve Mg uzaklaştırılır.
3. Kabuktan Na, Ca ve K sıvıya girer.
4. Yüksek sıcaklıklarda (350–400 °C), kabuktan Cu, Zn, Fe ve H_2S sıvılarda çözünür.
5. Çözünmüş metalleri içeren sıcak ve asidik sıvılar kabuktan yükselir.
6. Hidrotermal akışkanlar, soğuk ve O_2 açısından zengin deniz suyuyla karışır. Metaller ve kükürt daha sonra metal-sülfür mineralleri oluşturmak üzere birleşir ve onlara siyah bacalar gibi karakteristik bir adı verir (Şekil 11.9).

Bacalar bu dolaşımdaki sıvılardan kaynaklanan jeokimyasal dengesizliklere ev sahipliği yaptığından, günümüzde çoğu kemoototrofik metabolizmalara sahip çok sayıda mikroorganizmaya ev sahipliği yapmaktadır. Bir hipoteze göre Dünyanın erken döneminde, bu jeokimyasal olarak aktif bölgeler yaşamın başlangıcını kolaylaştırmıştır.

Hidrotermal bacalar, "demir-kükürt" dünyası olarak bilinen hipotezin odak noktası olmuştur. Bu hipotez, baca içindeki demir-kükürt minerallerini kullanarak basit inorganik gazlardan ve CO, CO_2, HCN ve H_2S gibi bileşiklerden organik moleküllerin oluşumunun metallerle katalizlendiğini varsayar. Örneğin, yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 150-300 °C arasında) karbon monoksit ve hidrojen, alkanlar ve petrol türevi bileşikler gibi organik moleküller üretmek üzere demir ve nikel katalizörleri kullanılarak **Fischer-Tropsch** sentezlerinde reaksiyona sokulabilir (gerçekten de bu yolaklar sentetik yağlayıcıların ve yağların endüstriyel üretiminde kullanılır). Bununla birlikte, bu bacalarda prebiyotik sentez kavramı, alkanların üretiminin ötesine geçer.



Şekil 11.9 Yeni Zelanda kıyılarının 400 km açığındaki Kermadec Arc Brothers yanardağında bir siyah hidrotermal baca (Kaynak: NOAA).

Günter Wächterhäuser tarafından öne sürülen orijinal öneri, ilkel zarların FeS'den (makkinavit) oluştuğunu ileri sürer. Böylece elektronların ferrodoksin benzeri yapılar gibi ilkel demir-kükürt kümeleri aracılığıyla zar boyunca hareketi ile bir proton hareket kuvvetinin kurulabileceği yarı geçirgen bir bariyer oluşmuştur.

Yaşamın kökenine ilişkin olarak ileri sürülen reaksiyon şemaları şu anda oldukça spekülatiftir ve bazıları laboratuvarda gösterilen reaksiyon yollarına dayanmasına rağmen, hidrotermal bacalarda doğrudan gösterilmemiştir.

Örneğin aşağıdaki reaksiyonun hidrotermal bacada gerçekleştiği teori olarak ileri sürülmüştür:

$$CO + H_2S + 2H_2 \rightarrow CH_3SH + H_2O \qquad (11.4)$$

Üretilen metil tiyol (CH_3SH), nikel ve demir sülfürlerin varlığında karbon monoksit ile ~100 °C'de (hem teorik hem de deneysel olarak gösterilmiştir) asetik asidin metil tioesterine katalitik olarak dönüştürülür:

$$CH_3SH + CO \rightarrow CH_3COSCH_3 + H_2S \qquad (11.5)$$

Bu şekilde H2O'yla üretilen CH_3COSCH_3 reaksiyonu, erken kemootrofik organizmalarda karbon fiksasyonunun ilk aşamalarını temsil etmesi önerilen basit bir reaksiyonda asetik asiti verir:

$$CH_3COSCH_3 + H_2O \rightarrow CH_3COOH(\text{asetik asit}) + CH_3SH \qquad (11.6)$$

CO'nun yüksek (>200 °C) sıcaklıklarda ve yüksek basınçlarda (~2000 bar) indirgenmesinin de piruvat oluşuma yol açtığı gösterilmiştir; bunun Bölüm

5'te tartışılan biyokimyasal yolak türlerinin öncülerine (indirgeyici sitrik asit döngüsü gibi) substrat sağlayacağı önerilmiştir.

Demir-kükürt partiküllerinin yüzeylerinin, HCN ve onunla ilgili moleküllerin (örneğin C_2H_2 ve CH_3C_2H) siklizasyon reaksiyonları için, genetik materyal için gerekli olan nükleobazlara akraba ve öncüller vermesi için bir ortam sağladığı da öne sürülmüştür.

Yaşamın hidrotermal kökeni fikrini çekici kılan bazı dolaylı kanıtlar var. Ferrodoksin de dâhil olmak üzere demir-kükürt proteinleri eskidir. Elektron transferiyle ilgili olanlar da dâhil olmak üzere çeşitli enzimlerde bulunurlar (Bölüm 5). Bunlar arasında NADH dehidrojenaz, hidrojenazlar, çeşitli sitokromlar, redüktazlar, nitrojenaz ve fotosentez aygıtı bulunur. Bu demir-kükürt kümelerinin, mineral yüzeyler ile erken biyokimya arasındaki bu eski etkileşimlerin bir kalıntısı olduğu ileri sürülmektedir.

Hidrotermal bacalar için önerilen süreçler, metabolizmanın mı yoksa nükleik asitlerin mi önce geldiği konusundaki tartışmanın önünün açmıştır. Bacalardaki ilke döneme ait metabolik reaksiyon olma potansiyeli, temel metabolizmaların önce kurulduğu ve daha sonra genetik materyalde kodlandığı fikrine destek vermiştir.

11.7.2 Karada Bulunan Volkanik Havuzlar

Karasal ortamlar, derin deniz hidrotermal sistemlerinin birçok özelliğini paylaşır. Sıcaklık jeotermal gradyanlardan gelmiş, karmaşık inorganik kimya ve mineral yüzey reaksiyonları da (Şekil 11.10) okyanus hidrotermal sistemlerine benzer şekilde meydana gelmiş olabilir. Buradaki açık bir fark, küçük volkanik havuzların, baca yapısı içinde tutulmayan moleküllerin okyanus suyuna seyreltileceği hidrotermal bacalardan daha küçük bir alanda lokalize kimyasallara sahip olabilmesidir. Kara tabanlı volkanik havuzlar, başka bir jeotermal gradyan biçimi sunar.

11.7.3 Çarpmayla Ortaya Çıkan Kraterler

Bir asteroit veya kuyruklu yıldızın çarpması sırasında, yerel çevreye, dolaşan hidrotermal sistemler oluşturabilen muazzam bir termal akış deşarjı olur. Bu hidrotermal sistemler bir şekilde volkanik hidrotermal sistemlere benzer. Ancak çarpmayla oluşan kraterlerinin bazı özellikleri volkanik hidrotermal sistemlerden farklıdır ve onları yaşamın kökeni kimyasına uygun hale getirebilir.

Çarpma tüm kaya türlerinde meydana gelebilir (Şekil 11.11). Ayrım gözetmezler ve bu nedenle, volkanik yarıklar gibi okyanus kabuğunda bulunan özel kimyasal süreçlerdeki volkanik hidrotermal sistemlerin aksine, çarpma sonucu oluşan darbeler mevcut her kaya türünde hidrotermal sistemler oluşturabilir. Böylece, farklı hidrotermal sistemler, farklı killer, ikincil mineraller ve gözenekler üreterek yaşamın kökeninde çok çeşitli olasılıklar ortaya çıkarır. Çarpan

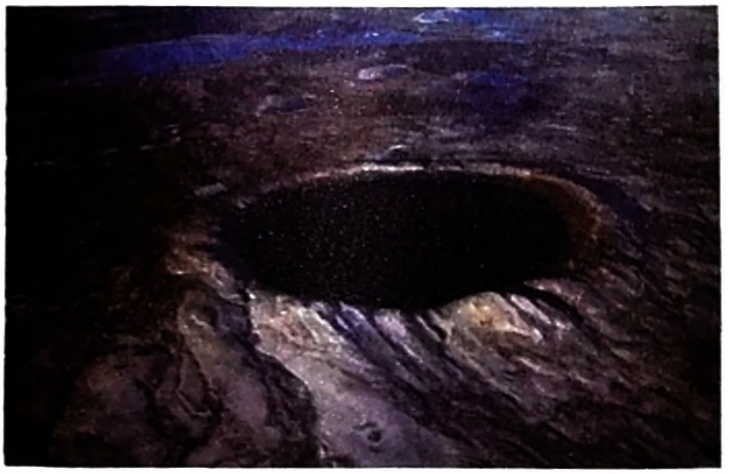


(a) (b)

Şekil 11.10 (a) Rusya'nın Kamçatka kentindeki bu havuzlar gibi 1 m'den biraz daha uzun olan kara kökenli jeotermal (volkanik) havuzların, organik sentez yerleri olabileceği tartışılmıştır. (b) Burada, Santa Cruz'daki California Üniversitesinden Dave Deamer, prebiyotik kimya potansiyellerini incelemek üzere örnekler alıyor (Kaynak: Dave Deamer, California Santa Cruz Üniversitesi).

etkenin boyutuna bağlı olarak farklı hızlarda soğurlar, bu nedenle farklı boyutlarda ve farklı soğutma hızlarında bir dizi hidrotermal sistem üretirler ve yine kimyasal reaksiyon hızlarında çeşitlilik ve karmaşık bileşikler oluştururlar. Darbeyle oluşan hidrotermal sistemlerin, krater soğumasıyla belirlenen bir ömrü vardır. Yaklaşık 5 km çapındaki bir krater, bir hidrotermal sistemi birkaç bin yıl sürdürebilirken 200 km çapında bir krater, yüzbinlerce yıl devam eden bir hidrotermal sisteme ev sahipliği yapabilir. Basit prebiyotik bileşiklerin oluşturulabileceği çok sıcak erken bir aşamadan, darbe yapısının farklı bölgelerinde daha düşük sıcaklıkların daha karmaşık moleküllere yol açabileceği sonraki aşamalara geçildiğini düşünebiliriz.

Bu fikir, derin deniz hidrotermal bacaları için önerilen kimyasal reaksiyonlar için gereken en uygun sıcaklıklara ilişkin verilerle desteklenmektedir. Örneğin, hidrotermal bacalarda tercihen ~220'de oluşan ketonlar ve alkenler,



Şekil 11.11 Kanada, Kuzey Quebec'te, bir göl içeren günümüz Pingualuit krateri. 3,4 km çapındaki krater 1,4 milyon yaşındadır. Günümüzün hiçbir krateri aktif, sıcak bir hidrotermal sistem içermez. (Kaynak: NASA).

~150'de alkoller ve ~60 °C'de organik asitler ile farklı sıcaklıklarda farklı bileşiklerin oluştuğu tahmin edilmektedir. Darbeyle oluşan hidrotermal sistem soğutulduğunda ve daha yüksek sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıklara ardışık şekilde geçtiğinde farklı bileşikler oluşturulabilir.

Bugün Dünyada aktif hidrotermal sistemlere sahip kraterler yoktur, ancak su kütlelerini içeren kraterler vardır ve bu kraterler, bize bu tür ortamların nasıl görünmüş olabileceğine dair bir bakış sağlar (Şekil 11.11).

11.7.4 Sahiller

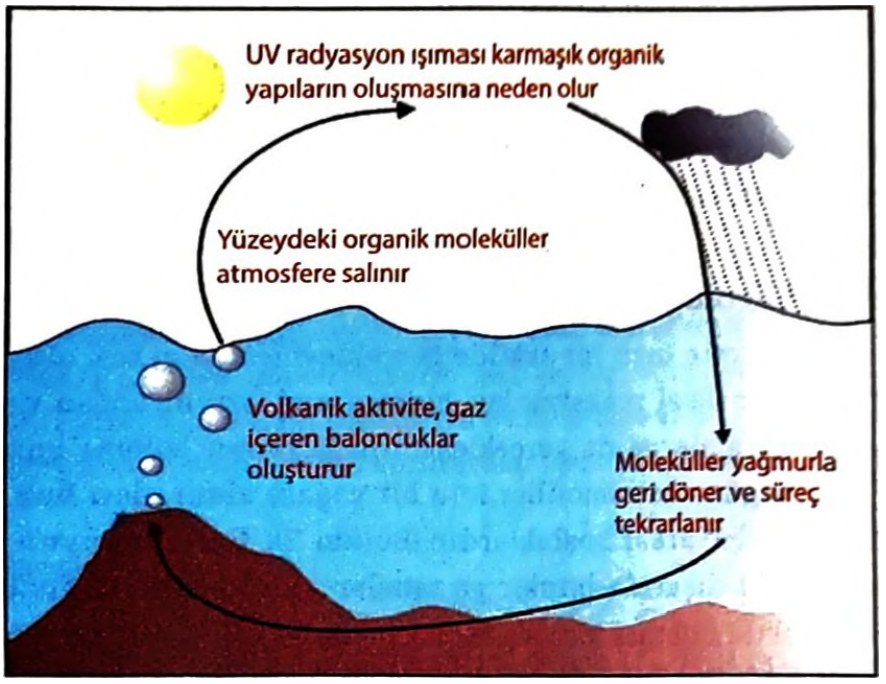
Sahiller, kayalar üzerinde art arda gelgit hareketiyle organik bileşiklerin konsantre edilmesine yönelik bir mekanizma oluşturur. Bu sistemdeki enerji, deniz suyu bileşiklerinden veya yüzeye çarpan UV radyasyonundan gelebilir.

Kıyı çevresinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, peptit ve protein oluşumuna yönelik özel şemalarda ele alınmıştır. Bir teori, Dünyanın erken dönemindeki (belki daha önce açıklanan Strecker sentezi yoluyla üretilen veya meteoritik malzeme tarafından sağlanan) serbest amino asitlerin siyanat (OCN-) iyonlarıyla reaksiyona girerek N-karbamoil amino asitleri oluşturacağını varsaymaktadır. Bunlar, kıyılardaki kayaların içinde veya yüzeyinde kurumuş olabilirler. Bu kuru fazda yıldırımlar tarafından üretilen nitrojen oksitlerle reaksiyona girerler. Bu, ya aminoasitlere parçalanan ya da gelgit yükseldiğinde ve NCA'yı nötr deniz suyuna batırdığında, polipeptidler oluşturmasına neden olan N-karboksi anhidritlerin (NCA) oluşumuyla sonuçlanır. Bu işlemin tekrarlanması proteinlerin oluşumuna neden olabilir.

11.7.5 Kabarcıklar

Karmaşık moleküllerin kökenine ilişkin ilgi çekici bir hipotez, okyanuslarda kabarcık oluşumuyla ilişkilidir. Bu senaryoda, basit organik bileşikler, okyanus yüzeyinden atmosfere salınan volkanlardan gelen kabarcıklarda tutulur (Şekil 11.12). Atmosferde, Güneş ışığındaki UV radyasyonuyla reaksiyona girerek karmaşık organik bileşikler oluştururlar ve daha sonra okyanuslara geri dönerler ve bu döngü tekrarlanır.

Birkaç döngü boyunca, bu ışınlama ve kabarcıklar içinde tutulma, hem karmaşık bileşiklerin oluşumu için enerji hem de daha karmaşık materyaller için bir konsantrasyon mekanizması (kabarcıklar) ve nihayetinde hücre öncüllerinin oluşmasını sağlar. Önerilen döngü, daha sonra göreceğimiz gibi, metanın Titan atmosferinde yüksek karmaşık hidrokarbonlara dönüştürülme şekline biraz benzerlik gösteriyor (Bölüm 18). Titan, bu süreçlerin bazılarını (yaşamın kendisi olmasa bile) incelemek için büyük ölçekli bir organik kimya laboratuvarı sunar.



Şekil 11.12 prebiyotik *sentez için araç olarak baloncuklar.* (Kaynak: Charles Cockell).

11.7.6 Yeraltının Derinlikleri

Yeraltı yaşamı, günümüzde biyosferin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bazı araştırmacılar bu ortamın yaşamın başlangıcı için uygun olabileceğini öne sürmüşlerdir. Burada enerji jeotermal ısıyla sağlanacaktı. Moleküllerin konsantrasyonu, yeraltındaki kayaların gözenek boşlukları ve çatlaklarında mümkün olacak ve sonunda çeşitli kimyasal reaksiyonların yeraltının çeşitli çevrelerinde, ısı akışlarında ve kimyasal çözelti bileşimlerinde "test edilmesine" olanak sağlamış olacaktı. Sonunda yaşam, yeraltının derinliklerinde geliştikten sonra yüzey ortamlarına taşınacaktı.

11.7.7 Mineral Yüzeyler

Bu tartışmalar boyunca mineral yüzeylerden hep söz edilmiştir. Mineraller oldukça çekici bir özelliğe sahiptir; reaksiyonları kataliz edebilirler ve konsantre olabilirler. Bazı killerin (montmorillonit gibi) nükleotitlerin RNA polimerlerine polimerizasyonunu kataliz ettiği gösterilmiştir ve bu nedenle RNA dünyasında potansiyel katalizörler olarak iş görmüş olabilecekleri ileri sürülmüştür. Pirit gibi mineraller, fosfat gibi katyonları güçlü bir şekilde bağlama eğilimindedir ve bu nedenle reaksiyona giren bileşikleri konsantre etme işlevi görebilir. Apatit mineral içeren birincil fosfatın çözünürlüğünün azlığı nedeniyle, Dünyanın ilk dönemlerinde fosfat konsantrasyonunun düşük olduğu varsayılır.

Minerallerin yüzeylerinde fosfat biriktirerek yerel ölçekte prebiyotik reaksiyonlara yönelik yüksek konsantrasyonlara ulaşabilme ihtimali yaşamın

kökeni ve evriminde önemli rol oynadıkları önerisini beraberinde getirmiştir. Yapılan çalışmalarda minerallerin, mineral içermeyen kontrol gruplarına göre daha yüksek verimde prebiyotik bileşik veren reaksiyonları kataliz ettiği gösterilmiştir. Örneğin borat mineralleri, prekürsör formoz tipi reaktanlardan bir şeker olan riboz oluşmasını arttırır.

11.8 Yaşamın Soğuktaki Kökeni?

Yaşamın başlangıcının hızlı bir şekilde gerçekleşmesine gerek olmadığı dikkate alınabilir. Kimyasal reaksiyonlar, hidrotermal ortamlardan daha yavaş olsa da, soğuk ortamlarda da gerçekleşebilir. Yaşamın kökeni için önerilen yerlerden biri, bugün ekstremofiller için bir yaşam alanı olan buz kristalleri arasındaki taneler arası boşluklardır (Bölüm 7). Burada suyun donması, çözünen maddeleri dışarıda bırakır ve taneler arası boşlukta tuzlu su üretir. NaCl'nin ötektik noktası kütlece %23,3 tuzda –21,2 °C'dir, bu nedenle buz tabakalarında 0 °C'nin altında sıvı su bulunabilir. Su donduğunda ve tuzları dışarıda bıraktığında, organik moleküllerin yoğunlaşır. Kompleksleşmenin gerçekleşmesi için gereken enerji, jeotermal enerjiden (düşük akışta olsa da) gelebilir. Hipotezdeki sorunlu kısım, yüksek tuz konsantrasyonlarının genellikle karmaşık moleküller için zararlı olmasıdır. Bununla birlikte, prebiyotik kimyanın nispeten tatlı suda, ancak donma noktasının üzerindeki sıcaklıklarda (ancak yine de soğuk ortamlarda) meydana geldiği başka senaryolar da önerilmiştir.

Buradaki açık problem, kimyasal reaksiyonların, sıcaklık düştükçe kimyasal reaksiyon oranlarının azaldığı (10 °C'lik her bir düşüş için yaklaşık iki kat) bir Arrhenius ilişkisini izlemesidir. Bununla birlikte Dünya yaklaşık 4,4 Ga önce yaşamın başlangıcına olanak sağlıyorsa ve yaşam da bundan birkaç yüz milyon yıl sonrasına kadar ortaya çıkmadıysa, belki de yaşamın soğukta başlayabilmesi için bolca zaman vardı.

11.9 Bir Reaktör Olarak Tüm Dünya?

Bilim insanlarının, yaşamın başlayabileceği makul yerler olarak belirli reaksiyonları ve ortamları tercih etme eğilimi vardır. Bununla birlikte, tüm Dünyanın, organik kimyanın pek çok farklı yerde işlediği dev bir prebiyotik reaktör olduğu düşünülebilir. Yukarıda sıralanan hipotezlerin çoğu birbirini dışlamak zorunda değildir. Organik kimya tüm bu ortamlarda meydana gelmiş olabilir. Bununla birlikte, ortak biyokimyasal mimarisiyle yaşam çeşitliliğine yol açan ilk kendi kendini kopyalayan organizmaların ortaya çıktığı muhtemelen belirli bir ortamın olduğu hala geçerliliğini koruyor. Son Evrensel Ortak Ata (LUCA) bir yerde ortaya çıkmış olmalı.

11.10 Sonuç

Yaşamın kökeni için gerekli olan hammaddeleri sağlayacak olası yollar bakımından yetersizlik söz konusu değildir. Aminoasitler de dâhil olmak üzere prebiyotik karbon bileşiklerinin, Dünyanın erken dönemindeki çeşitli uygun çevresel koşullarda ortaya çıkabildiği ve meteoritler gibi dış kaynaklı materyallerde de var oldukları gösterilmiştir. Prebiyotik sentez ve ilk organik bileşiklerin toplanması için uygun yerler olarak bir dizi ortam önerilmiştir. Bunlar hidrotermal sistemleri, çarpma etkisiyle oluşan kraterleri ve gelgit bölgelerini içerir. Günümüzde hem reaksiyonların hem de bunların gerçekleşeceği ortamların çeşitliliğine rağmen, ilk hücrelerin nasıl ve nerede ortaya çıktığını belirlemek astrobiyolojideki en önemli sorulardan biri olmaya devam ediyor.

İleri Okuma

Kitaplar

Cairns-Smith, A.G. (1990) *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story*. Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge.

Deamer, D. (2012) *First Life: Discovering the Connections Between Stars, Cells and How Life Began*. California Üniversitesi Yayınları, Oakland.

Hazen, R. (2005) *Genesis: The Scientific Quest for Life's Origins*. National Academies Press, Washington, D.C.

Oparin, A.I. (1938) *The Origin of Life*. Macmillan, New York.

Makaleler

Bada, J.L. (2013) New insights into prebiotic chemistry from Stanley Miller's spark discharge experiments. *Chemical Society Reviews* 42, 2186–2196.

Chakrabarti, A.C., Breaker, R.R., Joyce, G.F., Deamer, D.W. (1994) Production of RNA by a polymerase protein encapsulated within phospholipid vesicles. *Journal of Molecular Evolution* 39, 555–559.

Chyba, C., Sagan, C. (1992) Endogenous production, exogenous delivery and impact-shock synthesis of organic molecules: an inventory for the origin of life. *Nature* 355, 125–132.

Deamer, D.W. (1997) The first living things: a bioenergetics perspective. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 61, 239–261.

Gilbert, W. (1986) The RNA World. *Nature* 319, 618.

Huber, C.,Wächterhäuser, G. (1997) Activated acetic acid by carbon fixation on (Fe,Ni)S under primordial conditions. *Science* 276, 245–247.

Joyce, G.F. (2002) The antiquity of RNA-based evolution. *Nature* 418, 214.

Sczepanski, J.T., Joyce, G.F. (2014) A cross-chiral RNA polymerase ribozyme. *Nature* doi:10.1038/ nature13900.

Lane, N., Allen, J.F., Martin, W. (2010) How did LUCA make a living? *BioEssays* 32, 271–280.

Martin, W., Baross, J., Kellet, D., Russell, M.J. (2008) Hydrothermal vents and the origin of life. *Nature Reviews Microbiology* 6, 801–814.

Miller, S.L. (1953) A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science* 117, 528–529.

Mulkidjanian, A.Y., Bychkov, A.Y., Dibrova, D.V., Galperin,M.Y., Koonin, E.V. (2012) Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, E821–E830

Pizzarello, S. (2007) The chemistry that preceded life's origins: a study guide from meteorites. *Chemistry and Biodiversity* 4, 680–693.

Pizzarello, S., Cronin, J.R. (2000) Non-racemic amino acids in the Murray and Murchison meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 329–338.

Ricardo, A., Szostak, J.W. (2009) Life on Earth. *Scientific American*, 2009, September, pp. 54–61.

Russell, M.J.,Hall,A.J. (1997) The emergence of life from iron monosulphide bubbles at a submarine hydrothermal redox and pH front. *Journal of the Geological Society* 154, 377–402.

Schwartz, A. (2007) Intractable mixtures and the origin of life. *Chemistry and Biodiversity* 4, 656–664.

Sephton, M.A. (2002) Organic compounds in carbonaceous meteorites. *Natural Product Reports* 19, 292–311.

Wächtershäuser, G. (1990) Evolution of the first metabolic cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87, 200–204.

12

DÜNYANIN ERKEN DÖNEMİNDE YAŞAM

Öğrenme Çıktıları

- Yaşamın ortaya çıktığı ortamı tanımlamak.
- Delta gösterimini kullanarak izotop parçalamasını hesaplayabilmek, delta gösteriminin jeolojik ve biyolojik süreçlerin araştırılmasındaki kullanımını anlamak.
- İzotopik ve morfolojik yaklaşımlar da dâhil olmak üzere Dünyanın erken dönemlerinde yaşam arama yöntemlerini açıklamak.
- Erken Dünyadaki yaşam kanıtlarını tanımlamak.
- Erken Dünyadaki yaşam kanıtlarını yorumlarken karşılaşılan bazı sorunları anlamak ve açıklamak.
- Erken Dünyadaki canlıların sahip olduğu varsayılan bazı metabolizmaları açıklamak.
- Bu ilkelerin bir başka yerdeki yaşam arayışında kullanımlarını anlamak.

12.1 Yeryüzünde Erken Yaşam

Astrobiyolojideki en zorlayıcı sorunlardan biri, Dünyada var olan en erken canlılık için kanıt bulmaktır. Bu konuyu ele almak için harekete geçtik çünkü bu, yaşanabilir koşullar oluştuktan geldikten sonra yaşamın ne kadar çabuk ortaya çıktığını anlamamıza yardımcı olabilir. Ayrıca, bu tür kanıtlar sayesinde en eski organizmaların yaşadığı çevresel koşulları tanımlama konusunda daha iyi bir konumdayız ve nihayetinde erken yaşam için gerekli olan koşulların diğer gezegenimsilerdeki varlığı hakkında değerlendirmeler yapmaktayız.

En erken canlılığa ilişkin kanıtlar oldukça çelişkili ve hala tartışmalıdır. Tartışmanın büyük bir kısmı, en erken fosillerin ve bu fosillerin canlılığın kanıtını mı yoksa biyolojik olmayan süreçleri mi içerdikleri etrafında şekillenir. Önceki iki bölümde, Dünyanın oluşumunu ve yaşamın ortaya çıktığı, canlıların çoğalmaya başladığı çevrenin oluşumunu tartıştık. Bu olayların gerçekleştiği zaman dilimi, Hadean Devrini (Hadean Eon) (4,6–4,0 milyar yıl öncesi) kapsar. Bu bölümde, bu devir içerisinde yeryüzünde ortaya çıktığı varsayılan yaşam türlerine

ve bunların kanıtlarına bakacağız. Yeryüzünde yaşamın ortaya çıkışı için biyolojik ve jeolojik bağlamı dikkate alan zaman aralığı, Hadean ve Erken Arkeyan'ı içerir. Arkeyan Devri (Arkeyan Eon), 4,0–2,5 milyar yıl öncesini kapsar.

Bu bölümün odak noktası, Dünyadaki erken yaşama yönelik tartışmalarda ortaya çıkan ilkeleri ve erken yaşamı tespit etmek için kullanılan herhangi bir yöntemin uygulanmasında karşılaşılan sorunları anlamaktır. Aslında, bu kitabın yazıldığı zaman ve bunu okuduğunuz zaman arasında yeni kanıtların sunulması ve eski kanıtların reddedilmesi şaşırtıcı olmayacaktır. Bilimin işleyişi bu şekildedir, ancak bu durum, Dünyadaki erken yaşamla ilgili çalışmalarda özellikle hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bununla birlikte, uzun zaman önce yaşayan canlıların kayaç kaydındaki kanıtlarının yorumlanmasındaki zamansız ilkeleri ve genel karmaşıklıkları belirleyebiliriz.

12.2 Erken Yaşam: Metabolizmalar ve Olasılıklar

10. Bölümde, en eski kayaç kayıtlarından bazılarını ve bu kayıtların bize Dünyanın oluşumunun ilk zamanlarında sıvı suyun varlığını nasıl gösterdiğini tartıştık. Aynı kayaçlar, astrobiyologların Dünyadaki en erken yaşam için aradığı kanıtları da içeren materyallerdir. Erken yaşamı araştırmaya yönelik yararlı bir yol sağlayan bu kayaçlar Dünyanın farklı yerlerinde bulunmasına rağmen, Dünya tarihinin ilk %10'luk kısmına ait iyi bir kayaç kaydına sahip değiliz. Bununla birlikte, elimizdeki az sayıdaki materyalden erken yaşam hakkında dikkate değer miktarda bilgi elde edilmiştir.

10. Bölümde gördüğümüz gibi, erken Dünya bazı konularda günümüzdekinden çok farklı bir yer olmasına rağmen (oksijen eksikliği, daha yüksek ısı akışı, daha yüksek UV radyasyonu), birçok yönden, özellikle yaşam için potansiyel olarak mevcut habitatlar açısından, günümüz Dünyasına benziyordu. Habitat derken, canlıların yaşadığı fiziksel alandan bahsediyorum. Elbette, erken Dünyanın oldukça farklı kimyası mevcut enerji kaynaklarının, besinlerin, eser elementlerin vb üzerinde çok farklı fırsatlar ve kısıtlamalar yaratacaktı. Başka bir deyişle, nişler farklıydı, burada niş genellikle bir organizmanın bulunduğu fiziksel alandan ziyade kullandığı belirli enerji ve kaynaklar anlamına gelmektedir.

Bununla birlikte, erken yaşam için mevcut habitatların bazıları açık okyanusları, hidrotermal baca benzeri ortamları, erken volkanik kara kütlelerinin yüzeyini, kıtaların kenarlarını veya sığ suların yüzeyini (gelgit bölgeleri), çöküntüyle kıta kabuğunda oluşan su havuzlarını, derin yeraltı ortamlarını (hem okyanus tortullarında hem de kabukta) vb içerir.

Bölüm 6'da keşfettiğimiz gibi, son evrensel ortak atanın (LUCA) özellikleri tam olarak bilinmemektedir. Bu organizmanın, filogenetik kanıtlara dayalı olarak ortaya konan hipertermofilik doğası bir tartışma noktasıdır. Derin dallanan (filogenetik yaşam ağacında LUCA'ya yakın) hipertermofiller doğru bir evrim-

sel kaynağı, en eski organizmaların gerçek doğasını temsil etmeyen filogenetik ağacın evrimsel bir eserini veya bir tür dizileme yanlılığını yansıtabilir.

Bazı araştırmacılar, Dünyadaki en eski organizmaların ototrofik olduğu önerisini kabul ediyor. Etki alanlarında çoğunlukla bakteriler ile arkeler olan ve en derin dallanmaların her noktasında yaygın olan indirgeyici sitrik asit döngüsü veya asetil-COA yolakları, atmosferden CO_2'nin asimile edildiği erken bir araç olmuş olabilir. Bu noktada, farklı organizmaların nasıl enerji elde ettikleri konusunda hafızanızı tazelemek için gerekirse Bölüm 5'i tekrar gözden geçirin. Biyolojideki unsurların bazı kullanımları, özellikle demir-kükürt proteinlerinde bulunan metaller ve enerji yolaklarında bulunan metal içeren enzimler, erken biyokimya ve metal bakımından zengin ortamların mineral yüzeyleri arasında daha doğru bir bağlantının işaretleri olabilir.

Ayrıca, H^2'nin erken metabolizmalarda önemli bir rol oynayabileceği de varsayılmaktadır. Hidrojen, hidrotermal bacalardan dışarı verilmiş ve suyun olivin gibi minerallerle reaksiyona girerek serpantin ve hidrojen oluşmasına neden olan serpantinizasyon reaksiyonlarıyla üretilmiştir.

Serpantinizasyon işlemini oluşturan üç reaksiyon aşağıdaki gibi özetlenebilir. Reaksiyon 1'de, fayalit (Fe-zengin uçlu olivin) suyla reaksiyona girdiğinde hidrojen üretilir. Üretilen silika, serpantin mineralini oluşturmak için forsteritle (olivinin Mg-zengin uç elemanı) reaksiyona girebilir (reaksiyon 2). Reaksiyon 3'te serpantin, suyun forsteritle reaksiyona girmesiyle, hidrojen üretimi olmadan oluşturulur.

Reaksiyon 1

Fayalit + su → manyetit + sulu silika + hidrojen

$$3Fe_2SiO_4 + 2H_2O \rightarrow 2Fe_3O_4 + 3SiO_2 + 2H_2$$

Reaksiyon 2

Forsterit + silika + su → serpantin

$$3Mg_2SiO_4 + SiO_2 + 4H_2O \rightarrow 2Mg_3Si_2O_5(OH)_4$$

Reaksiyon 3

Forsterit + su → serpantin + brusit

$$2Mg_2SiO_4 + 3H_2O \rightarrow Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + Mg(OH)_2$$

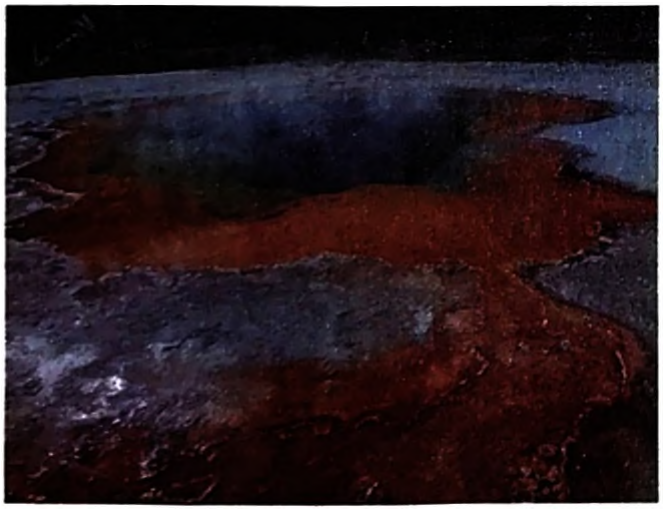
Atmosferde hafifçe indirgenen durumdaki hidrojen konsantrasyonları yaklaşık %0,1 veya daha büyük olabilirdi. Hidrojeni elektron vericisi olarak kullanma kapasitesinin gelişimi, kemoototrofik demir ve sülfat indirgenmesi (sırasıyla elektron alıcıları olarak oksitlenmiş demir ve sülfat iyonları kullanılarak) olasılığını ortaya çıkarırdı. Ayrıca, hidrojenin elektron alıcısı olarak CO^{2-}ye bağlanması, muhtemelen metanogenezle enerji üretimine neden olmuştur. *Aquifex* ve *Sulfurihydrogenibium* gibi derin dallanan bazı bakteriler, elektron vericisi olarak hidrojeni ve elektron alıcısı olarak nitrat ve demiri kullanabilirler.

Sülfür temelli metabolizmalar eski bir geçmişe sahip görünmektedir ve artan hidrotermal aktiviteyle Dünyanın erken tarihindeki bir dönemi yansıtabilirler. Bununla birlikte, Arkeyan okyanusları için çıkarsanan düşük sülfat konsantrasyonları (belki 2,5 uM'den az), eski okyanuslardaki sülfat indirgenmesi olanaklarını sınırlamıştır.

Kükürt bileşiklerini oksitleyen organizmaların çoğu elektron alıcısı olarak SO_2'nin (volkanik gazlardaki) suyla reaksiyonundan oluşan bir bileşik olan sülfiti (HSO_3^-) kullanmayı tercih eder. Bölüm 5'te gördüğümüz gibi, sülfat, kullanılabileceği işlevsel bir forma gelebilmek için ilk önce ATP kullanımını gerektirir. Bundan dolayı, bu adımı gerektirmeyen sülfit indirgenmesi, enerji bakımından daha elverişlidir ve öncü metabolizma olma olasılığı yüksektir. Bu süreç için gerekli olan genler (dissimilatuvar sülfit redüktaz, *dsr*), bakteri ve arkelerde en az beş ayrı grupta mevcuttur. Arke gruplarından *Korchaeota*, Yellowstone Milli Parkındaki kükürt içeren kaplıcalarda bulunur (Şekil 12.1). *Crenarchaeota*, kükürt bazlı metabolizmalara sahip organizmalar bakımından baskındır ve *Thermoproteus* gibi birçoğu hipertermofiliktir. Bazıları elektron alıcısı olarak kükürtü ve elektron vericisi olarak hidrojeni kullanırlar. Arkelerin diğer dalı olan *Euryarchaeota*'yı oluşturan *Pyrococcus* gibi organizmalar, kükürtü oksitleyen anaerobik hipertermofillerdir. Kükürt metabolize edenler ve metanojenlerin metabolik yolaklarındaki benzerliklerin bazıları, evrimsel bir bağlantı olabileceğini düşündürmektedir.

Erken Dünya'da organik bileşikleri kullanabilen organizmalar mevcut olabilir. Birçok derin dallanan bakterinin ve arkenin fermentasyon yapabilmesi bunun erken dönemlerde ortaya çıkan bir özellik olabileceğini düşündürmektedir. Bu erken fermentörler, ölü kemoototrofları bir gıda kaynağı olarak, biyolojik olmayan sentezlerde üretilebilen ya da Bölüm 9 ve 11'de tartışılan bazı süreçlerle uzaydan getirilen organik materyaller olarak kullanırlardı.

Astrobiyolojideki kalıcı sorulardan biri şudur: heterotrofi mi yoksa ototrofi mi önce geldi ya da tahminen aynı zamanlarda mı ortaya çıktılar? Yukarıda



Şekil 12.1 Yellowstone Milli Parkındaki kaplıcalar, erken Dünyada var olabilecek hidrojen ve kükürt metabolizmalarını kullanan mikrobiyal topluluklara ev sahipliği yapıyor. Ön plan yaklaşık 2 m çapındadır.

açıklanan kanıtların gösterdiği gibi, bu cevabı olmayan bir sorudur. Bununla birlikte, inorganik redoks çiftlerinin uygunluğu ve hem kemoototroflardan hem de dış kaynaklı organiklerden gelen organik karbonun varlığı, erken Dünyanın her iki metabolizma açısından da yaşanabilir olduğunu düşündürmektedir.

Fermantasyona ek olarak, elektron vericileri olarak organiklerin kullanımını anaerobik solunumda sülfat ve demir gibi bileşiklere bağlama kabiliyeti, çevreden enerji eldesinde yeni olanaklar sağlayacaklardır. *Archaeoglobales* gibi organizmalar, her ikisi de sülfat indirgenmesine bağlı organik bileşikler kullanatak hidrojen veya anaerobik solunum üzerinden kemoototrofik büyüme kapasitesine sahiptir. Sülfat kullanarak anaerobik solunum yapabilen çeşitli derin-dallanma mikroorganizmalarının olması anaerobik solunumun erken evrensel bir değişiklik olduğunu öne sürmektedir. Analoji ile, elektron alıcı olarak ferrik demir kullanarak anaerobik solunum hakkında benzer noktalar yapıldı. Oksijen açısından fakir bir Dünyada demirin çoğu Fe^{+2} olarak mevcut olsa da, UV radyasyonu bunun bir kısmını Fe^{+3}'e fotooksitlemiş olabilir veya Fe^{+3} eski mikrobiyal anaerobik demir oksitleyicilerin aktivitesiyle üretilmiş olabilir.

Fotosentezin evrimidir, temel metabolik muammalardan bir tanesidir. En eski fotosistemlerin, *Halobacterium* gibi organizmalardaki basit ışık tahrikli pompalara benzeyebileceğini hayal etmek mümkün görünüyor. Bu halofiller, iş yapabilen bir proton hareket kuvveti oluşturmak için ışıkla çalışan basit bir pompa olan bakteriyorodopsinleri kullanırlar. Bakteriyoklorofillerin daha sonraki evrimi, erken anoksijenik fotosentetik canlılarda basit siklik elektron taşıma zincirleri için imkan sağlar. Bu organizmalar, ATP üretmek için siklik fosforilasyonu kullanırlardı.

Uzun dalga boyu emici bakteriyoklorofillerin, kızıl ötesi dedektörler olarak bile işlev görmüş olabileceği düşünülmüş, hidrotermal bacaların yakınında yaşayan organizmalar tarafından kullanılabileceği (termotaksi), daha sonra enerji üretimi için görünür ışığın elde edilmesine uygulanmış olabileceği öne sürülmüştür. Erken fototrofların filogenetik ilişkisi de bilinmez olarak kalmaktadır. Tanımlanmış bir fotosentetik arkenin olmaması, fotosentezin ilk olarak bakteri üst âlemi içerisinde evrimleştiğini ve tamamının ilk fotosentetik organizmalara aday gösterilen yeşil kükürt kullanmayan bakteriler, mor bakteriler ve heliobakteriler olduğunu öne sürmektedir. Bakteriyoklorofiller evrimleştiğinde, daha sonra fotosentetik organizmalar, azaltılmış demir (fotoferrotrofi) de dâhil olmak üzere tüm termodinamik açıdan uygun elektron vericilerini kullanmak için evrimleşmeye başlayabilirdi.

Bazı önemli zamanlarda organizmalar, fotosistemlerin suyu elektron vericisi olarak kullanma yeteneğini geliştirdiler. Siyanobakterilerdeki iki fotosistemin, yeşil kükürt bakterilerindeki ve diğer oksijensiz fotosentez yapan organizmalardaki fotosisteme benzerlikler taşıyan atasal fotosistem I'den evrimleştiği ve ardından fotosistem II'nin, belki de gen duplikasyonuyla evrimleştiği düşünülmektedir. Bazı siyanobakterilerin H_2S kullanarak fotosentez yapma kapasi-

tesini koruması, bu organizmaların oksijensiz fotosentez için erken kapasitelerini korumalarıyla beraber, bu senaryoyu desteklemektedir. Elektron transfer reaksiyonlarını yönlendirmek için bir elektron kaynağı olarak sıvı suyun muazzam varlığından yararlanmaya yönelik bu yeni bulunan kapasitenin etkileri büyük oranda tahmin edilemez. 14. Bölümde, bu tek olayın sonuçlarını daha ayrıntılı olarak keşfedeceğiz. Şimdilik, erken siyanobakterilere çeşitli habitatları kolonize etme ve geniş çapta yayılma yeteneği sağlayacağını, oksijensiz fotosentez yapanları yerel olarak indirgenmiş demir, sülfür, hidrojen ve organik bileşiklerin bulunduğu yerlere hapsedeceğini belirtmek yeterlidir. Siyanobakteriler, biyosferdeki karbon üretimini, önce oksijensiz solunuma ve daha sonra gezegen ölçeğinde, oksijenli solunuma uygun elektron vericileri olarak hareket edecek karbon içeren bileşiklerin miktarı ve çeşitliliği için muazzam etkilerle birlikte, yaklaşık otuz kat kadar arttırabilirdi.

Oksijenik fotosentezin evriminin, mikroorganizmalar için önemli etkileri olacaktır. Oksijenin, sadece yerel olarak bile olsa, oksijenli solunumu yönlendirmesini sağlayacak ve demir oksidasyonu, elektron vericileri olarak amonyağın ve nitritin kullanılarak gerçekleştirildiği nitrifikasyon ve oksijenin kullanılarak gerçekleştirildiği sülfür oksidasyonu gibi oksijeni terminal elektron alıcısı olarak kullanan kemoototrofik yollar açacaktı. Bu süre zarfında 14. bölümde göreceğimiz gibi, indirgenmiş gazlar nedeniyle atmosferdeki oksijen tükendiğinden atmosferik oksijen düzeyleri düşük kalacaktır. Erken Dünyada 'oksijen vahaları'nın varlığından söz edebiliriz (yine de bu konuda çok insan merkezli olunmamasına dikkat edilmedilir çünkü 'vahalar' terimi, serbest oksijen radikallerinden oluşan oksidatif stres nedeniyle oksijenin zorunlu anaerobik organizmalar için ölümcül olacağı gerçeğiyle çelişmektedir).

Oksijenik fotosentezin en temel sonuçlarından biri, oksijenli solunumun yayılması potansiyelidir. Derin yeraltı su radyolizinden gelen abiyotik, yerleşmiş eser oksijen kaynakları, bu metabolizma için bir oksijen kaynağı olarak gözardı edilemeyeceğinden oksijenik fotosentezin evrimleşmeleri için gerekli olduğunu kesin olarak söyleyemeyiz. Kesinlikle oksijenik fotosentez, biyosferdeki oksijenin kapsamını ve dağılımını büyük ölçüde genişletecektir.

Bu erken hücrelerin karakteristik özelliklerinden biri, günümüz organizmalarına göre daha az özelleşmiş olmalarıdır. Erken organizmaların, günümüzdeki organizmalardan fark gözetmeksizin çok daha fazla yatay gen aktarımıyla birbirine bağlı olabileceği önerilmiştir. En eski organizmaların kesin bir son ortak ataya yol açtığı gibi düşünmek yerine, erken hücrelerin bir çeşit birliktelik oluşturarak bilgilerin yaygın olarak paylaşıldığı, çeşitli deneysel metabolizmalara öncülük ettiğini göz önünde bulundurmalıyız. Bu deneylerden bazıları diğerlerinden daha başarılı olmuştur ve farklı organizmalara dönüşürken daha özelleşmiş olurdu.

12.3. İzotopik Parçalama

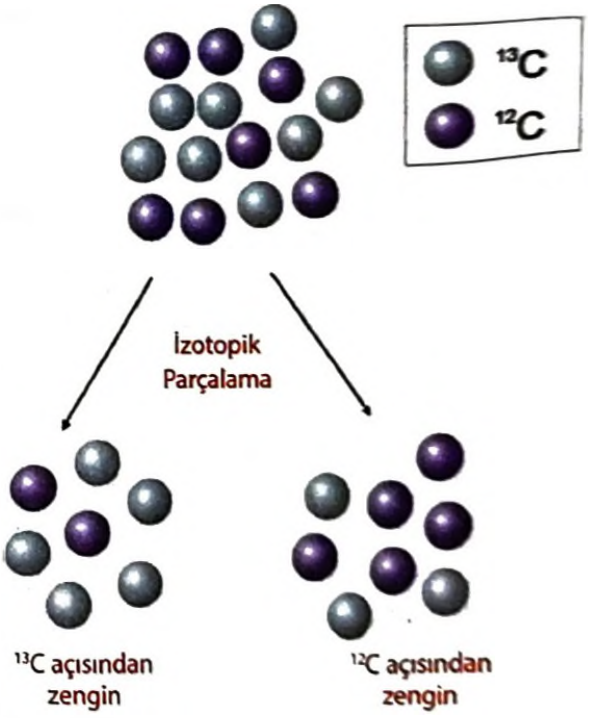
Erken habitatlarda yaşamış olabilecek bu geçmiş yaşamın kanıtlarını aramanın bir yolu, izotopik kanıtlar aramaktır. **İzotoplar**, aynı elementin eşit sayıda proton içeren, ancak çekirdeklerinde farklı sayıda nötron içeren iki veya daha fazla formdaki atomlardır. Bölüm 10'da kısaca değinildiği gibi, izotopların astrobiyolojide yaşam aramak dışında birçok başka kullanımı vardır, örneğin okyanus suyundaki döteryumun hidrojene oranlarını belirlemek ve bunu Dünya okyanuslarının orijinal olarak nerede olduğunu belirlemeye çalışmak için meteorit ve kuyruklu yıldızlarla karşılaştırmak.

Düşük atom ağırlıklı birçok element (yaşamda yaygın olarak kullanılanlar dâhil) iki veya daha fazla kararlı izotopa sahiptir. Bazı örnekler aşağıda atom kütle numaraları üst simge olarak gösterilmiştir.

Hidrojen – ^{1}H; döteryum, ^{2}H, bazen D olarak yazılır
Karbon – ^{12}C, ^{13}C
Azot - ^{14}N, ^{15}N
Oksijen – ^{16}O, ^{17}O, ^{18}O
Kükürt – ^{32}S, ^{33}S, ^{34}S, ^{36}S

Farklı sayıda nötronlar, elementlere farklı kimyasal özellikler kazandırır. Daha hafif izotop, daha yüksek moleküler titreşim frekansına sahiptir, bu nedenle daha zayıf bir bağ oluşturma eğilimindedir ve bu nedenle biraz daha reaktiftir. Daha hafif izotoplu moleküller daha hızlı reaksiyona girdiğinden, hafif izotop reaksiyon ürünlerinde konsantre olma eğilimindedir. İzotopların ürünlerde ayrıldığı veya zenginleştirildiği bu kimyasal işleme **izotopik parçalama** denir. Çoğu süreç için (kitabın ilerleyen kısımlarında bir istisnayla karşılaşacağız), bu parçalama izotopların kütlesiyle orantılıdır ve bu nedenle bazen **kütleye bağlı izotop parçalaması** olarak anılır. Bunun prensibi Şekil 12.2'de ^{12}C ve ^{13}C için gösterilmiştir.

Kimyasal bir ortamda izotopik parçalamanın meydana gelmesinin birkaç yolu vardır. Örneğin gaz üreten reaksiyonlar gibi açık, başka bir deyişle ürünlerin kaçabileceği sistemler, izotopların parçalanmasında etkili olabilir.



Şekil 12.2 İki kararlı karbon izotopu kullanılarak gösterilen izotopik parçalama. Çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçler parçalamayı yönlendirebilir.

İzotop parçalaması da genellikle daha düşük sıcaklıklarda daha fazladır. Tüm moleküller çok yüksek kinetik ve titreşim enerjilerine sahip olduğunda (yüksek sıcaklıklarda) kütledeki küçük farklılıklar daha az önemlidir, ancak bir reaksiyon soğutulduğunda hafif ve ağır izotopun reaksiyon hızları arasındaki fark daha büyük olur.

12.3.1 Karbon İzotopları

Erken yaşamın izotopik bileşimini araştırmak için kullanılan bir element karbondur. Daha önce birkaç kez gördüğümüz gibi, karbon biyolojik moleküllerin ana 'omurga' unsurudur ve bu nedenle yaşam için her yerde bulunan potansiyel bir işarettir. Karbonun iki kararlı izotopu vardır: Karbonun yaklaşık %98,9'unu oluşturan ^{12}C ve Dünyadaki karbonun yaklaşık %1,1'ini oluşturan ^{13}C. Ayrıca, kararsız olan ve ^{14}N'ye bozunan radyoaktif izotop ^{14}C de vardır. Bu karbon, çok düşük bir bolluğa sahiptir (yaklaşık bir trilyonda bir kısım). ^{14}C, arkeolojik eserlerin karbon tarihlemesinde kullanılmaktadır.

Önceki bölümden yola çıkarak, biyolojinin daha hafif izotop olan ^{12}C'yi 'tercih etme' eğiliminde olduğunu öğrenmek sizi şaşırtmamalı. Başka bir deyişle, yaşamın aracılık ettiği kimyasal reaksiyonlar, ^{12}C'nin biraz daha yüksek reaktivitesinden dolayı ^{12}C'de ^{13}C'ye göre zenginleşme eğilimindedir.

Kendimize sorabileceğimiz soru şudur: Bu parçalanmaları gerçekte nasıl ölçebiliriz? Bunu yapmak için uluslararası kabul görmüş bir sistem var.

12.4 İzotop Parçalamasını Hesaplamak: Delta Gösterimi

Uluslararası kabul görmüş bir norm ve farklı örnekleri karşılaştırmanın kolay bir yolunu oluşturan izotop parçalamasını ifade etmenin bir yoluna ihtiyacımız var. 'Delta' gösterimi, parçalama derecesini belirlemenin en önemli yoludur. Örneğin karbon izotopları için parçalama derecesi şu şekilde tanımlanır:

$$\delta^{13}C = \left\{ \left[\left(\frac{^{13}C}{^{12}C} \right)_{\text{örnek}} - \left(\frac{^{13}C}{^{12}C} \right)_{\text{std}} \right] \div \left(\frac{^{13}C}{^{12}C} \right)_{\text{std}} \right\} \times 1000‰$$

Bu denklem hakkında dikkat edilmesi gereken birkaç şey var. İlk önce ilgilendiğimiz numune için iki karbon izotopu ($^{13}C/^{12}C$) arasındaki oranı ölçüyoruz. Bu, ağır izotopun hafif olana oranıdır. Bir standardın oranı (std) bu değerden çıkarılır ve bu değer aynı standart oranın kesri olarak ifade edilir. Belirli herhangi bir öğe için standart, bilimsel topluluk tarafından tercih edilen standart olarak uluslararası kabul görmüş bir kaya veya malzemedir. Tablo 12.1'de farklı elementler için bunların çeşitlerini görebilirsiniz. Bazı elementler için seçilebilecek birden fazla standart vardır, bu nedenle izotop değerleri yayınlandığında kullanılan standardı belirtmek önemlidir.

Tablo 12.1 Tipik izotop standartları.

Standart adı	Standart tarafından sağlanan izotop oranı	Standart değeri
Standart ortalama okyanus suyu (SMOW)	$^{2}H/^{1}H$	0,00015575
	$^{18}O/^{16}O$	0,0020052
	$^{13}C/^{12}C$	0,0112372
	$^{18}O/^{16}O$	0,0020672
Canyon diablo troilite (CDT)	$^{34}S/^{32}S$	0,045005
Hava	$^{15}N/^{14}N$	0,003676

Nihai izotop parçalaması da binde parçalar olarak ifade edilir ve biraz tuhaf bir sembol ‰ verilir, bu da mil başına veya 'binde' anlamına gelir. ‰+10 değeri, numunenin standarda göre daha ağır izotopta binde 10 kısımla zenginleştirildiği anlamına gelir.

Delta gösterimi, daha hafif olana kıyasla daha az ağır izotop içeren bir numunenin daha düşük izotop oranı ve daha düşük delta değeri vereceği anlamına gelir. Oran standarttan düşükse, izotop değeri negatif olacaktır. Bu ilke, Şekil 12.3'te karbon için gösterilmiştir.

Karbon için, tipik $\delta^{13}C$ değerleri, deniz suyu ve kireçtaşları için yaklaşık ‰0 ± 2, petrol (esas olarak ölü organizmaların kalıntılarıdır) için ‰–31 ve mikroorganizmalar tarafından üretilen metan için ‰–70 arasında değişir. Genel ilke şudur: biyolojik fraksiyonasyon ^{12}C içeriğini arttırdığından, $\delta^{13}C$ daha negatif (düşük) hale gelir.

Siyanobakteriler, algler ve bitkiler gibi organizmalar tarafından üretilen fotosentetik karbon (organik karbon) ^{13}C'de tükenir ve tipik $\delta^{13}C$ değerleri yaklaşık ‰–10 ila ‰–30 arasındadır. Tüm ototrofik organizmalar (karbonlarını CO_2'den alan organizmalar; Bölüm 5), karbon fraksiyonasyonu üretme eğiliminde olacaktır. Şekil 12.4'te bir dizi karbon izotop fraksiyonasyon değeri görebilirsiniz. Ne yazık ki, ototroflarda kullanılan karbon fiksasyon yollarının çoğu oldukça benzer fraksiyonasyonlar üretir, bu nedenle mevcut olabilecek biyokimyasal

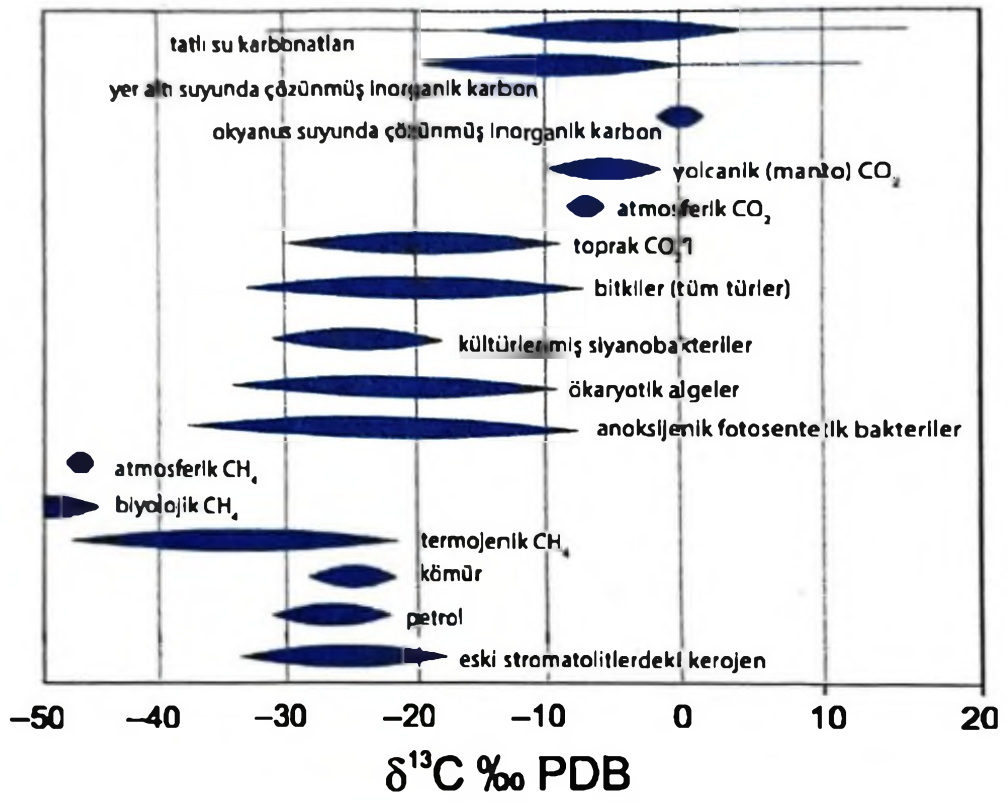


^{13}C açısından zengin / $\delta^{13}C$'ün en yüksek değeri



^{12}C açısından zengin / $\delta^{13}C$'ün en düşük değeri

Şekil 12.3 Bir elementin daha ağır izotopundaki bir zenginleşme, daha yüksek delta değerlerine yol açar, daha hafif izotoptaki bir zenginleşme, daha ağır izotopa göre ifade edilen daha düşük delta değerlerine yol açar.



Şekil 12.4 Pee Dee Belemnite (PDB) standardına göre ifade edilen biyolojik ve biyolojik olmayan karbon bileşikleri için bir dizi karbon izotop parçalama değerleri (Tablo 12.1). 'Termojenik' metan, organik bileşiklerin biyolojik olmayan ısıyla parçalanarak metana dönüşmesiyle üretilen metan anlamına gelir.

yolların veya metabolizmaların türlerini anlamak için eski karbon izotopik fraksiyonasyon değerlerini kullanmak kolayca mümkün değildir.

12.5 Kükürt İzotop Parçalaması

Kaya kayıtlarında yaygın olarak incelenen bir diğer izotop grubu, kükürt izotoplarıdır. Kararlı kükürt izotopları ^{32}S, ^{33}S, ^{34}S, ^{36}S'dir. ^{32}S ve ^{34}S arasındaki parçalanma en çok çalışılan parçalanmadır. Karbona benzer şekilde biyoloji, daha ağır izotop ^{34}S'den biraz daha hızlı tepki verdiği için daha hafif izotop olan ^{32}S'yi tercih eder.

Doğal ortamdaki kükürt izotop parçalanması, büyük ölçüde sülfat indirgeyen bakterilerden kaynaklanır (Bölüm 5), bunların organik maddeyi (veya hidrojeni) elektron alıcısı olarak sülfat, SO_4^{-2} kullanarak oksitleyen anaerobik bakteriler olduğunu hatırlayacaksınız. Organizmalar sülfatta sınırlı olduğunda, kaynaktan fraksiyonasyon oldukça küçüktür, ancak bol miktarda (>1 mmol) olduğunda, o zaman ‰45 kadar büyük fraksiyonasyon değerleri ölçülmüştür. Fraksiyonasyon değerleri de türler arasında farklılık gösterir.

SO_4^{-2}, izotopik parçalama nedeniyle ^{32}S'de zenginleşen mikrobiyal aktivite sırasında H_2S'ye indirgenir. H_2S, sülfürler (demir sülfür gibi) oluşturmak için

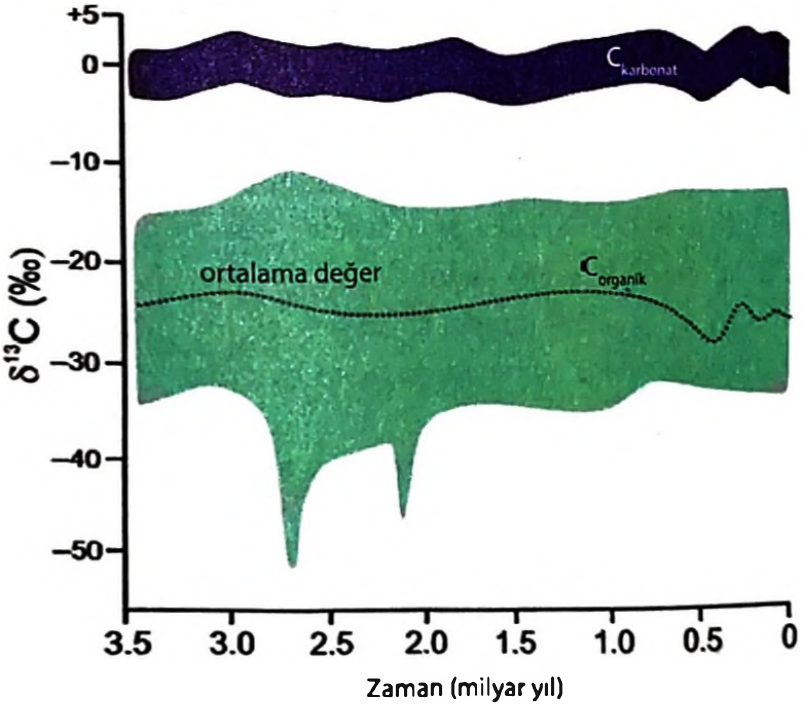
minerallerle reaksiyona girdiğinde, kaya minerallerinde kükürt fraksiyonasyonunun imzası korunur ve daha sonra tespit edilebilir. Bu nedenle, sülfidik kayaçlarda $\delta^{34}S$'nin düşük değerleri yaşamın varlığına işaret eder.

12.6 Yaşamı Aramak İçin Eski İzotopları Kullanmak

Dünya tarihi boyunca ortaya konan kayalardaki eski karbona bakabilir ve izotopik fraksiyonasyon kalıplarının ve değerlerinin ne olduğunu görebiliriz. Bu, Dünyadaki en eski kayalarda bulunan eski karbonun biyolojik kökenli olup olmadığını bize söylemek için kullanılabilir.

Antik organizmalar, kayalar gömülürken **metamorfizm** geçirdiğinde ısıtılır ve basınç altında kalır. Bu işlem sırasında karbon ısıtılır ve basınçlandırılır ve karmaşık tanımsız karbon bileşikleri için genel bir terim olan **kerojene** dönüşür. Yoğun ısıtma ve basınç altında bu kerojenin kendisi **grafite** dönüşebilir.

Şekil 12.5'te farklı yaşlardaki kayalar için yapılmış çok çeşitli karbon izotop ölçümlerini görebilirsiniz. Şekil iki değeri göstermektedir, üstteki değerler ($C_{karbonat}$), sulu ortamlarda çökeltilmiş biyolojik olmayan karbonat kayaçlarının izotop değerleridir. Şaşırtıcı olmayan bir şekilde, biyoloji olmadan önemli bir karbon izotop fraksiyonu görmüyoruz. Grafiğin alt kısmındaki ($C_{organik}$) değerler, bir zamanlar organizma olduğu varsayılan (örneğin kerojen) karbondan elde edilen değerlerdir. Bu materyaller, zaman içinde izotopik fraksiyonasyon (^{13}C'lik bir azalma) gösterir, bu organizmaların (ototrofların) Dünya tarihi boyunca iş başında olduğuna, CO_2 aldığına, tercihen ^{12}C kullandığına ve böylece ^{13}C tükenmesine ve negatif $\delta^{13}C$ değerine neden olduğuna dair kanıt olarak ele alınır.



Şekil 12.5 Kayaçların inorganik ($C_{karbonat}$) ve organik parçalanmasında ($C_{organik}$) günümüzden yaklaşık 3,5 milyar yıl öncesine kadar zaman içinde karbon izotop parçalama değerlerinin aralıkları, zaman içinde biyolojik parçalama için kanıt gösterir.

Grönland'daki antik Akilia kayaçlarında (3,8 milyar yıldan daha eski olan), Dünyadaki erken yaşamın kanıtı sunulmuştur. İçlerindeki karbonun (grafit) ^{13}C'de tükendiği bulundu ve bu, organizmaların tercihen ^{12}C'yi aldığını ve varlıklarının bir imzasını bıraktıklarının kanıtı olarak rapor edildi. Bu, 3,85 milyar yıldan biraz daha uzun bir süre öncesine ait bir yaşam kanıtı olarak sunuldu. Kayaçlardaki (apatit) fosfat mineralleri içindeki grafitin analizini içeren diğer veriler, ortalama ‰–37 değerinde dikkate değer fraksiyonasyon değerleri gösterdi; bu, metamorfizma gibi süreçler yoluyla hafif karbon kayıpları göz önüne alındığında, şu şekilde yorumlanabilecek izotopik değerler verecektir. Metanı elektron donörü olarak kullanan metanotroflar gibi organizmalar neden olabilir (Bölüm 5). Kayaçların tortul yapıda olduğu, kimyasal çökeltme ve deniz suyundan parçacıklar halinde çökelmeyle oluştuğu düşünüldü. Yaşanabilir bir sıcaklık aralığında sıvı bir hidrosferin varlığını ortaya koydukları düşünüldüğünden, erken yaşamın kritik göstergeleriydiler.

Ancak, yeniden haritalama ve yeni petrolojik ve jeokimyasal analizler, bazı kayaçlar için tortul bir kökeni desteklememektedir. Bunun yerine lavlar gibi magmatik (volkanik) kayaçlar olarak görünürler ve bu nedenle oluşum anında yaşama ev sahipliği yapmaları olası değildir. Apatit ilk başta düşünüldüğü kadar eski olmayabilir, bu da yaşam için kanıtları daha da sorguladı ve izotop verilerinin yaşam için kanıt olarak izole edilmesiyle ilgili olası sorunların altını çizdi.

Grönland kayalıklarının başka bir çıkıntısı olan Isua kayalarında da kanıt aranmıştır. Yaklaşık 3,7–3,8 milyar yaşında olan bu kayaların, yaşamın göstergesi olan karbonatlarda ve eski tortul kayaçlarda (ortalama yaklaşık ‰–15) hafif karbon izotop değerlerine sahip olduğu iddia edilmiştir. Bununla birlikte, karbonatların daha yakın zamanlarda antik volkanik kayanın metamorfizması sırasında üretildiği düşünülmektedir.

Yakın zamanlardaki kontaminasyon, kayalarda yaşam kanıtı bulma konusunda her zaman potansiyel bir sorundur. Bölüm 7'de gördüğümüz gibi, birçok organizma, enerji ve besin elde ettikleri ve kayaların dışında yaşanan aşırılıklardan korundukları kayaların içinde (kasmo-endolitler gibi) yaşar. 3,8 milyar yıllık bir süre çok uzun bir süre ve bu süre içinde, kayaların potansiyel mikrobiyal kolonistlere maruz kaldıkları farklı aşamalarda nasıl kolonize edildiğine dair çok az fikrimiz var.

Grönland kayaları tartışmalı olmaya devam ediyor ve bu sorunları çözmeye çalışan bilim insanları arasında meydana gelen değiş tokuş ve karşılıklı değiş tokuşun sadece bir örneğini gösteriyorlar.

Avustralya Pilbara'daki (3,5–3,2 milyar yıl yaşında) ve Güney Afrika'daki İncir Ağacı gruplarındaki (yaklaşık 3,3 milyar yıl yaşında) kayalardan karbonun izotopik çalışmaları, benzer şekilde, bazılarının sahip olduğu ‰–32'ye kadar

izotopik sapmaların ($\delta^{13}C$) kanıtlarını göstermektedir ve bazılarının biyolojik olduğu, başkaları tarafından kayaçların döşenmesinden itibaren meydana gelen değişim süreçlerinden kaynaklandığı iddia edilmiştir.

Diğer izotop fraksiyonlarında yaşam için kanıt aranmıştır. Örneğin, biyolojik sülfat indirgemesinin neden olduğu kükürt izotoplarında fraksiyonlama, biyolojik bir süreç çıkarmaya çalışmak için tercih edilen bir araçtır. Bu tür işaretler, Batı Avustralya'nın Kuzey Kutbu bölgesinden 3,47 milyar yıllık eski kayalarda rapor edilmiştir (coğrafi kuzey kutbuyla hiçbir ilgisi yoktur!). Pirit tanelerindeki ‰–21,1'e kadar ve ortalama ‰–11,6'ya kadar olan kükürt izotop fraksiyonasyon değerleri, bu tortullarda oluşurken biyolojik sülfat azalmasının meydana geldiğini ve o sırada yaşamın kanıtı olabileceğini düşündürmektedir. Bu mikroplar tarafından kullanılan sülfatın, düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 60 °C'den düşük) oluşan alçı taşı ($CaSO_4$) olduğu düşünülür, bu da mikropların yumuşak, mezofilik bir ortamda büyüdüğünü düşündürür. Kanıt, eğer doğruysa, sülfat indirgemesinin eski bir metabolizma olduğu fikrini daha da desteklemektedir. Arkeyan kayalarındaki nitrojen izotop fraksiyonları (negatif $\delta^{15}N$ değerleri), erken Dünyada nitrojen fiksasyonunun kanıtı olarak veya sabit nitrojen kullanan kemoototrofik organizmaların aktivitesi için çeşitli şekillerde yorumlanmıştır.

Belirli kayalar ve erken yaşam için kanıtların belirli raporları için argümanlar ve karşı argümanlar üzerinde ayrıntılı olarak incelemeye çalışmayacağız. Bir ders kitabı için önemli olan, yukarıdakilerden açıkça görülen bazı temel ilkeleri anlamamızdır. Bazı ana noktalar şunlardır:

1. Son zamanlardaki kontaminasyonu, yaşamın gerçekten eski bir belirtecinden ayırt etmek için çok dikkatli olmak gerekir.
2. Belirteç, yaşam için anlamlı olan jeolojik bir bağlam içinde olmalıdır. Bir zamanlar erimiş lav olan bir şeyde yaşamın izotopik belirteçlerini bulmak, onu yaşam açısından sorgulanabilir bir belirteç haline getirir. Bu belirteçleri, yaşamın çoğalabileceği, yumuşak sulu ortamlarla ilişkili tortul kayaçlar gibi kayaçlarda bulmayı umuyoruz.
3. Bu yaşam bulma girişimleri, Dünyada sahip olduğumuz iyi donanımlı laboratuvarlarla bile bir belirteç bulmanın zorluklarını ortaya koymaktadır. Toplanan ve Dünyaya geri gönderilen daha küçük numune boyutlarına sahip Dünya dışı ortamlarda izotopik veya diğer yaşam kanıtlarını bulmanın veya bir gezegene gönderilen ve bir uzay aracına sığması gereken donanımın kullanılmasının zorluklarını gösterir.

12.7 Yaşamın Morfolojik Kanıtı

Eski yaşamın kanıtlarını aramanın bir başka yolu da, yaşamın temeli olan fosilleşmiş hücrelere benzeyen şekilleri aramaktır (Bölüm 4). Hücrelerle ilişkili bulduğumuz morfoloji türleriyle tutarlı hücresel yapılar öneren spirallerin, iplikçiklerin ve diğer şekillerin anlatısal işaretlerini arayabiliriz.

12.7.1 Mikroorganizmalar Nasıl Fosilleşti?

Laboratuvarda yapılan çalışmalar, mikroorganizmaların fosilleştiğini ve bu nedenle şekillerinin korunabildiğini gösteriyor. Bu süreci simüle etmek için çok çalışma yapıldı.

Organizmalar tarafından üretilen hücre dışı polisakkarit (EPS) genellikle negatif olarak yüklenir (sülfatlar veya fosfatlar gibi fonksiyonel gruplar tarafından). Bu negatif yüklü gruplar, kalsiyum gibi katyonları bağlama eğilimindedir. Bu bağlanmanın etkisi, bu iyonların konsantrasyonlarını, minerallerin hücre zarı veya duvarında (biyomineralizasyon) oluşabileceği bir noktaya kadar lokal olarak arttırmaktır. Kalsiyum durumunda, bu elementin hücre yüzeyindeki artan konsantrasyonları, kalsiyum karbonat çökelmesini teşvik edebilir. Bu, örneğin sığ su ortamlarında meydana gelebilir. Organizmalar daha sonra etraflarında oluşan mineraller tarafından korunur.

Fosilleşmeye giden başka bir yol da silisleşmedir (silika içeren kayalar veya çörtler, erken yaşamın kanıtlarını aramak için tercih edilen malzemelerden biridir). Silika, SiO_2'nin oligomerlerinden oluşan bir moleküldür. Yükseltilmiş silika konsantrasyonları, organizmayı esasen mineralin içine hapsetme etkisiyle hücre çevresinde çökelmesine neden olacaktır. Silika molekülleri negatif yüklüdür. Silika, hücrenin yüzeyine aşağıdakiler dâhil olmak üzere farklı yollarla bağlanabilir:

1. Hücre yüzeyindeki pozitif yüklü sitelerle elektrostatik etkileşimler (örneğin amonyum iyonları).
2. Örneğin EPS hücresindeki negatif yüklü bir fosfat grubu ile silika molekülü üzerindeki negatif yük arasında bulunan bir demir hidroksit molekülünün aracılık ettiği katyon köprülemesi, ve
3. Hücre yüzeyindeki bir hidroksil grubu (örneğin EPS'de) ile silika moleküllerindeki oksijen arasındaki hidrojen bağı.

Bu süreçler, örneğin volkanik bir kaplıcanın kenarlarında, yüksek konsantrasyonlarda silika olduğunda meydana gelebilir.

Mikroorganizmalar, metabolik aktiviteleri yoluyla mineral çökelmesine neden olabilir. Örneğin, fotosentez sırasında, bir hücrenin etrafında CO_2 tüketilir, aksi takdirde su oluşturan karbonik asitle (H_2CO_3) karışır. Bu, bir hücrenin etrafındaki pH'da bir artışa neden olur, karbonatların stabilitesini arttırır ve bir hücre etrafında karbonat mineral çökelmesine neden olur. Bununla birlikte, silika çökelmesi durumunda, silikanın hücreye bağlanmasının neden olduğu silika polimerizasyonuyla, abiyotik kimyasal olarak yönlendirilen bir çökeltmeyle tamamen pasif olduğu düşünülmektedir.

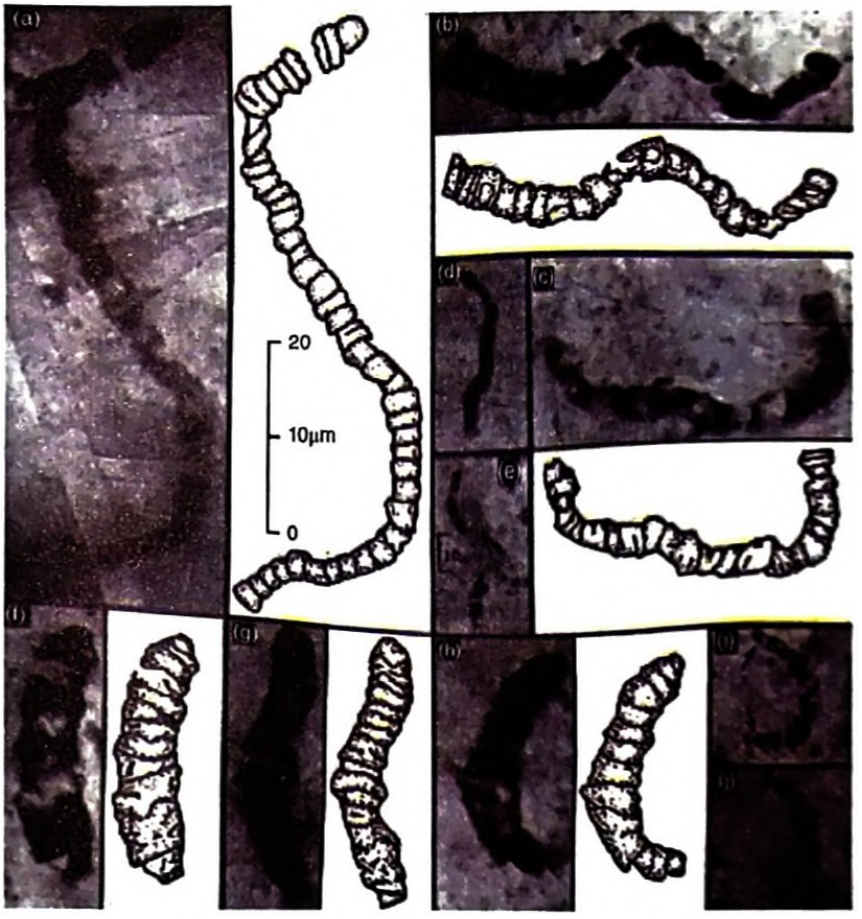
Bu şekilde oluşan mineraller, içinde bulundukları malzeme gömüldükçe kayalara dönüştüklerinde sonunda ısıtılacak ve basınçlandırılacaktır. Silika çörtlere ve kalsiyum karbonatlar kireçtaşlarına dönüşecektir. Bu işlem sırasında hücrelerdeki karbon da basınçlandırılır ve ısıtılır ve kerojen veya grafite

dönüştürülür. Alternatif olarak, hücreler permineralize olabilir, bu sayede minerallerle değiştirilirler, ancak morfoloji bozulmadan korunabilir.

Bu işlemler laboratuvarda taklit edilebilir ve mikroorganizmaların kayaç kayıtlarında korunabileceği makul yolların olduğunu gösterir. Ayrıca bu süreçlerin milyonlarca ve milyarlarca yıl boyunca meydana gelirken tıpkı organizmalar gibi inorganik materyalleri ve yapılarını koruduklarını ya da, jeolojik süreçlerle, karbon izotop parçalanmalarını ve araştırmacıların yaşam için aradıkları kimyasal değişimleri gerçekleş tirdiklerini görebiliriz.

12.7.2 Fosil Mikrobiyal Yaşam İçin Kanıt

Az önce tartıştığımız süreçler tarafından korunan erken fosilleşmiş mikrobiyal yaşam için birçok morfolojik kanıt sunulmuştur. William Schopf, yaşları 0,7 ila 3,5 milyar yıl arasında değişen kayalardan çıkarılan mikrofosillerin ünlü fotomontajlarını sunmuştur. Bazıları Batı Avustralya'daki Pilbara Kratonunun Warrawoona grubundandır ve 3,5 milyar yıl yaşındadır. Bunlar, segmentasyonlu günümüz siyanobakterilerinin filamentli, dallı yapılarına çarpıcı bir benzerlik gösteren erken hücreler olarak yorumlandı (bölme; Şekil 12.6).



Şekil 12.6 William Schopf tarafından tanımlanan ilk erken Dünya mikrofosillerinden bazıları. (Kaynak: Schopf 1993). American Association for the Advancement of Science'ın izniyle çoğaltılmıştır.

Ancak, morfolojik kanıtlar o zamandan beri Martin Brasier (1947–2014) ve meslektaşları tarafından sorgulandı. Mikrofosillerin eski bir tortul kayada olmaktan ziyade, daha yakın zamanda yerleştirilmiş olan antik kayadaki sıcak suyun etkileşimi tarafından oluşturulan bir hidrotermal olukla ilişkili olduğu iddia edildi. Damar içindeki sıcaklıklar, yaşam için bilinen üst sıcaklık sınırının üzerinde, 200 °C'nin üzerinde olabilirdi. Ayrıca, fosillerin, biyolojik fosillerden daha bozuk, şekil bakımından oldukça düzensiz oldukları iddia edildi. Bunun yerine, derin okyanus hidrotermal bacalarda da görülen, biyolojik olmayan Fischer-Tropsch reaksiyonlarındaki organik sentezin sonucu oldukları öne sürülmüştür.

Diğer morfolojik kanıtlar sunulmuştur. Barberton ve Pilbara'nın antik volkanik kayalarından mikrobiyal mat benzeri yapılar,çubuk ve filament şekilli hücreler rapor edilmiştir ve bunların sığ su ortamlarındaki yaşamı belgelediği düşünülmektedir. Bu özelliklerin çoğu, hücreler silika çözeltileri veya karbonat mineralleriyle değiştirildiğinde korunmuştur.

Arkeyan'a dair en ikna edici kanıtlarından bazıları (hayatın ilk ortaya çıktığı erken Arkeyan olmasa da) Güney Afrika'daki Transvaal Supergroup'taki 2,55 milyar yıllık çörtlerdeki mikrofosiller ve karbonat oluşumlarıdır. Bunlar, yaklaşık 2–3 μm veya daha küçük boyutlu tüplerden ve küre şeklindeki yapılardan yapılmıştır.

Zamanda daha geriye gidersek, Avustralya, Pilbara Craton'daki Kükürt Kaynakları Grubu kayaçlarından, 3,23 milyar yıl yaşında hidrotermal kaya setinden uzun filamentler içeren mikrofosiller rapor edilmiştir. Piritten yapılan filamentler dar (yaklaşık 2 μm veya daha az) ve çok uzundur (yaklaşık 200–300 μm). İçi boş değiller, ancak karbon kaplamaları var.

Erken Arkeyan döneminde mikrofosiller için önerilen başka kanıtlar da vardır ve herhangi bir belirli fosil seti hakkındaki tartışmaların nerede olduğunu görmek için en son makaleleri okumanız tavsiye edilir.

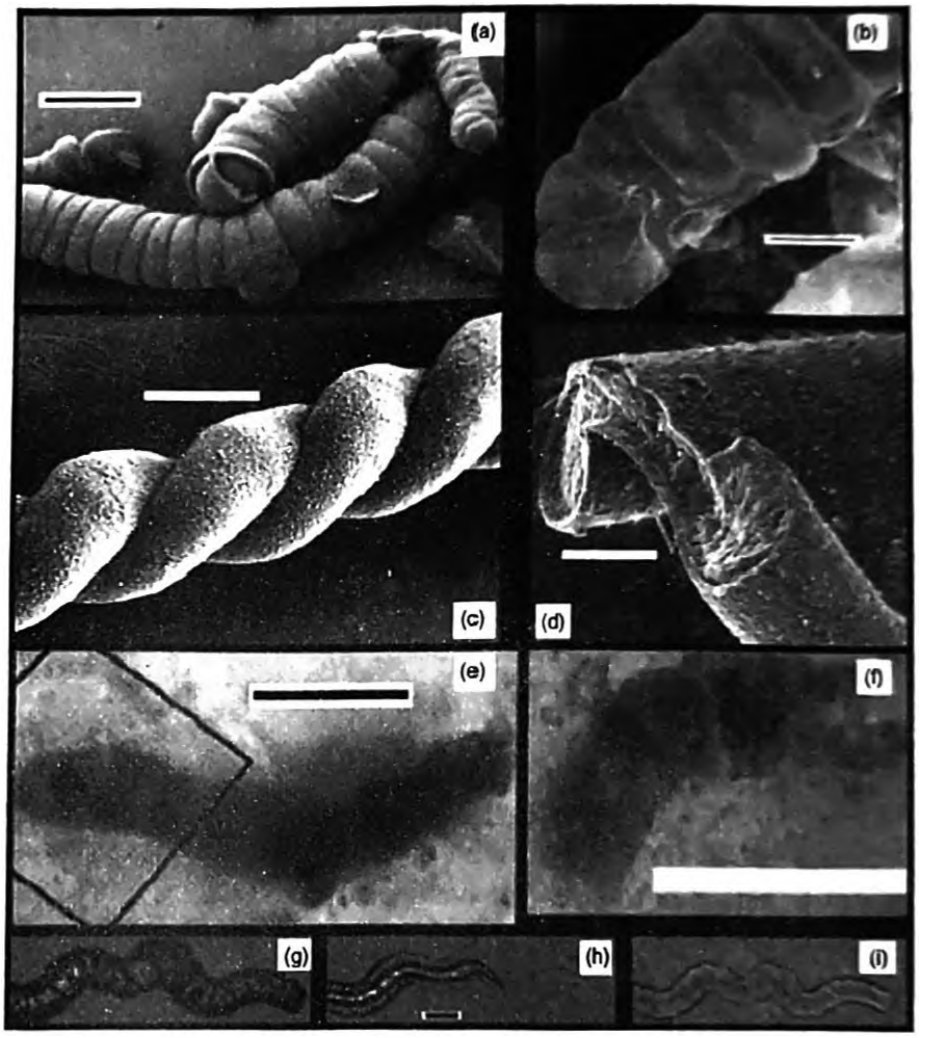
Morfolojik kanıtlar, izotopik kanıtları araştırmak için aşağıdakiler de dâhil olmak üzere bazı benzer zorluklar doğurur:

- Kayaç bozunması sırasında uzun süredir basınç altında olan, ısınan ve morfolojinin imzasını ayırt etmeyi zorlaştıran eski örneklerle uğraşma sorunu.
- Fosillerin yaşam için makul bir jeolojik bağlamla ilişkilendirilmesini sağlama sorunu.
- Fosillerin abiyotik olmadığından emin olmak.

Morfolojiyle ilgili bir problem, kimyasal yollarla mikrofosil görünümlü yapılar (biyomorflar olarak adlandırılır) oluşturabilmenizdir. Morfoloji kendi başına en iyi ihtimalle biyojenitenin belirsiz bir göstergesidir.

Bazı araştırmacılar tarafından laboratuvarda sadece $BaCl_2$, Na_2SiO_3, NaOH gibi kimyasal çözeltiler kullanılarak filament görünümlü yapılar üretilmiştir. Çözeltiler birbirine eklendiğinde inorganik agregatlar çökelir. Silika-karbonat

çözeltilerinde, kaya kayıtlarından bildirilen eski fosillere çok benzeyen Şekil 12.7'de gösterilenler gibi filamentli malzemeler çökeltilir. Bu durumun karmaşıklığına ek olarak, bu inorganik çökeltilerin organik karbonu bağladığı bile gösterilebilir, böylece silisleşme yoluyla taşlaştıklarında veya hidrotermal sıvı içinde korunduklarında, kolayca organizmaların organik kalıntıları gibi görünebilirler.



Şekil 12.7 Fosil yaşamına benzeyen kimyasal reaksiyonlar tarafından üretilen çeşitli abiyotik çökeltiler. (a–d) Filamentlerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri. (a, b, d) Silika ve baryum karbonat içeren filamentler. (c) Silikanın hafif alkali çözelti içinde çözülmesinden sonra baryum karbonat kristal kümeleri. (d) Kümelerin dışını kaplayan silika kaplama. (e, f) Karşılaştırma için Avustralya'daki Warrawoona çörtünde bulunan ipliksi yapılar. (g, h, i) Sentetik filamentlerin optik mikrografları, filamentlerin katı iç kısmının seyreltik etanoik asit içinde ilerleyici çözünmesini göstererek, morfolojisi orijinal filamentinki olan içi boş bir silika zar bırakır. Ölçek çubukları, aynı büyütme oranında, (a, b) 40 µm, (c) 1 µm, (d) 4 µm, (f–i) 40 µm. (g–i) (Kaynak: Garcia-Ruiz et al. 2003. American Association for the Advancement of Science'ın izniyle çoğaltılmıştır).

Bu karışıklıklar, topluluktaki bazılarının, önerilen tüm mikrofosillerin değerlendirilmesi gereken kriterler önermesine yol açtı –biyolojik kökenli olabileceklerini kabul etmek için bir tür minimum kriter seti. Bu bir dizi kriter, antik olduğu düşünülen fosillerin sahip olması gereken özellikleri belirtir:

1. Tortul olduğu gösterilen ve çok düşük seviyelerde jeolojik değişime (metamorfizm) maruz kalmış kayaçlarda bulunmak.
2. Kerojenden meydana gelmiş olmak.
3. Diğer fosillerle birlikte var olmak (tek başına olmamak).
4. En az canlı hücreler için bilinen minimum boyut kadar büyük olmak.
5. Boşluklu olmak (hücresel bir kökene işaret eder).

Bu kriterlerden bazılarını göstermek zor olabilir ve minerallerle değiştirilmiş, bu nedenle kerojeni olmayan,içi boş olmayan mikropların güvenilir fosil kanıtlarını bulma olasılığını tamamen dışlamamalıyız. Bununla birlikte, sistematik olarak takip edilebilecek iyi tanımlanmış kriterler oluşturmaya çalışmak, verileri karşılaştırmanın ve yorumlamadaki zayıf noktaları değerlendirmenin bir yolunu sağlar.

Çok fazla tartışma olmasına rağmen, yeni yöntemler, yaklaşımlar ve örnekler, astrobiyologların en güvenilir örnekleri bulmasına izin veriyor. Mevcut çalışma, morfolojisi olmayan kimyasal sinyallerin yaşamı güvenilir bir şekilde gösteremeyeceğini ve hücresel yaşamın morfolojik kanıtını bulmanın, Dünyadaki erken yaşamı araştırmak için önemli bir araştırma olduğunu göstermektedir.

Odak Noktası: Astrobiyologlar: Nicola McLoughlin



Hangi konu üzerinde çalışıyorsunuz? Mikrobiyal yaşamın dokusal ve kimyasal kanıtı veya Dünyadaki en eski kayalardan bazılarının biyo-belirtçeleri. En erken yaşam formlarının ne zaman ve nerede ortaya çıktığı, ilk mikrobiyal metabolizmalar ve bu mikroorganizmaların Dünya ortamlarıyla birlikte nasıl evrimleştiğiyle ilgileniyorum.

Nerede çalışıyorsunuz? Ağırlıklı olarak Güney Afrika'nın Barberton Greenstone Kuşağı ve Batı Avustralya'nın Pilbara Kratonundaki antik Arkeyan kayaları üzerinde saha çalışması yapıyorum, çünkü bu yerler Dünyanın en iyi korunmuş ve en eski kayalarından bazılarını içeriyor. Daha sonra Bergen, Norveç'teki Jeobiyoloji Merkezinde, örneklerde varsayılan biyolojik belirteçleri aramak için mikroskobik görüntüleme teknikleri kullanıyoruz. Daha sonra, bu kayalardaki elemental ve izotopik belirteçleri ölçmek için Dünya çapında bir dizi uzman laboratuvarda çeşitli jeokimyasal araçlar kullanıyoruz.

İlk uzmanlık alanınız neydi? Doğa Bilimleri (Jeoloji).

Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz? Dünyadaki yaşam ilk ne zaman ortaya çıktı ve kaya kayıtlarındaki en eski güvenilir yaşam izleri nelerdir? Bu ilk canlılar nasıl geçim-

lerini sağladılar, hangi metabolizmaları kullandılar? Erken bir deniz tabanı biyosferi var mıydı ve bu mikroorganizmalar gerçek endolitler miydi, yani kaya sıkıcı mı? En eski doğrulanabilir mikrofosil nedir ve ilkel metabolizmasını anlamak için hangi kimyasal teknikleri kullanabiliriz? Bu tür katmanlı tortul yapının biyojenitesini doğrulamak için Marslı bir gezici tarafından kullanılabilecek araçları kullanarak biyojenik ile abiyojenik stromatolitleri ayırt edebilir miyiz?

Astrobiyoloji alanında sizi heyecanlandıran nedir? Yaşamın ne olduğu, yaşamı nasıl tespit ettiğimiz ve yaşamın hangi ortamlarda yaşadığıyla ilgili temel soruları ele alma fırsatı. Bilinmeyen dünyaları ve habitatları keşfetmenin zorluğu, bu alanın canlandırıcı disiplinlerarası doğasıyla birleşiyor. Yaşamın sağlam kanıtlarının ne olduğu hakkında her zaman canlı tartışmalar ve örneğin Marslı gezicilerden yeni veriler bildirildiğinde gerçek bir öncü ruhu vardır. Astrobiyoloji sınırsızdır ve gerçekten yeni şekillerde düşünmenizi sağlar; asla sıkıcı bir gün yoktur!

12.7.3 Stromatolitler

Yaşam, potansiyel olarak, az önce gördüğümüz gibi, mikroskobik ölçekte mikrofosiller olarak kendini gösterebilir. Canlılığın bir başka morfolojik özelliği de **stromatolitlerdir**. Bunlar makroskopik ölçekte gözlemlenebilen özelliklerdir ve günümüz Dünyasında bazı yerlerde bulunurlar. Örneğin Avustralya'daki Shark Bay stromatolitleri, mikroplar ile fiziksel ve kimyasal çevre arasındaki etkileşimden kaynaklanır (Şekil 12.8). Siyanobakteriler, her hücrenin salgıladığı bir **hücre dışı polisakkarit** (EPS; Bölüm 4) filmiyle tortuyu yakalar. Polisakkarit, kalsiyum karbonattan oluşan tortu tanelerini bağlar. Ancak burada bir sorun var, çünkü siyanobakterilerin büyümesi için Güneş ışığına ihtiyacı var ve tortu onu engelleyecektir. Stromatolitleri oluşturan siyanobakterilerin çoğu hareket etme (kayma) yeteneğine sahiptir ve ışığa doğru hareket etme eğiliminde olacaklardır ve böylelikle büyümeleri biriken tortuya ayak uydurur. Shark Bay stromatolitleri bu şekilde büyür.



Şekil 12.8 Avustralya, Shark Bay'de büyüyen günümüz stromatolitleri. Her biri yaklaşık 0,5 m genişliğindedir (Kaynak: Jon Clarke).

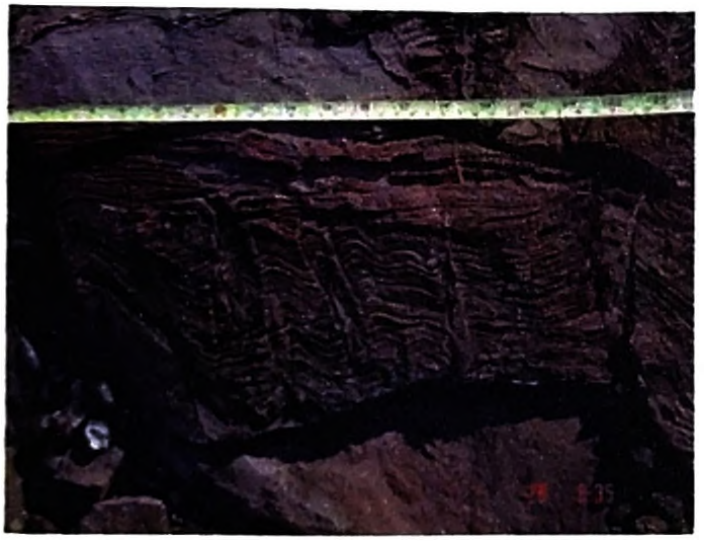
Stromatolitlerin büyüyebilmelerinin bir başka yolu da siyanobakterilerin kendi karbonat çerçevelerini oluşturmalarıdır. Fotosentez, hücre etrafındaki suyu alkali yapma eğilimindedir ve alkali pH, nötr pH'a kıyasla karbonat minerallerinin çökeltilmesi için daha uygundur.

Stromatolitlerin büyümesi çok yavaştır. Shark Bay'de yılda 1 mm'den daha az büyürler. Kubbeli yapılar suyun 30 cm üzerinde büyüyebilir ve bu boyuta gelmesi yüzlerce yıl alabilir. Diğerleri zaman zaman suyla kaplıdır ve her gün gelgit yükselip alçaldıkça büyür. Ancak diğerleri kalıcı olarak su altında kalır ve 3,5 m derinlikte büyür. Bu stromatolitler kaya gibi görünse de, mikroskop altında incelendiğinde yaşamla iç içe oldukları görülebilir.

Bu büyük yapıların tanımlanmasının daha önce tartışılan mikrofosillerden daha kolay olacağı düşünülse de, bunların kaya kayıtlarındaki kalıntıları yine de tartışmalıdır. Bazı erken varsayılan stromatolitler, Nullagine, Pilbara, Avustralya yakınlarındaki Strelley Havuz Formasyonundandır. Varsayılan stromatolitler yaklaşık 3,43 milyar yaşındadır (Şekil 12.9). Güney Afrika'da yaklaşık 3,3 milyar yaşında İncir Ağacı Grubu kayaçlarında da stromatolitler gözlenmektedir.

Avustralya stromatolitleri, 200 µm kalınlığa kadar laminasyonlu dalgalı dokulardan oluşur. Modern stromatolitlere benzer şekilde içlerinde karbonat mineralleri vardır. Konik, sütunlu ve kubbe biçimli yapılar oluştururlar. İncir ağacı stromatolitlerinde kubbeli yapılar da gözlenmektedir. Bununla birlikte, laminasyonlar izopaktır (aynı kalınlıkta), bu da biyofilmlerden ziyade mineral büyümelerini önerebilir.

Bu stromatolitlerle çözülmesi gereken potansiyel bir problem ise, oksijenik fotosentezin olmadığı bir zamanda var olmaları ve dolayısıyla siyanobakteriler tarafından oluşturulmamış olmalarıdır. Bununla birlikte, stromatolit oluşumunda rol oynamış olabilecek oksijensiz fotosentezciler vardır. Günümüz mikrobiyal tabakalarının çoğunda, yüzeyin altında iyi tanımlanmış bantlarda ikamet eden oksijensiz fotosentezciler buluyoruz. Bu tür organizmalar, erken Dünyada mikrobiyal matlar ve stromatolitlerin oluşumunda pekâlâ bir rol oynamış olabilir.



Şekil 12.9 Nullagine, Pilbara, Avustralya yakınlarındaki Strelley Havuz Formasyonundan erken döneme ait olduğu kabul edilen stromatolitler (burada dalgalı kaya dokuları olarak görülüyor) (Kaynak: Jon Clarke).

Tartışma Noktası: Biyoloji olmadan stromatolit yapıları?

Kayadaki katmanlı yapılar biyolojik midir? Bu bölümü ve bir sonraki bölümü okurken, bu soruyu sormayı makul kılabilecek bazı faktörleri düşünmek isteyebilirsiniz. Jeoloji hakkında ayrıntılı bir bilginiz olmasa bile, kaya kayıtlarında nihayetinde korunabilecek katmanlara veya laminasyonlara yol açacağını düşündüğünüz bazı doğal süreçleri listeleyin. Bu bölümün başka bir yerinde öğrendiklerinizi göz önünde bulundurarak, bir stromatolitin biyolojik süreçlerle üretilip üretilmediğini öğrenmek için kullanabileceğiniz yöntemlerden bazılarını tanımlayın. Size katmanlı bir kaya örneği verilseydi ve istediğiniz herhangi bir türde analitik ekipmanı satın almak için açık uçlu bir bütçe verildiyse, örneğin hiç yaşam içerip içermediğini öğrenmek için kullanılabilecek, gerçekleştireceğiniz bir dizi deneyi tanımlayın.

Grotzinger, J., Rothman, D.H. (1996) An abiotic model for stromatolite morphogenesis. Nature, 382, 423–425.

12.8 Biyobelirteçler

Bazı mikroorganizmalar, biyolojiye ve hatta belirli metabolizmalara oldukça özgü bileşikler üretir. Örneğin hopanoidler, hücre zarlarının katılaşmasında rol oynadığı düşünülen lipid bileşikleridir. Parçalandıklarında, bozulmuş karbon yapısını katı bir halde bırakırlar. Bir bileşik sınıfı, 2α metil-hopanlar, siyanobakterilerle ilişkilidir ve Batı Avustralya'daki Hamersley Grubu kayalarındaki 2,6–2,5 milyar yaşında şeyllerde ve demir oluşumlarında bulunmuştur.

Biyobelirteçler, belirli metabolizmaların tanımlanmasına izin verdiklerinden mükemmel bir potansiyel sunar. Zayıf yönlerinden biri, metamorfizm sırasında karşılaşılan yüksek sıcaklıklar (yaklaşık 300 °C'den yüksek) tarafından tahrip edilmeye olan eğilimleridir. Ek olarak, biyobelirteçlerin daha sonraki jeolojik sıvılar tarafından harekete geçirilme ve kayalara karışma potansiyeli, yaşlarının ve kökenlerinin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiği anlamına gelir. Yeni keşifler, çeşitli hopanoidlerin daha önce inanıldığından çok daha geniş bir organizma çeşitliliği tarafından üretildiğini gösteriyor, bu nedenle bazıları başlangıçta öngörüldüğü kadar spesifik olmayabilir. Ayrıca, en eski Arkeyan kayalarında ikna edici bir şekilde tespit edilmeleri zor olmuştur.

Bu bölümde antik yaşamı tanımlamak için tartışılan tüm bu yöntemlerin birbirini karşılıklı olarak güçlendirdiği kabul edilmelidir. Biyobelirteçler, izotopik ve fosil kanıtlarla birlikte, antik kayalarda yaşamın varlığını doğrulamaya çalışmak için başka bir yol sunar.

12.9 Dünya Dışı Yaşam Arayışı

Dünyada erken yaşam arayışı, yalnızca Dünyada yaşamın ortaya çıkışı hakkında bilgi vermekle kalmaz, aynı zamanda bize başka yerlerde yaşam aramak için kullanılacak yöntemleri geliştirirken bir temel sağlar. Dünya dışı yaşam arayışındaki bazı zorluklar bu bölümde açıkça görülmektedir. Karma-

şık laboratuvarlara ve analitik yöntemlere erişimimiz olsa bile, yaşam için morfolojik ve izotopik kanıtlar hakkında çok fazla tartışma var. Bu nedenle, Mars gibi yerlerden dönen veya robotlar kullanılarak yerinde analiz edilen küçük örneklere bu yöntemleri uygulamanın zorluğu hakkında bir fikir edinebilirsiniz. Bununla birlikte, korunmuş mikroskobik yaşamın kanıtlarını değerlendirmek amacıyla sağlam kriterler geliştirmek için özellikle değerli bir dizi ders öğrenilmelidir. Fosil yaşam kriterlerini, özellikle yaşam için güçlü kanıtlara sahip olanlar olmak üzere, karasal örnekler üzerinde test ederek, başka bir yerde varsayılan fosil yaşamının biyojenitesini test etmek için bir süreç geliştiriyoruz.

12.10 Sonuç

Erken yaşam için bazı olası metabolizmaları araştırdık. Birçok kemoototrofun derin dallanma doğası, bu metabolizmanın erken kurulduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, fermantasyonlar ve oksijensiz solunum, özellikle kemoototroflardan ve fototroflardan türetilen organikler olmak üzere, iç kaynaklı organikler kullanılarak erken dönemde geliştirilebilirdi.

Yaşamı aramak için kullanılan yöntemler genel olarak bazı temel kategorilere ayrılır: morfolojik, izotopik ve biyobelirteç kanıtı. Hepsinin zorlukları vardır, en azından abiyotik süreçler tarafından üretilen belirteçlerin kafa karıştırıcı etkileri. Bununla birlikte, bilim insanlarının Dünyadaki erken yaşamın varsayılan kanıtlarını incelemelerine ve dolayısıyla yaşam belirtileri için erken kayaçları incelemek için sağlam çerçeveler geliştirmelerine olanak tanıyan değerlendirme kriterleri geliştirmek mümkündür. Aynı yöntemler, Mars gibi yerlerde yaşam aramak için de kullanılacaktır.

İleri Okumalar

Kitaplar

Brasier, M. (2013) *Secret Chambers: The Inside Story of Cells and Complex Life.* Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford.

Knoll, A.A. (2004) *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth.* Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton.

Schopf, J.W. (1999) *The Cradle of Life.* Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton.

Wacey, D. (2009) *Early Life on Earth: A Practical Guide.* Springer, New York.

Yayınlar

Allwood, A.C., Walter, M.R., Kamber, B.S., Marshall, C.P., Burch, I.W. (2006) Stromatolite reef from the early Archean era of Australia. *Nature* 441, 714–718.

Brasier, M.D., Green, R., McLoughlin, N. (2004) Characterization and critical testing of potential microfossils from the early Earth: The Apex 'microfossil debate' and its lessons for Mars sample return. *International Journal of Astrobiology* 3, 139–150.

Brasier, M.D., Green, O.R., Jephcoat, A.P., Kleppe, A.K., Van Kranendonk, M.J., Lindsay, J.F., Steele, A., Grassineau, N.V. (2002) Questioning the evidence for Earth's oldest fossils. *Nature* 416, 76–81.

Buick, R. (2008) When did oxygenic photosynthesis evolve?. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 2731–2743.

Crewe, S.A., Paris, G., Katsev, S., Jones, C., Kim, S.-T., Zerkle, A., Nomosatryo, S., Fowle, D.A., Adkins, J.F., Sessions, A.L., Farquhar, J., Canfield, D.E. (2014) Sulfate was a trace constituent of Archean seawater. *Science* 346, 735–739.

Garcia-Ruiz, J.M., Hyde, S.T., Carnerup, A.M., Christy, A.G., Van Kranendonk, M.J., Welham, N.J. (2003) Self-assembled silica-carbonate structures and detection of ancient microfossils. *Science* 302, 1194–1197.

House, C.H., Schopf, J.W., McKeegan, K.D., Coath, C.D., Harrison, T.M., Stetter, K.O. (2000) Carbon isotope composition of individual Precambrian microfossils. *Geology* 28, 707–710.

Knoll, A.H., Javaux, E.J., Hewitt, D., Cohen, P. (2006) Eukaryotic organisms in Proterozoic oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society* B 361, 1023–1038.

McLoughlin, N., Brasier, M.D., Perry, R.S., Wacey, D., Green, O.R. (2007) On biogenicity criteria for endolithic microborings on Early Earth and beyond. *Astrobiology* 7, 10–26.

Noffke, N., Eriksson, K.A., Hazen, R.M., Simpson, E.L. (2006) A new window into Early Archean life: Microbial mats in Earth's oldest siliciclastic tidal deposits (3.2Ga Moodies Group, South Africa). *Geology* 34, 253–256.

Orange, F., Disnar, J.R., Gautret, P., Westall, F., Bienvenu, N., Lottier, N., Prieur, D. (2012) Preservation and evolution of organic matter during experimental fossilisation of the hyperthermophilic archaea *Methanocaldococcus jannaschii*. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 42, 587–609.

Rasmussen, B. (2000) Filamentous microfossils in a 3,235-million-year-old volcanogenic massive sulphide deposit. *Nature* 405, 676–679.

Schopf, J.W. (1993) Microfossils of the Early Archean Apex Chert: new evidence of the antiquity of life. *Science* 260, 640–646.

Schopf, J.W., Kudryavtsev, A.B., Agresti, D.G., Wdowiak, T.J., Czaja, A.D. (2002) Laser-Raman imagery of Earth's earliest fossils. *Nature* 416, 73–76.

Shen, Y., Buick, R., Canfield, D.E. (2001) Isotopic evidence for microbial sulphate reduction in the early Archaean era. *Nature* 410, 77–81.

Westall, F., Cavalazzi, B., Lemelle, L., Marrocchi, Y., Rouzaud, J.-N., Simionovici, A., Salomé, M., Mostefaoui, S., Andreazza, C., Foucher, F., Toporski, J., Jauss, A., Thiel, V., Southam, G., MacLean, L., Wirick, S., Hofmann, A. I., Meibom, A., Robert, F., Défarge, C. (2011) Implications of in situ calcification for photosynthesis in a 3.3 Ga-old microbial biofilm from the Barberton greenstone belt, South Africa. Earth and Planetary *Science Letters* 310, 468–479.

13

YERYÜZÜNÜN TARİHİ

Öğrenme Çıktıları

- Yeryüzünün temel iç yapısını bilmek.
- Levha tektoniğini ve yaşam için bazı sonuçlarını anlamak.
- Kayaç döngüsünü tanımlamak.
- Kayaçların göreceli ve mutlak yaş tarihlemelerinin nasıl yapıldığını açıklamak ve anlamak.
- Materyallerin yaşını hesaplamak ve izokron tarihleme ilkesini anlamak için temel radyometrik tarihleme ilkelerini kullanabilmek.
- Jeolojik zaman kavramını ve nasıl bölündüğünü anlamak.
- Belirli jeolojik zaman dilimlerinin bazı temel biyolojik özelliklerini açıklamak.

13.1 Yeryüzünün Jeolojik Tarihi

Dünyanın oluşum sürecini, erken Dünyadaki koşulları öğrendikten ve erken yaşam için bazı kanıtları araştırdıktan sonra, şimdi bir adım geriye giderek ve yeryüzünün tüm tarihine bakıp bunu daha geniş bir jeolojik bağlama oturtabiliriz. Jeolojik zamanı nasıl ölçer ve inceleriz? Bu bölüm, Dünyanın jeolojik tarihini ve astrobiyologların büyük biyolojik olayların ne zaman meydana geldiğini anlamak için kullandıkları bazı yöntemleri inceleyecektir. Bu bölümde ayrıntılı olarak ele alınan ilkeler ve gözlemler, üzerinde yerleşim olduğunu bildiğimiz tek gezegen olan Dünyayı anlamamızı sağlar. Bu bilgiler, diğer gezegenimsilerin incelenmesine doğrudan uygulanabilirler.

13.2 Mineraller ve Camlar

Dünyanın tarihine ve bileşimine olan yolculuğumuza başlamadan önce, mineraller hakkında bir şeyler öğrenmeliyiz. İster Dünyanın, Mars'ın, Jüpiter'in uydusu Europa'nın çekirdeğinin bileşimiyle ister uzak bir ötegezegenin bileşimiyle ilgilenin, minerallerle karşılaşacaksınız. Mineraller genellikle düzenli bir atomik yapıya sahip olan ve stokiyometrik bir kimyasal formülle tanımlanabilen inorganik maddelerdir.

Bölüm 3'te gördüğümüz gibi silikon, çok kararlı silikatlar oluşturmak üzere oksijene bağlanma alışkanlığına sahip olduğundan, biyolojik moleküller oluşturmak için zayıf bir elementtir. Bununla birlikte bunlar, gezegenimsilerin meydana geldiği materyallerdir ve çeşitlilikleri dikkate değer bir katı materyal dizisine izin verecek kadar büyüktür.

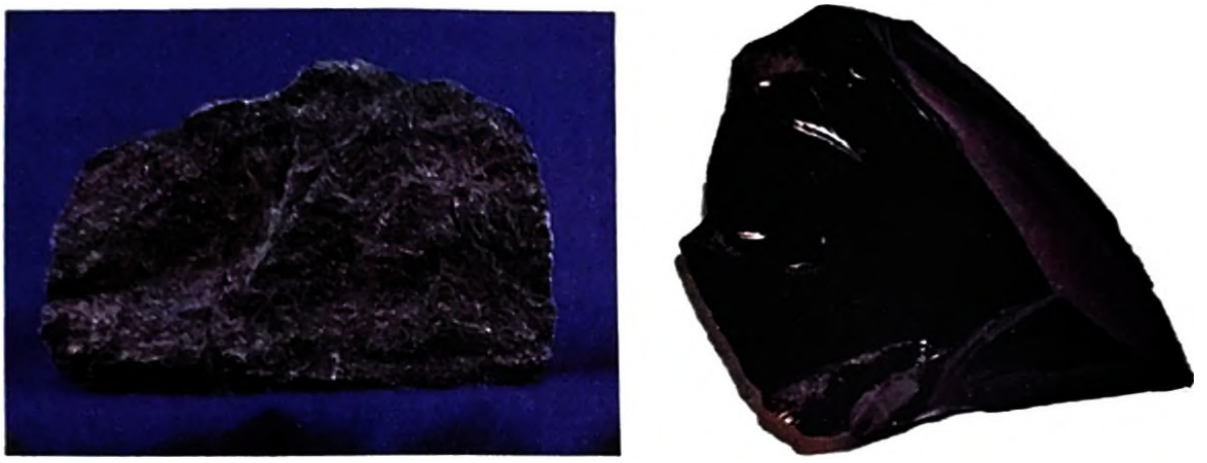
Tetrahedron (SiO_4), silikon ve oksijen arasındaki uygun bir bağlanma konfigürasyonudur. Bu yapıya sahip olduğumuzda, onu oyuncak bloklar gibi çok çeşitli konfigürasyonlarda bir araya getirebiliriz. Bu aşamada, silikon bileşiklerinin kimyası hakkında daha geniş bir tartışma kapsamında bazı silikat minerallerinin yapısını görebileceğiniz Bölüm 3'teki Şekil 3.15'e başvurmalısınız. Minerallerdeki silisyum sıralamasındaki küçük değişikliklerin, minerallerin yapıları ve türleri üzerinde ne kadar çarpıcı sonuçlar doğurduğunu görebilirsiniz.

Silika tetrahedrayı izole bir şekilde tutabiliriz. Bu durumda, negatif yüklü oksijen atomları, izole edilmiş tetrahedrayı çapraz bağlayan metal katyonlarına bağlanma eğiliminde olacaktır. Bu mineral sınıfına ada silikatları veya nezosilikatlar denir. Bu sınıfın bir örneği olan olivinlerde tetrahedralar Mg^{+2} veya Fe^{+2} iyonlarıyla çapraz bağlıdır. Mg^{+2} ve Fe^{+2} kabaca aynı yarıçaplara ve aynı yüke sahiptir, bu nedenle silika tetrahedraya bağlanmada değiştirilebilir olma eğilimindedirler. Sonuç olarak, forsteritten (Mg_2SiO_4) fayalite (Fe_2SiO_4) kadar bir olivin serisi ve mineralin oluştuğu eriyikte ne kadar Mg^{+2} veya Fe^{+2} olduğuna bağlı olarak çeşitli bileşimler elde ederiz.

Dörtyüzlüleri tek bir zincir halinde dizersek, piroksenler adı verilen mineral sınıfını elde ederiz. Bir adım daha ileri gidebilir ve bu zincirleri birbirine bağlayarak çift zincirli silikatlar oluşturabiliriz. Bunlar amfibollerdir. Daha da ileri giderek büyük iki boyutlu silika tetrahedra tabakaları oluşturmak için zincirleri birbirine bağlarsak, kil ve mikalar gibi tabaka silikatları veya fillosilikatları oluştururuz. Yine başka bir konfigürasyon, bu tetrahedralardan üç boyutlu yapılar oluşturmaktır. Bunlar, minerallerin feldspat ve kuvars grupları dâhil olmak üzere, çatkılı silikatlar veya tektosilikatlara yol açar. Silikat minerallerini, silikanın iki ve üç boyutlu konfigürasyonlarından oluşan bir seri olarak düşünebilirsiniz.

Bu temel yapılardaki mineral çeşitliliği, olivin örneğinde olduğu gibi, farklı türde mineraller üreten yapılarda oluşan boşluklara yerleşen Mg^{+2}, Fe^{+2}, Ca^{+2}, K^{+} gibi çok çeşitli katyonların yapıya eklenmesiyle açıklanmaktadır. Çatkılı silikatlarda, silisyum atomları, farklı oranlarda alüminyum atomlarıyla yer değiştirebilir, bu da feldspatlarda bulunan çeşitli kimyasal bileşimler gibi farklı minerallerin oluşumuna yol açar.

Mineraller silikatlarla sınırlı değildir. Karbonatlar (örneğin kireçtaşı; $CaCO_3$) ve sülfürler (örneğin ahmak altını veya pirit, FeS_2) gibi çok çeşitli silikat olmayan mineraller vardır ve bunlar, Dünya sistemi süreçlerinde ve, karbonatlar söz konusu olduğunda, yaşam için geçmiş kanıtların korunmasında önemli bir rol oynarlar.



(a) (b)

Şekil 13.1 (a) Bazalt, mineral içeren bir kayaç örneği. (b) Obsidiyen, silika açısından zengin bir volkanik cam.

Tüm bu mineraller bir araya gelerek kayaçları oluşturur. Bir **kayaç**, yalnızca katı bir gezegensel materyal yığınını tanımlar ve başlı başına minerallerden oluşabilir. Olivin, piroksen ve feldspat içeren bazalt, bir kayaç örneğidir (Şekil 13.1).

Bir kayacın mineral içermesi gerekmez. Materyal hızlı bir şekilde söndürüldüyse, örneğin suya püsküren lavlar, ve bu nedenle belirli minerallerin kristallerinin oluşmaya zamanı olmadıysa, homojen bir malzeme veya bir **cam** olabilir. Camda silika ve katyonlar malzeme boyunca eşit olarak dağılır, ancak düzenli veya kristal olmayan bir yapıdadır. Obsidiyen, cama iyi bir örnektir (Şekil 13.1); cam kırılarak çok keskin kenarlar oluşturabileceğinden, obsidyen, eski insanlar tarafından kesici aletler yapmak için kullanılan silika açısından zengin bir volkanik camdır.

Tesis Odağı: Kayaçları ve gezegen materyallerini incelemek

Kayaların bileşimini çok çeşitli yöntemlerle inceleyebiliriz. Çok güçlü bir yaklaşım, senkrotron radyasyonu kullanmaktır (Şekil 13.2). Bir senkrotron, bir parçacık ışınının manyetik alanlar tarafından dairesel bir rotaya doğru hızlandırıldığı ve yönlendirildiği, nispeten küçük uzaysal alanlarda yüksek enerjili ışınların geliştirilmesine izin veren bir parçacık hızlandırıcı türüdür. Elektronlar gibi parçacıklar, manyetik alanlarda hızla dolaştırıldıklarında, tüm elektromanyetik spektrum boyunca radyasyon yayarlar. Bu radyasyonun bir kısmını ana halkadan (veya genellikle adlandırıldığı gibi depolama halkasından) uzaklaştırarak, halkanın dışındaki alanlara kanalize edilebilir ve deneyler yapmak için kullanılabilir. Sinkrotron radyasyonu, yerbilimlerinde kayalar ve mineraller içindeki metal iyonlarının yapısını ve yönünü araştırmak, gezegenlerin içindeki yoğun sıcaklık ve basınç altındaki malzemeleri araştırmak, mikropların kaya yapıları üzerindeki etkisini incelemek, metaller de dâhil olmak üzere çok küçük elementleri haritalamak için kullanılabilir. Buna örnek olarak Ay kayalarında veya meteorlarda



Şekil 13.2 Oxford'daki (İngiltere) Diamond Synchrotron Source, X-ışınlarından kızıl-altına bir dağılımla radyasyon ışınları üretir. Tesis, 561,6 m'lik bir çevre depolama halkasında tutulan ve daha sonra, materyalleri incelemek için verilen dalga boylarının kullanılabileceği deneysel 'barakalara' beslenen 3,0 GeV'lik elektronlar üretir. Örneğin, X-ışınları, bakteriler tarafından üretilen minerallerdeki vya da Ay veya Dünyadan gelen eski kayaçlardaki metallerin oksidasyon durumunu ve yapısını incelemek için kullanılır.

numuneler içinde ölçekler ve diğer uygulamaların yanı sıra fosillerdeki karbon dağılımını incelemek verilebilir. Bilinen bir dalga boyuna sahip odaklanmış bir radyasyon demetinin maddenin yapısını araştırmak için kullanılabileceği bir dizi uygulamada kullanım alanı bulur. Özellikle, bu tür tesisler astrobiyologlar için faydalıdır, çünkü numune miktarları genellikle çok küçük olduğunda, numune iade görevlerinde diğer gezegen cisimlerinden dönen materyalleri incelemek için kullanılabilirler.

13.3 Kayaç Türleri

Mineraller veya camlar, geniş ölçüde farklı kayaç türleri oluşturmak için bir araya gelirler. Aşağıda açıklanan üç ana kaya türünü tanıyoruz.

13.3.1 Magmatik Kayaçlar

Magmanın soğuması ve katılaşması sonucu **magmatik** kayaçlar oluşur. Kayaçlar, Dünya yüzeyinin altında oluşabilir, bu durumda onlara **sokulum** kayaçlar (veya plütonik kayaçlar) adını veririz. Yüzeyde oluşmuşlarsa **püskürük** kayaçlar (veya volkanik kayaçlar) olarak adlandırılırlar.

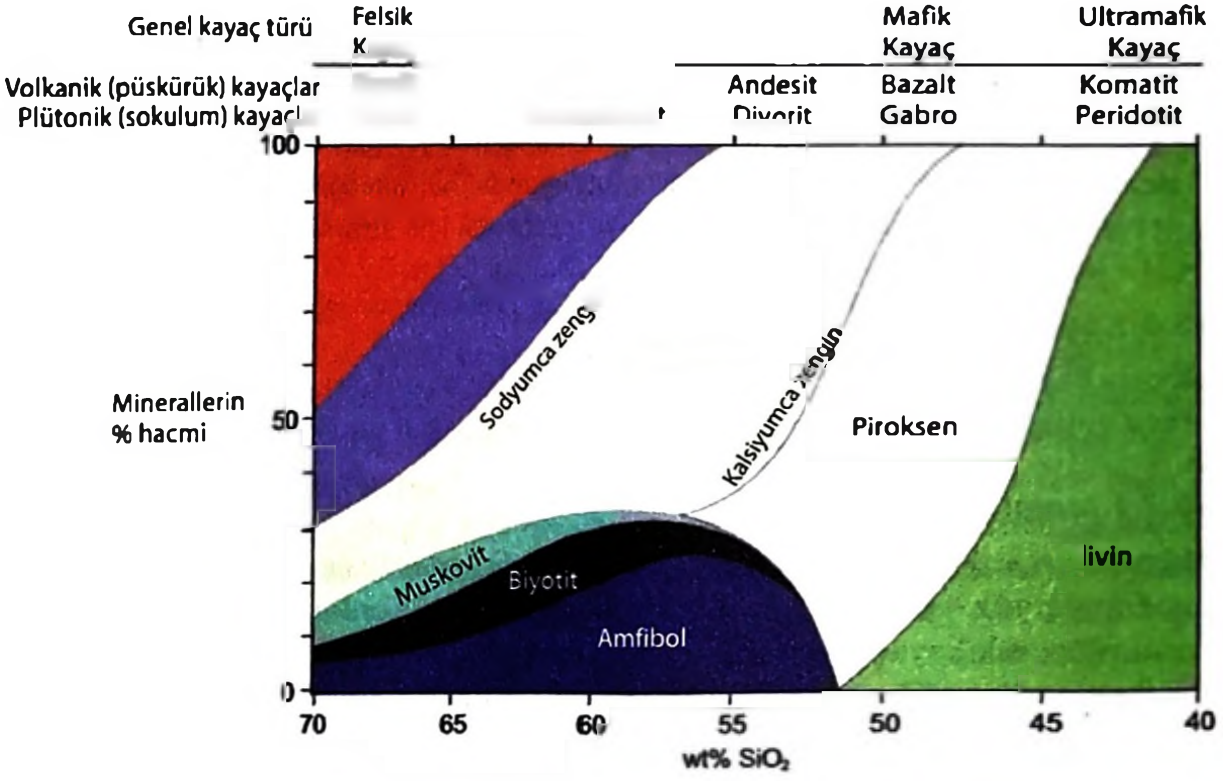
Magma içinde, farklı mineraller farklı erime noktalarına sahip olduklarından, farklı sıcaklıklarda kristalleşmeye eğilimli olacaklardır, bu süreç **fraksiyonel kristalleşme** olarak adlandırılır. Oluşan minerallerin tam sırası ve türü (ve dolayısıyla kayaç türü) karmaşıktır ve değişen magma kimyasına bağlıdır.

Bu mineral kristalizasyon dizisi, mineral oluşumu üzerinde deneyler yapan bir petrololog olan Norman Bowen'a (1887–1956) ithafen Bowen reaksiyon serisi olarak adlandırılır. Tersine, magmatik bir kayaçı ısıtırken, farklı mineraller farklı sıcaklıklarda erir ve kısmi erimeye yol açar.

Bilinen 700'den fazla magmatik kayaç türü vardır, hepsi farklı sıcaklık ve koşullarda oluşur, bu nedenle magmatik kayaç türü, oluştuğu magma ve Dünyanın derinliklerindeki koşullar hakkında bilgi verir. Bazalt ve bazaltik cam gibi bazı magmatik kayaçlar, derin okyanuslarda ve karada yaşam için besin açısından zengin yaşam alanları sağlar.

Yavaş soğuyan kayaçlar, özellikle sokulum kayaç türleri, büyük kristaller oluşturmak için bol zamana sahip olma eğilimindedir ve bu nedenle granit gibi iri tanelidirler. Bazalt gibi yüzeye püsküren püskürük kayaçlar, çok daha hızlı soğudukları için ince taneli hale gelme eğilimindedir. Bazalt camı, lavların okyanuslara püskürdüğü veya lavların buzulların içine ve altına püskürdüğü İzlanda gibi yerlerde farklı plaka sınırlarında volkanik kayaçların püskürmesinin yaygın bir ürünüdür.

Magmatik kayaçlar ayrıca tungsten ve uranyum gibi elementler için önemli cevher kaynakları olarak ekonomik açıdan önemli hale gelir. Bunlar, mineral kimyasal yapısına dâhil edilecek uygun olmayan bir yüke veya iyonik boyuta sahip olan uyumsuz elementlerin örnekleridir. Mineral kristallerinden dış-



Şekil 13.3 Farklı mineral içeriklerine göre farklı tipteki magmatik kayaçların sınıflandırılmasına bir örnek. Minerallerin içeriği, toplam silika yüzdesiyle (x ekseni) ilişkilidir.

lanırlar ve kaya katılaşmasının geç bir aşamasında damarlarda cevher olarak konsantre hale gelirler.

Magmatik kayaçları silika içeriğine göre sistematik olarak karakterize edebiliriz. Çok yüksek silika içeren kayaçlara felsik denir ve obsidiyen (Şekil 13.1) gibi volkanik bir cam ve onun kristal karşılığı olan riyolit içerir. Ara kayaçlardan geçerken bazalt gibi volkanik kayaçlar olan ve silika içeriği %45–52 olan mafik kayaçlara ulaşıyoruz. Ultramafik kayaçlar, mantoyu oluşturan peridotit içerir ve silika içeriği %45'ten azdır (Şekil 13.3).

13.3.2 Tortul Kayaçlar

Tortul kayaçlar, rüzgâr, yağmur ve buzulların etkisiyle su altı kütleleri gibi Dünya yüzeyinde malzemenin birikmesinden oluşan kayaçlardır. Tortul kayaçlar, inşaat mühendisliği kararlarını ve binaların bütünlüğünü etkilediği için insan faaliyetleri için son derece önemli olsa da, kabuktaki kayaçların sadece %8'ini oluştururlar, geri kalanı ise magmatik ve başkalaşım kayaçlardır. Tortul kayaçların iyi örnekleri, tebeşir (kalsiyum karbonat) ve çamurtaşları (en az %50 silt veya kil boyutundaki parçacıklardan oluşmuştur) ve fillosilikatların bir türü olan ve kayaçların değişmiş ayrışma ürünleri olan killerdir.

Tortul kayaçlar genel olarak birkaç türe ayrılabilir. Kırıntılı tortul kayaçlar, nehirler veya akarsular gibi hareketli su kütlelerinde oluşan ve genellikle kil ve kaya parçaları içeren kayaçlardır. Biyokimyasal tortul kayaçlar, biyolojik materyalden (ölü bitki maddesinden oluşan kömür gibi) oluşanlardır. Kimyasal tortul kayaçlar, kimyasal reaksiyonlardan oluşan kayaçlardır, örneğin, aşırı doymuş bir silika çözeltisinde silisin çözeltiden çökeltilmesinden oluşan çörtler.

Tortul kayaçlar, astrobiyologlar için büyük önem taşır, çünkü kayaçların yaşı ve özellikle biriktikleri ortamlar hakkında bilgi veren tabakalar oluştururlar. Tortular organik materyal ve ölü organizmalar biriktirme eğiliminde olduğundan, dinozor kemikleri gibi makroskopik özelliklerden mikrobiyal mikrofosillere kadar geçmiş zamanların biyolojik kanıtlarını sıklıkla korurlar.

Astrobiyologlar, tortul kayaçların basınçlandırma ve ısıtma gibi süreçlerden zamanla nasıl değiştiğini açıklayan diyagenez süreciyle özellikle ilgilenirler. Diyagenez, yaşamın belirteçlerinin korunup korunamayacağını belirleyecek ve başlangıçta var oldukları düşünülürse, yaşam belirteçlerinin neden kaybolduğuna dair fikir verebilir.

13.3.3 Başkalaşım Kayaçlar

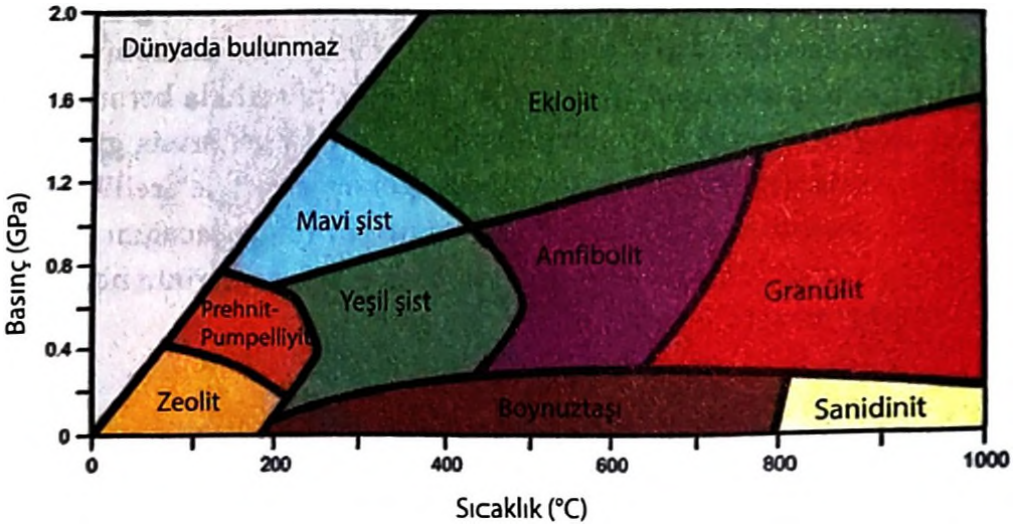
Başkalaşım kayaçlar, yüksek sıcaklıklara ısıtıldıklarında ve yaklaşık 1000 bar'ı (100 MPa) aşan değerlere basınç uygulandığında oluşurlar. Bu süreç, kayaçların gömüldüğü herhangi bir zamanda meydana gelebilir, ancak özellikle levha sınırlarında, örneğin batmanın kayaçları yoğun sıcaklıklara ve levha sınırlarının altındaki basınçlara maruz bıraktığı yakınsak sınırlarda yaygındır. Ka-

yaçlarda meydana gelen bu büyük ölçekli değişiklikler, sıcak magmayla temas sırasında olduğu gibi bazı yerel süreçlerde kayaçlar değiştiğinde, temas (veya termal) başkalaşımın aksine bölgesel başkalaşım olarak adlandırılır.

Tüm kayaç mineralleri aynı sıcaklıkta hâl değiştirmez. Örneğin, olivinler ve kuvars, yüksek sıcaklıklara karşı oldukça kararlıdır, öyle ki başkalaşım kayaçlarda bulunan mineral toplulukları, maruz kaldıkları sıcaklık ve basınç koşulları hakkında bilgi edinmek için kullanılabilir. Farklı başkalaşım kayaç türleri ve ilişkili oldukları sıcaklık ve basınç koşulları Şekil 13.4'te gösterilmektedir. Kayaçlar genellikle farklı minerallerin karmaşık bir topluluğudur, örneğin yeşil şist, serpantin gibi yeşil renkli mineraller içerdiği için bu şekilde adlandırılmıştır. Belirli sıcaklık ve basınçları gruplandıran farklı başkalaşım koşulu türleri, **fasiyes** olarak adlandırılır.

Kayaçlar yeniden kristalleşip deforme olurken, genellikle yapraklanma olarak bilinen çok çarpıcı bantlı desenler oluştururlar. Diğer kayaçlarda, yüksek sıcaklıklar, minerallerin tamamen başka elementler ve bileşiklerle değiştirilebileceği kimyasal reaksiyonlara neden olur. **Metasomatizma** süreci, hidrotermal veya karbonlu sıvılar tarafından kimyasal değişimdir. Metasomatizma, kaya–eriyik etkileşimiyle de meydana gelebilir.

Başkalaşımın astrobiyologlar için büyük bir önemi vardır, çünkü yeniden kristalleşme, deformasyon ve metasomatizma, kayaçlardaki organiklerin ve biyolojik belirteçlerin korunması üzerinde genellikle zararlı bir etkiye sahiptir. Genelde onları yok eder veya tespit edilmesini zorlaştırır ve potansiyel olarak kirliliğe neden olur. Bu sorunlar Bölüm 12'de tartışıldı.



***Şekil 13.4** Farklı başkalaşım kayaç türlerinin isimlerini, oluştukları basıncı (giga-Pascal, GPa olarak verilir) ve sıcaklık değerlerini gösteren şekil. Burada netlik için siyah çizgilerle gösterilmesine rağmen, kayaç türleri arasındaki ayrım kademelidir.*

13.4 Kayaç Döngüsü

Farklı kayaç türlerinin üçü de yer değiştirebilir. Bu değişiklikleri özetlemenin en iyi yolu, Dünyada üretilen farklı kaya türlerini ve bunların Dünya sistemindeki kaderini tanımlayan bir kayaç döngüsünü tanımaktır. Kayaç döngüsü, kayaların kökenine, yıkımına, değişimine ve yeniden oluşumuna yol açan olayların resimli bir temsilidir (Şekil 13.5).

Kayaç döngüsü, bu kayaç ailelerinin nasıl birbiriyle ilişkili olduğunu ve birbirlerinden nasıl türetilebileceğini gösterir. Bu yollardan sadece birkaçını takip edebiliriz. Örneğin, püskürük magmatik kayaçlar, bir kez katılaştıktan sonra, konumlarına bağlı olarak rüzgâr ve su erozyonuna maruz kalabilirler. Üretilen materyal, sonunda tortul kayaçlara katkıda bulunmak için nehirlere ve diğer su kütlelerine taşınacaktır. Tortul kayaç sonunda gömülecek, daha sonra başkalaşım kayaça dönüşecek ve yeterince derine gömülürse, eriyerek magmaya en sonunda da magmatik kayaca dönüşebilir. Başkalaşım kayaçlar da, yeryüzünde maruz kaldıkları koşulların etkisiyle, tortul kayaçların üretimine katkıda bulunmak için su ve rüzgâr tarafından aşınır ve elbette tortul kayaçlar, yeni tortul kayaçlara katkıda bulunmak için rüzgâr ve yağmur tarafından parçalanabilir. Bu son derece birbirine bağlı döngü, Dünya ilk oluştuğundan beri devam ediyor. Bölüm 10'da gördüğümüz gibi, 3,8 milyar yıl öncesine ait kayaç kayıtlarındaki tortul kayaçların kanıtı, üç ana kayaç türünün tümüyle birlikte kayaç döngüsünün Hadean ve Arkeyan Dünyası üzerinde iyi kurulmuş olduğunu göstermektedir. Mars'ın sulu tarihinin tartışıldığı Bölüm 17'deki kayaç döngüsünü yeniden düşünmek isteyebilirsiniz.



Şekil 13.5 Kayaç türlerinin izlediği farklı yolları ve değişen kaderlerini gösteren kayaç döngüsü (Kaynak: Charles Cockell).

Tartışma Noktası: İnsan kaynaklı (Antropik) kayaçlar

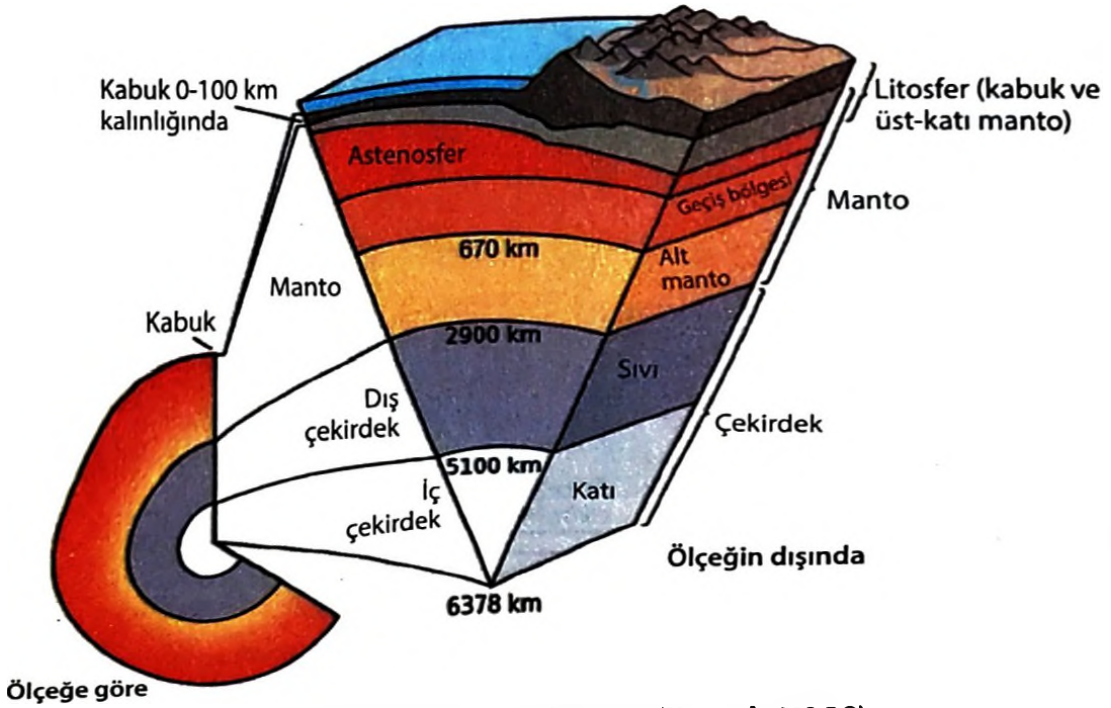
İlgi çekici bir makalede jeolog James Underwood, jeologların Antropik Kayaç adı verilen yeni bir kayaç sınıfını tanıtmaları gerektiğini öne sürdü. Beton ve hatta sentetik bazalt da dâhil olmak üzere insanlar tarafından yapılan büyük miktarda sentetik kayaçı kabul eden Underwood, Antropik Kayaçların bu antropojenik kayaç çeşitliliğini sınıflandırmak için kullanılabileceğini önerdi. Bu kayaçlar, diğerleri gibi, sonunda havalanır ve yeni tortul kayaçlara katkıda bulunur ve yeterli zaman verilirse, sonunda batacaktır. Bu nedenle kaya döngüsünün bir parçasıdırlar. Bu konuda ne düşünüyorsunuz? Bu tür kayaçlar yeni bir kategoriyi hak ediyor mu ve mevcut kayaç kategorileriyle ne gibi benzerlikler ve farklılıklar taşıdıklarını düşünüyorsunuz?

Stone, E.C. (1998) From shifting silt to solid stone: the manufacture of synthetic basalt in ancient Mesopotamia. *Science* **280**, 2091–2093.

Underwood, J.R. (2001) Anthropic rocks as a fourth basic class. *Environmental and Engineering Geoscience* **7**:104–110.

13.5 Yeryüzünün Bileşimi

Dünya bir kez oluşup farklılaştıktan sonra, bugün gözlemlediğimize benzer bir iç yapı gelişti (Şekil 13.6). Dünyanın iç yapısıyla ilgili elimizde olan resim çeşitli kaynaklardan geliyor. Termodinamik modelleme, belirli jeolojik materyallerin büyük ölçeklerde nasıl davranmasını bekleyeceğimiz konusunda bize fikir verebilir. Sismik tomografi, hızları ve sapmaları içinden geçtikleri materyalin yoğunluğuna, bileşimine ve akış özelliklerine bağlı olan, Dünyanın içinden geçen sismik dalgaları doğrudan ölçmemizi sağlar. Dünyanın nasıl döndüğüne ve dö-



Şekil 13.6 Yeryüzünün iç yapısı (Kaynak: USGS).

nüşünü açıklamak için hangi kütle dağılımının gerekli olduğuna odaklanan Dünyanın eylemsizlik momenti çalışmaları, bize Dünya içindeki yoğunluğun dağılımı hakkında bilgi verir. Dünya yüzeyinde açığa çıkan ve iç kısımdan püsküren kayaçların jeolojik çalışmaları ise, bize kabuk hakkında çok fazla bilgi vermektedir.

Dünyanın merkezi, manyetik alanı oluşturmaktan sorumlu sıvı (dış) bir çekirdekle çevrili katı (iç) bir çekirdekten yapılmıştır. Çekirdek, yaklaşık %85–90 demir ve nikelden, geri kalanı ise bilinmeyen bir uçucu madde karışımından (H, C, N, O, S veya Si) oluşur. Bu diğer elementler, çekirdeğin ikili katı/sıvı özelliklerini hesaba katmak için gereklidir. Katı çekirdeğin sıcaklığının yaklaşık 5400 °C olduğu tahmin edilmektedir. Çekirdek, Dünya kütlesinin yaklaşık üçte birini oluşturur, ancak hacim gezegenin sadece %16'sıdır.

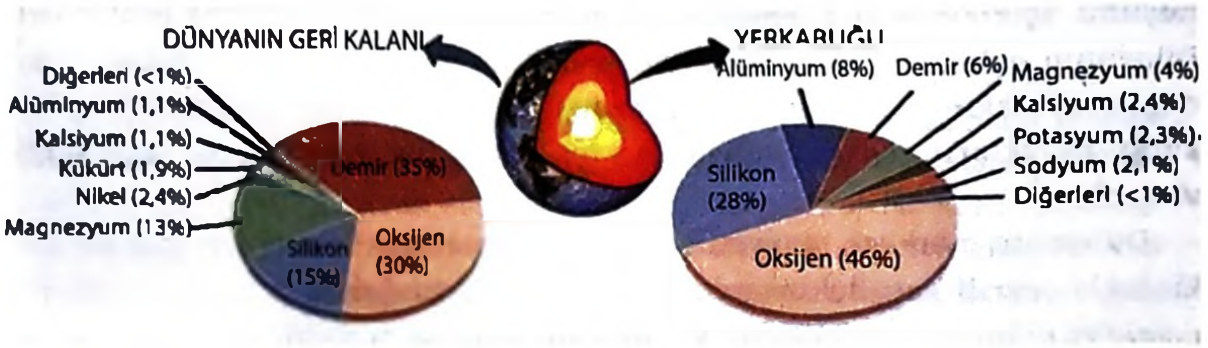
Çekirdeğin üstünde manto bulunur. Çekirdek–manto sınırı 2900 km derinliktedir. Manto, aralarında yaklaşık 250 km'lik bir geçiş bölgesiyle üst ve alt mantoya bölünmüştür. Üst manto esas olarak, çoğunlukla olivin ve piroksen minerallerinden oluşan yoğun, iri taneli magmatik bir kayaç olan **peridotitten** meydana gelmektedir. Yaklaşık 400 ila 650 km derinlik arasında, olivin kararlı değildir ve yüksek basınç fazlarına (wadsleyit ve ringwoodit mineralleri gibi) geçiş yapar. 650 km derinliğin altında minerallere, bir dizi yüksek basınçlı kalsiyum ve magnezyum demir silikat olan silikat perovskitler hakimdir. Manto sıcaklığı, kabuk ile arayüz arasında yaklaşık 600 ila 900 °C, çekirdek ile arayüz arasındaysa yaklaşık 4000 °C değişir.

Mantonun üstünde kabuk bulunur. Kabuk ve manto arasındaki geçiş, bu geçişi görmek için sismolojiyi ilk kullanan Hırvat sismolog Andrija Mohorovicic (1857–1936)'e ithafen Moho (veya Mohorovicic) süreksizliği olarak bilinen bir bölgede meydana gelir.

13.6 Yerkabuğu ve Üst Manto

Dünyanın kabuğu biyolojik aktivitenin gerçekleştiği yerdir. Dünya hacminin yaklaşık % 1'ini kaplar. Günümüzde, yaşamın kabukta nüfuz ettiği maksimum derinliği bilmiyoruz. Yaşam için üst sıcaklık sınırının 122 °C (Bölüm 7) olduğunu ve jeotermal gradyanın (Dünyada derinlikle birlikte sıcaklığın artması) konuma bağlı olarak okyanus kabuğunda 15 $°C.km^{-1}$ seviyesinde olduğunu varsayarsak, kıta kabuğunda yaklaşık 25 $°C.km^{-1}$, o zaman maksimum yaşam derinliği muhtemelen yaklaşık yaklaşık 10 km olur.

İki farklı kabuk tipinden söz edebiliriz. Kıtasal kabuğun yoğunluğu yaklaşık 2,7 $g.cm^{-3}$'tür ve yaklaşık %10 granit içerir. Kabuk ayrıca tortul kayaçlar (yaklaşık %8) ve çeşitli başka başkalaşım ve magmatik kayaçlar içerir. Kıtasal kabuk yaklaşık 20–90 km kalınlığındadır. Kıtasal kabuğun eski çekirdeklerine **kraton** denir.



Şekil 13.7 Yer kabuğunun bileşimi, Dünyanın geri kalanıyla karşılaştırıldığında, farklılaşmanın kanıtını sunar.

3,0 g.cm^{-3} yoğunluğuna sahip olan okyanus kabuğu, kıtasal kabuktan daha incedir (yaklaşık 5–10 km kalınlıkta) ve çoğunlukla, yaygın bir püskürük magmatik kayaç olan bazalt ve bir grup koyu, mafik sokulum magmatik kayaç olan gabrodan oluşur. En eski okyanus kabuğu, kuzeybatı Pasifik'te yaklaşık 180 milyon yaşındadır.

Yerkabuğu, temel olarak kabuktaki silikatlar ile çekirdekteki demir arasındaki farklar nedeniyle, tüm Dünyanın kitlesel özelliklerinden çok farklı bir bileşime sahiptir (Şekil 13.7).

Kabuk, katı üst mantonun kabuğunu ve bir kısmını içeren **litosferin** bir parçasıdır. Litosferin altında, üst mantonun bir parçası olan ve plastik bir biçimde hareket eden, yani akışkan olduğu anlamına gelen, **astenosfer** bulunur.

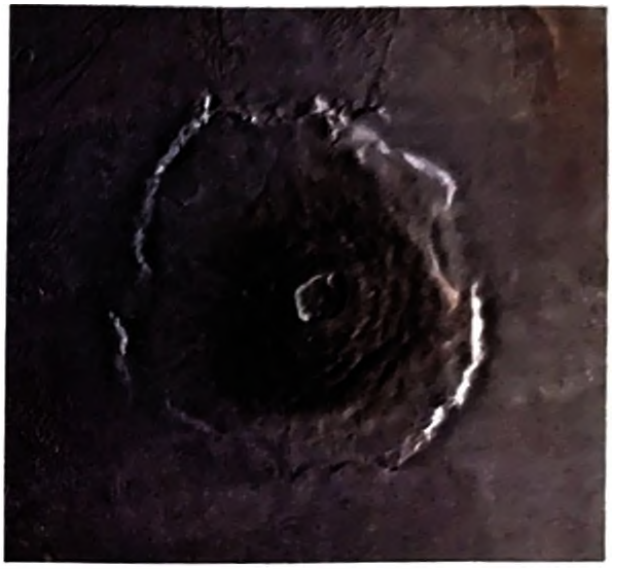
13.7 Levha Tektoniği

Litosfer aralıksız bir kayaç parçası değildir. Bunun yerine, tek tek parçalara veya levhalara bölünür. Levhalar astenosfer üzerinde hareket eder. Astenosfer, konveksiyon hücreleriyle karakterize edilir. Astenosfer içindeki konveksiyon hücrelerinin oluşumu, ısıtıldıklarında kayaların davranışıyla açıklanır. Sıcaklaştıkça, kayaların yoğunluğu daha soğuk kayalardan daha düşük olur. Sonuç olarak, daha soğuk kayalar batarak bir dolaşım modeli oluştururken yükselme eğiliminde olacaklardır. Bir yanlış kanı ise bu konvektif hücrelerin tamamen plakaların hareketini sağladığını düşünmektir. Bu mantıklı bir düşünce çizgisi olurdu. Ancak, durum böyle değil gibi görünüyor ve bunun neden böyle olduğuna bölümün sonuna doğru geri döneceğiz.

Burada önemli bir kavramsal noktayı anlamak önemlidir. Manto içindeki kayaçlar katılardır. Bu mantık dışı görünebilir. Ancak katı kayaçlar yeterince ısıtıldıklarında sünek hale gelirler ve bir sıvı gibi çok yavaş da olsa akarlar. Bu, Dünyanın iç kısmındaki kayaların konvektif hareketine izin verir.

Dünyanın yüzeyine püsküren erimiş lav, magma odalarında yerel olarak erimiş kayaçtır. Dünyanın yüzeyine daha yakın olan düşük basınç, sıcak katı kayaçların erimesini sağlar. Bu dekompresyon erimesidir. Bunu anlamak için,

Bölüm 2'de yer alan Şekil 2.18'de gösterilen tipik bir maddenin faz diyagramını gözden geçirin. Belirli bir sıcaklıkta basıncın azalmasının, malzemenin erime eğrisini katıdan sıvıya geçmesine neden olabileceğini görebilirsiniz. Kayaç erimesi işlemine kısmi erime de denir, çünkü bir kayadaki minerallerin sadece bir kısmı, herhangi bir sıcaklık ve basınç koşulunda, bileşimine bağlı olarak eriyebilir. Bu nedenle, Dünyanın yüzeyine püsküren sıvı kayanın gözlemi, size, kabuğun altındaki esasen sıvı bir tabakadan bir püskürme olduğunu düşündürerek aklınızı karıştırmamalıdır.



Şekil 13.8 Marsta levha tektoniğinin olmaması, lavların tek bir yerde püskürmesiyle geniş kalkan volkanlarının oluşmasına neden oldu. Bu, 22 km yüksekliğinde, 600 km genişliğinde bir yanardağ olan Olympus Dağının yörüngesel bir görüntüsüdür.

Levha tektoniği evrensel bir olay değildir. Dünyadan daha küçük bir hacme sahip olan Mars'ta, ısı kaybı daha hızlıydı ve plaka tektoniği, eğer gerçekten düzgün bir şekilde kurulursa, erken durdu. Levha tektoniğinin olmaması, volkanik püskürmelerin yüzeyde sabit bir yerde kaldığı geniş kalkan volkanlarının nedenini açıklar. Buna bir örnek, 22 km yüksekliğinde ve yaklaşık 600 km genişliğinde olan Olympus Dağıdır (Şekil 13.8). Venüs'te, yüzey üzerindeki kraterlerin nispeten düzgün dağılımı, aktif levha tektoniğine karşı çıkıyor. Dünyayla aynı büyüklükte olmasına rağmen, Venüs'te levha tektoniğinin olmaması, gezegenin yüzeyini 460 °C'nin biraz üzerinde ısıtan kaçak sera etkisi tarafından tetiklenen kabuktaki su eksikliğine bağlanıyor. Kabuktaki suyun yetersizliği, onu daha güçlü kılar ve kırılma ve hareket etme kabiliyetini azaltır. Bununla birlikte, konvektif dolaşımın Mars ve Venüs'ün derinliklerinde meydana gelmesi hala mümkündür, ancak gerçekleşirse, yüzeyle Dünyada olduğu gibi bağlantı kurmaz.

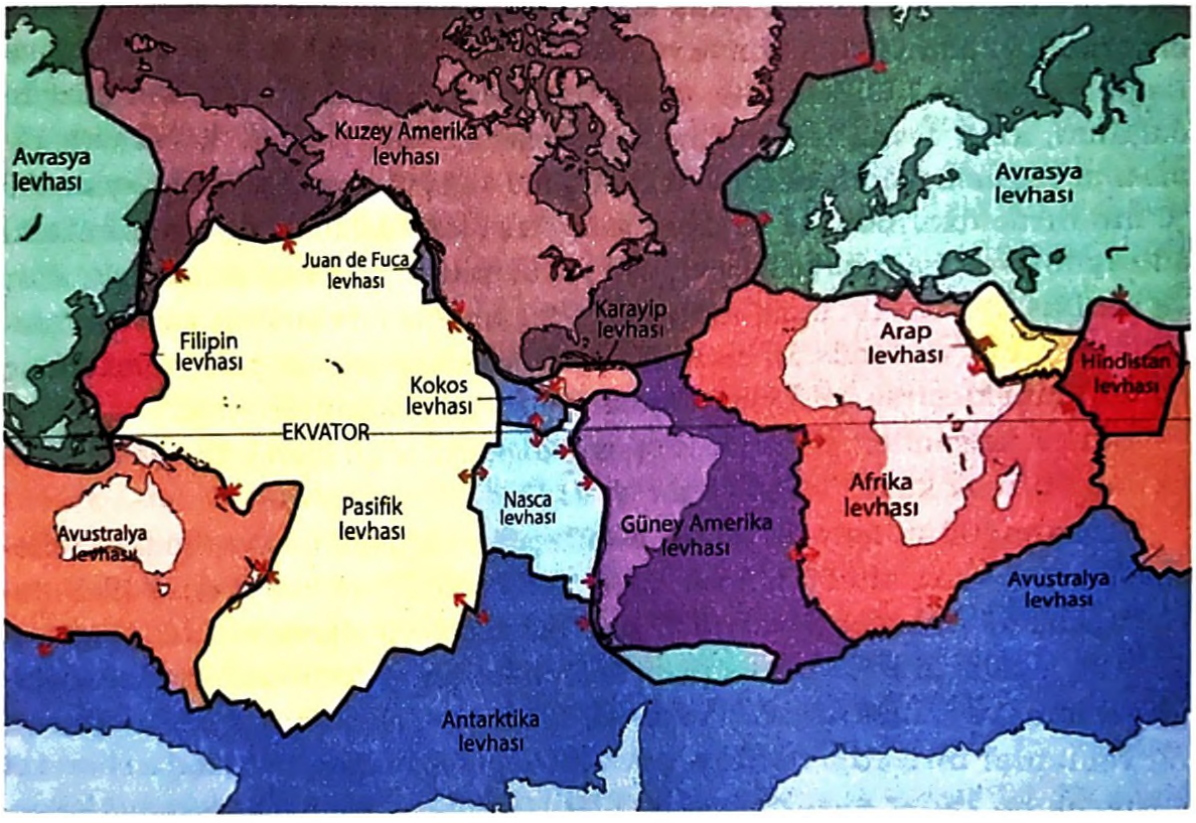
Dünya üzerinde, onları nasıl tanımladığımıza bağlı olarak 12 büyük levha ve daha birçok küçük levha vardır (Şekil 13.9).

Yerkabuğunun hareket ediyor olabileceği ve levhalardan yapılmış olabileceği fikri devrim niteliğinde bir teoriydi. İlk olarak yirminci yüzyılın ilk yıllarında Alfred Wegener (1880–1930) tarafından dolaylı olarak önerildi. Wegener, 1912'de kıtaların kayması teorisini önerdi. Kıta ana hatlarının birbirine uyduğu gözlemi ve Güney Amerika ve Afrika'da benzer fosil bitkilerin keşfi, kıtaların bir zamanlar birleştiği fikrini ortaya attı. Bununla birlikte, tüm kıtaları hareket ettirecek bu kadar büyük güçlerin türetilmesinin açık bir yolu yoktu ve Wegener'in önerilerinin ana bilim haline gelmesi en az 50 yıl aldı. İlk başta gelgit

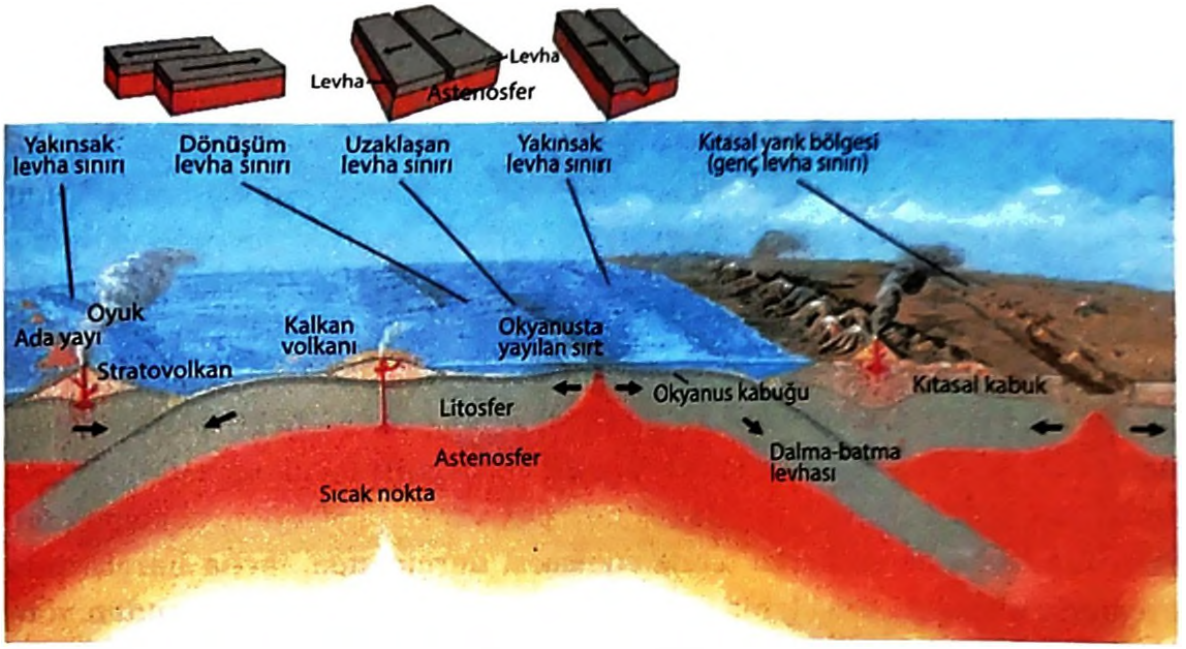
kuvvetleri gibi levha tektoniğini harekete geçirmek için önerilen kuvvetlerin, hareketi hesaba katmak için çok zayıf olduğu gösterildi ve bu da fikrin yavaş kavranmasını açıkladı.

Wegener'in fikirleri, okyanus yarıklarının her iki tarafındaki benzer fosillerin gözlemlerine ek olarak birkaç kanıt dizisiyle doğrulandı. Yirminci yüzyılın ortalarında, denizaltı haritalarını iyileştirme arzusuyla kısmen motive edilen okyanus tabanının aralıksız ve dikkatli bir şekilde haritalanması, okyanusların ortasındaki muazzam sırtları ortaya çıkardı. Bunlar, kıtaları birbirinden ayıran konveyör bandı yaratan yeni kabuğun ortaya çıktığı okyanus yayma bölgelerinin kanıtıydı. Okyanus tabanında yer alan kayalardaki demir içeren minerallerde (manyetit) korunan alternatif manyetik alanların keşfi de aynı derecede ilgi çekiciydi. Bu kayalar, Dünyanın periyodik tersine dönüşler yaşayan manyetik alanının kaydını korur. Kayalar okyanus yayılma merkezlerinden üretildiğinden, katılaşarak ve sırtlardan yolculuğuna başladığından, manyetik alanın ileri ve geri çevrilmesi, yayılan kayadaki karakteristik manyetik bantlarda korunur –yeni kabuk sentezlenmesi ve levhaların birbirinden ayrılması Dünyanın hareket halinde olduğunun kanıtıdır.

Levha tektoniği teorisi, bu plakaların hareketlerini (Şekil 13.10) ve bunların içinde meydana gelen süreçleri tanımlar. Levha sınırları sismik ve volkanik aktiviteyle işaretlenmiştir. Levha sınırlarında levhalar birbirinden uzaklaşır, birleşir veya yanlara doğru kayar. Bu levha sınır türlerinin her birine bakalım.



Şekil 13.9 Dünya üzerindeki levhaları ve ana levha sınırlarını gösteren bir harita.



Şekil 13.10 Levhalar ve bilinen farklı levha sınırları arasındaki etkileşimler (Kaynak: USGS).

Yakınsak sınırlar, levhaların birbirine doğru kaydığı ve bir plakanın diğerinin altına itildiği bir **dalma-batma** bölgesi oluşturduğu (örneğin ABD'deki Cascade Dağları) yerlerde mevcuttur. Daha yoğun okyanus kabuğunun kıtasal kabukla çarpıştığı yerde, kıtanın altına sürülür. Levha daldırılırken yanında su gibi uçucu maddeleri de taşır. Derindeki yoğun basınçlar suyu dışarı iter ve su, üstündeki manto peridotitle karışır. Su, kayaç erime sıcaklığını düşürme etkisine sahiptir. Böylece kaya erir ve yanardağ çizgilerinin veya **volkanik yayların** oluşumuna neden olur. Okyanuslarda bu tür levha sınırları boyunca kıtasal kabuk bölgesine **kıta sahanlığı** denir. Kıtadan kıtaya çarpışmanın meydana geldiği yerlerde, okyanus havzaları kapatılabilir ve dağ oluşumu meydana gelebilir. Örneğin, Hindistan ve Avrasya levhalarının çarpışmasıyla oluşan Himalayalar. Bazı durumlarda, bu çarpışmalar okyanus kabuğunun ve mantosunun kıtalara doğru zorlanmasına neden olabilir. Bu şekilde biriken bu malzemeye **ofiyolit** denir.

Plakaların birbirinden ayrıldığı yerlerde **uzaklaşan sınırlar** vardır. Okyanuslarda yayılan bu okyanus ortası sırtları (veya deniz tabanı yayılma bölgeleri) volkanik aktivite ve sismik aktivite üretir ve yeni okyanus havzalarının oluşum yerleridir. Bu sınırlarda meydana gelen erime, malzeme Dünya yüzeyine doğru hareket ederken basıncın düşmesinden kaynaklanan dekompresyon erimesidir. Okyanusun yanı sıra (örneğin Orta Atlantik Sırtı), kıtasal kabuk içinde de levha yayılması meydana gelebilir (Doğu Afrika Yarığı tartışmalı bir örnektir).

Dönüşüm sınırları, iki levhanın birbirinin üzerinden kaydığı yerde meydana gelir. Kaliforniya'daki San Andreas Fayı buna bir örnektir. Sismik aktivite bu sınırlar boyunca yoğun olabilir.

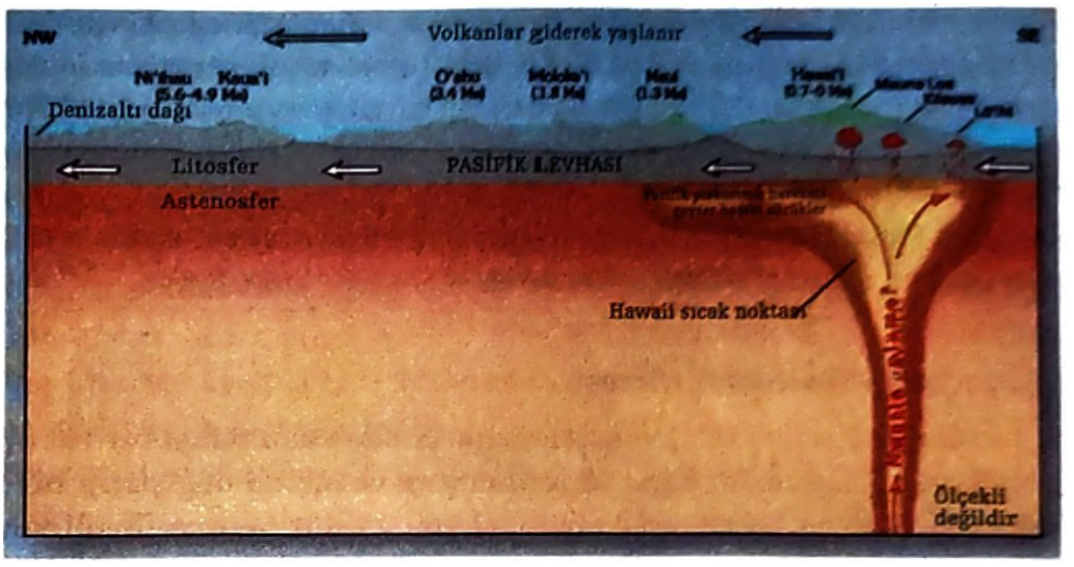
Bu levha hareketleri altta yatan manto konveksiyonuyla nasıl bağlantılıdır? Bir hipotez, levha kendi yapısıyla ilgilidir. Levhaların daldığı yerde, kayaç basınç altındadır ve daha yoğun hale gelir. Bu yoğun malzeme levhayı aşağı doğru çekme eğilimindedir. Levhanın diğer ucunda, örneğin bir okyanus ortası sırtında, levhalar, riftleşme sırasında dekompresyon ergimesiyle oluşan magmanın enjeksiyonu ve genleşmesiyle birbirinden ayrılır. Bu faktörler, levhaların dalma bölgesi boyunca mantoya hareket etme eğiliminde olduğu anlamına gelir. Esasen kendilerini mantoya çekerler, görünüşe göre altlarındaki konveksiyondan büyük ölçüde bağımsızdırlar.

Ancak, Kuzey Amerika Levhası gibi dalma bölgelerine bağlı olmayan levhalar bulunduğundan levha hareketinin tek açıklaması bu olamaz. Gelgit kuvvetlerinin katılımı hakkında hala çok tartışma var ve büyük konveksiyon hücrelerinin levha hareketlerini tahrik etmemesi durumunda, levha hareketinin litosferin altındaki kanallarda daha küçük ölçekli hareketler tarafından yönlendirilebileceği fikrine bağlı olanlar var.

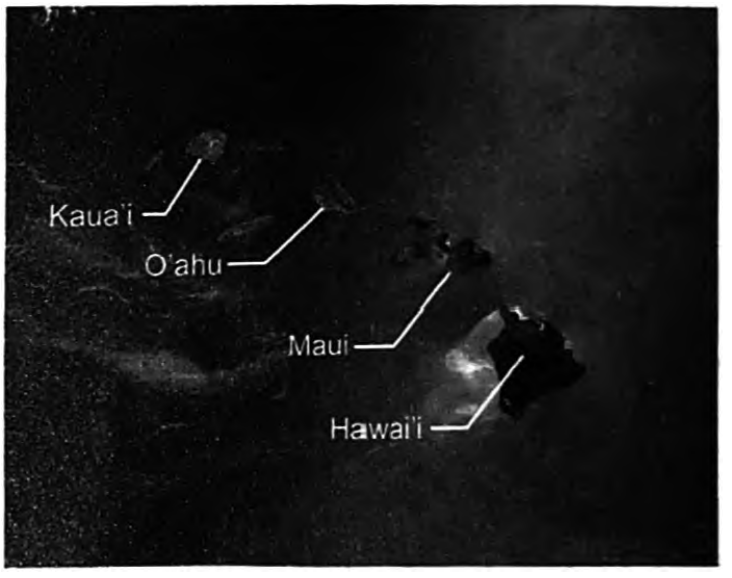
Levha tektoniği, volkanizma gibi yüzey jeolojik aktivitelerini oluşturmak için tek mekanizma değildir. Manto içindeki yükselen kayaç tüyleri, yüzeye yaklaştıkça erir ve daha düşük basınca maruz kalırlar, bir sıcak nokta oluştururlar, bu bir kaynak torçu gibi, kabuğun içinden geçerek bir levha içinde yerel volkanik aktivite oluşturabilen bir sıcak nokta oluşturur. Belki de buna en iyi örnek Hawai ada zinciridir (Şekil 13.11). Burada bir sıcak nokta, on milyonlarca yıl boyunca okyanuslara lav püskürttü. Pasifik levhası esasen statik sıcak nokta üzerinde hareket ettiğinden, levha boyunca, örneğin yaklaşık altı milyon yaşında olan Kauai'den günümüzün Büyük Hawaii Adasına kadar uzanan bir dizi ada üretildi.

Levha tektoniği, Dünyanın birçok yönünü küresel ölçekte yorumlamak, görünüşte ilgisiz birçok fenomeni ilişkilendirmek ve Dünya tarihini yorumlamak için bir çerçeve sağlar. Levha tektoniği, dağ oluşumunu ve buna bağlı magmatik ve metamorfik kayaç oluşumunu yönlendirerek jeosferi etkiler. Daha sonra gezegenlerin yaşanabilirliğini kontrol eden faktörleri keşfederken tartışacağımız gibi, levha tektoniği ayrıca Dünyanın iç kısmındaki ısı transferini de etkiler ve bu nedenle, atmosferi Güneş rüzgârı tarafından saçılmaktan koruyan manyetik alanı oluşturan dinamo üzerinde bir etkiye sahip olabilir.

Levha tektoniği kıtaların düzenini etkiler, Güneş enerjisiyle ısıtma ve soğutmayı ve dolayısıyla rüzgârları ve hava sistemlerini etkiler. Hızlı levha yayılması ve sıcak nokta aktivitesi, karbondioksit salabilir ve küresel iklimi etkileyebilir. Böylece levha sistemi atmosferik bileşimi etkiler. Kıta düzeni okyanus akıntılarını etkiler, yayılma hızı okyanus ortası sırtların hacmini ve dolayısıyla deniz seviyesini etkiler. Kıtaların yerleşimi buzul çağlarının başlamasına katkıda bulunabilir. Böylece hidrosfer etkilenir.



(a)



(b)

Şekil 13.11 Hawaii ada zinciri. Üzerinde hareket eden bir levha boyunca volkanik aktivite yaratan bir sıcak nokta örneği, (a) şematik olarak ve (b) ana adaların uydu fotoğrafıyla gösterilmiştir (Kaynak: USGS).

Son olarak, elbette, kıtaların hareketi göçe karşı koridorlar veya engeller yaratır, yeni ekolojik nişlerin oluşmasına ve habitatların az çok elverişli iklimlere taşınmasına neden olur ve böylece biyosferi etkiler.

Tartışma Noktası: Levha tektoniği ve gezegen yaşanabilirliği

Plaka tektoniğinin biyosfer için birçok önemli etkisi olduğu açıktır. Levha tektoniği, iklimi ve habitatı değiştiren kıtasal kara kütlelerinin yer değiştirmesine neden olmasının yanı sıra, besin maddelerinin ve biyolojik açıdan önemli elementlerin yer kabuğunda devridaim etkisine de sahiptir. Elementlerin kabuk boyunca döngüsü biyolojik

üretkenliği artırabilir. Bazı bilim insanları, bir gezegenin yaşanabilir olması için levha tektoniğinin gerekli olduğuna inanıyor. Sen ne düşünüyorsun? Bir gezegenin jeolojik zaman dilimlerinde yaşama ev sahipliği yapması için bu sürecin var olması gerekli midir? Bir gezegenin boyutu, levha tektoniğinin doğasını potansiyel olarak nasıl etkiler ve bu sürecin Güneş dışı gezegenlerde var olmasını bekler miydik?

Korenaga, J. (2012) Plate tectonics and planetary habitability: current status and future challenges. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1260**, 87–94.

13.8 Kayaçların Tarihlendirilmesi

Levha tektoniği sürecinin Dünyanın jeolojik tarihinde nasıl temel bir rol oynadığını ve kayaç döngüsünün, kayaç türlerinin yapı ve biçimi değiştirip bir türden diğerine dönüşme şeklini nasıl tanımladığını gördük. Ayrıca tortul kayaçların yaşam için kanıtları nasıl koruyabildiğini de gördük; yine de diyajenez (örneğin metamorfizm yoluyla) bu belirteçleri yok edebilir. Bununla birlikte, jeolojideki önemli bir soru, Dünyayı ve onu oluşturan kayaçları nasıl tarihlendirebileceğimizdir. Sadece kayaçları tarihlendirebildiğimiz zaman, Dünyada zaman içinde meydana gelen büyük biyolojik ve jeolojik değişiklikleri perspektife koyabiliriz. Bunu yapmak için geliştirilen yöntemler, diğer gezegen cisimlerinin incelenmesine ve tarihlendirilmesine doğrudan uygulanabilir.

Modern jeolojiden önce, Başpiskopos James Ussher (1581-1656), Dünyanın yaşını 6000 yıl olarak hesapladı. Hesaplarının İncil'deki kitaplara, yani Yaratılış'a dayanılarak yapıldığını kaydetti ve Dünyanın kökenini MÖ 26 Ekim 4004 olarak belirledi.

Bu kaba girişim bugün biraz komik görülebilir ancak bu, Dünyanın yaşını belirlemeye yönelik ilk girişimdi. Daha sonra, gezegenin yaşını tahmin etmek için daha jeofiziksel bir girişimde bulunuldu. Lord Kelvin (1824–1907), Dünyanın büyük bir demir yığınına benzediğini varsayarak, ısıtılmış olan küçük demir kürelerinin soğuma hızını ölçtü. Bu verileri Dünyanın büyüklüğüne göre tahmin etti ve Dünyanın şu an olduğu kadar soğuk olabilmesi için yaklaşık 20–40 milyon yaşında olması gerektiğini tahmin etti. Bu zarif tahmin, elbette, Dünyanın karmaşık oluşum tarihini, iç bileşimini ve o zamanlar anlaşılmayan radyoaktif olarak üretilen ısının varlığını hesaba katmadı.

Jeolojik yaklaşımlar kullanılarak başka deneysel girişimlerde bulunuldu. Okyanustaki tuz miktarına bakmayı da dâhil ediyorlardı. Okyanusa ne kadar tuz eklendiğini ve okyanusta ne kadar tuz olduğunu bilirsek, okyanusların yaşını da tahmin edebiliriz. En azından fikir buydu. Sediment kalınlığına da bakabiliriz. Bulabildiğimiz en kalın tortuların derinliğini toplarsak, birikme oranını tahmin etmeye çalışabilir ve Dünyanın yaşı hakkında bir miktar tahmine ulaşabiliriz. Bu yöntemleri kullanarak insanlar birkaç yüz milyon yıllık yaşlara ulaştılar. Bu iki yaklaşımın neden güvenilmez olduğu oldukça açık olmalıdır. İlk yöntem, okyanus bileşiminin zaman içindeki sabitliği hakkında büyük var-

sayımlarda bulunur, ikinci yöntem ise hangi çökeltilere baktığımıza bağlıdır. Bildiğimiz gibi, Dünyanın ilk zamanlarına kadar uzanan çok az kaya vardır ve meydana geldikleri yerde, günümüze kadar kesintisiz olarak devam eden tortul bir diziye gömülü değildirler.

Dünyayı tarihlendirmek için yapılan erken hatalı girişimlere rağmen, geçmişi anlamak için kesinlikle bugünü kullanabiliriz. **Tekbiçimcilik ilkesi**, 1700'lerin sonlarında jeolog James Hutton (1726–1797) tarafından detaylandırıldı, ancak terim bilge William Whewell (1794–1866) tarafından icat edildi. Jeolog Charles Lyell (1797–1875) tarafından *The Principles of Geology* adlı çalışmasında daha da geliştirildi.

Hutton, tortul tabakaların çoğunun kademeli, günlük süreçlerden oluştuğunu fark etti. Bu kayaları oluşturmanın uzun zaman aldığını fark etti. Bu, diğerlerinin o zamana kadar inandıklarından çok farklıydı.

'Şimdi, geçmişin anahtarıdır,' tekdüzelikçiliğin ana kavramıdır: Bugün meydana gelen süreçler (volkanizma, dağ inşası, depremler, çökelme) geçmişte de meydana geldi ve muhtemelen aynı (veya çok benzer) oranlarda. Geçmişteki jeolojik süreçleri ve oranlarını araştırmak için bugün gözlemlenen bu süreçlerin anlaşılmasını kullanabiliriz.

Böylece, jeologlar tortul kayaç katmanlarını inceleyerek Dünya tarihini bölümlendirmek için bir zaman ölçeği geliştirdiler. Kayaçları tarihlemek için yapılan ilk girişimler doğru fikirdi; numuneler üzerinde kesin bir tarih elde etmek için daha doğru yöntemlere ihtiyaç vardı.

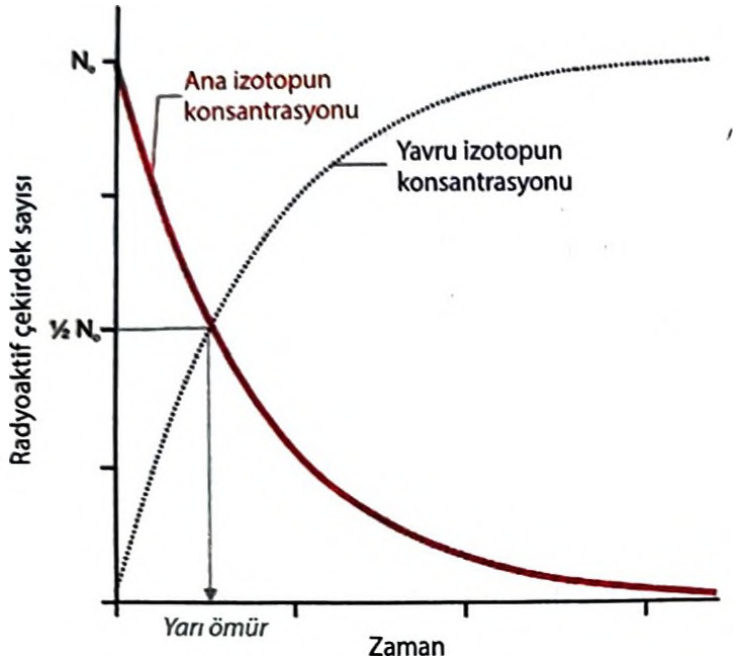
Sonraki bölümlerde, jeologların, kayaç birimlerinin yaşlarını çıkarmak ve jeolojik zaman ölçeğinin bölümlerini belirlemek için hem radyometrik teknikleri hem de bağıl yaş tarihlendirmesini nasıl kullandıklarını öğreneceğiz.

13.9 Kayaçların Yaşının Belirlenmesi

Jeologlar kayaçların kaç yaşında olduğunu nasıl belirler? Burada iki temel yöntemi keşfediyoruz: kayaçların mutlak (veya radyometrik) ve göreceli yaş tayini.

13.9.1 Kayaçların Mutlak Tarihlendirilmesi

Bölüm 12'de, erken Dünyadaki yaşamın bazı kanıtlarını incelediğimizi ve bu bölümde bazı elementlerin nasıl izotop oluşturduğunu (farklı sayıda nötrona sahip bir elementin formu) tartıştığımızı hatırlayacaksınız. Bu elementlerden bazıları radyoaktiftir ve bozunarak yavru ürünler oluşturur. Bu elementler **radyoizotoplardır** (kendiliğinden bozunan, radyasyon yayan izotoplar). Radyoizotoplar sabit bir üstel oranda bozunur ve bu bozunma hızı **yarı ömür**le ölçülür (Şekil 13.12). Yarı ömür, radyoaktif maddenin yarısının bozunması için geçen süredir. Bozulmanın meydana geldiği süreç, elementler arasında değişir.



Şekil 13.12 Bir radyoizotopun zamanla bozunmasının grafiksel gösterimi. Yarı ömür, aktivitedeki üstel düşüşe göre radyoaktif izotopun yarısının bozunması için geçen süredir (Kaynak: Charles Cockell).

Alfa bozunması durumunda, element bir helyum çekirdeği (iki proton ve iki nötron) serbest bırakır ve yeni bir elemente dönüşür. Uranyum-238'in kurşun-206'ya bozunması, alfa partikül salınımının meydana geldiği reaksiyonları içerir.

Beta bozunmasında, bir nötron, bir elektronun serbest bırakılmasıyla bir protona dönüşür ve yine elementi değiştirir (örneğin, karbon-14'ün nitrojen-14'e bozunması). Atom numarası bir artar, ancak atom kütle numarası değişmez.

Gama radyasyonu bozunması sırasında bir gama ışını yayılır, ancak nükleer parçacıkların sayısı değişmez. Kobalt-60'ın nikel-60'a bozunması bir örnektir. Bu süreçte kobalt-60, beta bozunmasıyla aktifleştirilmiş bir nikel-60'a bozunur. Nikel-60'la aktive olan çekirdek daha sonra iki gama ışını yayar.

Radyoizotoplar bozunarak farklı bir radyoizotop oluşturabilir. Bu nedenle, sonunda kararlı bir izotop oluşmadan önce bir dizi radyoaktif bozunma olabilir. Örneğin, kayaları tarihlemek için kullanılan önemli bir bozunma süreci olan uranyum-238"n kurşun 206'ya bozunması,, en az sekiz alfa ve altı beta bozunumu içerir. Kararlı izotop, radyoaktif 'ana' izotopun (ve herhangi bir radyoaktif ara ürünün) bozulmasından oluşan 'yavru'olarak adlandırılır.

Radyoizotoplar kristalleştiklerinde minerallerde tutulurlar ve zamanla bozunarak mineral içinde tutulan kararlı izotoplar oluştururlar.

Ana izotopun yavru ürüne oranının belirlenmesi, mineralin oluşmasından bu yana geçen yarı ömürlerin sayısını ortaya çıkarır. Neyse ki, materyalleri tarihlendirmekle ilgilenen insanlar için, milyarlarca yıl mertebesinde yarı ömre sahip olanlardan binlerce yıllık dönemlerde bozunanlara kadar farklı bozunma sürelerine sahip çok çeşitli radyoizotoplar vardır.

Bu süreci tanımlamak için resmi olarak bir denklem yazabiliriz. n olarak verilen bir izotopun bir andaki nispi miktarı, t, başlangıçtaki miktarla (n_o) ilişkili olarak ifade edilebilir. Düşüş üstel olduğu için:

$$n = n_o e^{-\lambda t}, \qquad (13.1)$$

burada λ bir sabittir.

Ancak, bir yarı ömürden sonra $n = n_o/2$ ve $t = T$ olduğunu biliyoruz, burada T yarı ömürdür (n'nin orijinal değerin yarısına düşmesi için geçen süre).

Denklemin (13.1) bu koşullarla yeniden düzenlenmesi, radyoizotopların bozunmasını kullanan materyallerin tarihlendirilmesi için önemli denklemi verir:

$$n = n_0 exp(-0{,}693t/T) \qquad (13.2)$$

Bu denklemin kullanımına bir örnek olarak, yarı ömrü 1,25 milyar yıl olan ^{40}K ila ^{40}Ar bozunmasını kullanarak Güneş Sisteminin yaşını ele alalım (Tablo 13.1). Bugün belirli Dünya dışı malzemelerde ^{40}Ar'ın ^{40}K'ya oranının 11,5'e 1 olduğunu biliyoruz. Bu ölçülebilir.

Tablo 13.1 Kayaçları yarı ömürleri ve bozunma türleriyle tarihlendirmek için kullanılan bazı yaygın izotop örnekleri.

Ana izotop	Yavru izotop	Yarı ömür	Bozunma türü
Rubidium-87 (^{87}Rb)	Strontium-87 (^{87}Sr)	47 Ga	Beta
Uranium-238 (^{238}U)	Lead-206 (^{206}Pb)	4.47 Ga	Alpha (8), beta (6)
Potassium-40 (^{40}K)	Argon-40 (^{40}Ar)	1.25 Ga	Beta
Uranium-235 (^{235}U)	Lead-207 (^{207}Pb)	704 Ma	Alpha (7), beta (4)
Carbon-14 (^{14}C)	Nitrogen-14 (^{14}N)	5730 yr	Beta

Orijinal malzemede ^{40}K miktarını, n_o, basitçe şu şekilde hesaplayabiliriz: (bugünkü ^{40}K konsantrasyonu) + (çürüyen ^{40}K konsantrasyonu).

Bu şuna eşittir: (bugünkü ^{40}K konsantrasyonu) + (bugünkü ^{40}K konsantrasyonunun 11,5 katı).

Son sayı, ölçülen orandan türetilir. Başka bir deyişle, orijinal malzemedeki ^{40}K, bugünkü ^{40}K konsantrasyonunun 12,5 katına eşittir.

Denklem (13.2) kullanıldığında, $n = n_0 exp(-0{,}693t/T)$ bize şunları verir: $1 = 12{,}5 \exp(-0{,}693t/T)$; ve $1{,}25 \times 10^9$ yıllık T yarı ömrü kullanılarak, bu bize Güneş Sisteminin 4,56 milyar yıllık yaşını verir. Bu veriler, Ay kayaçları ve çeşitli meteoritik malzemeler de dâhil olmak üzere birçok malzeme üzerinde yapılan çalışmalarla tutarlıdır.

Yaş tayininde kullanılan bazı yaygın izotop örnekleri Tablo 13.1'de gösterilmektedir.

Bir kayanın kaç yaşında olduğunu belirlemek için bir izotop ve onun yavrusunu seçebilir ve her ikisinin konsantrasyonunu ölçebiliriz (kayaç yatırıldığında belirli bir radyoaktif element konsantrasyonuyla başladığını varsayarak).

Tüm bu unsurların farklı kullanımları vardır. ^{87}Rb'den 87Sr'ye, ^{238}U'dan ^{206}Pb'ye ve ^{40}K'dan ^{40}Ar'a bozunması, erken Dünyada veya diğer gezegenimsilerde ortaya çıkan eski kayaçların yaşlarını araştırmak için uygundur.

Buna karşılık, karbon-14'ün kısa yarı ömrü, onu birkaç bin yıllık veya daha eski karbonlu malzemeler için uygun hale getirir (Tablo 13.1). Karbon-14, atmosferde kozmik ışınların çarpışmasıyla üretilen nötronların hareketinden atmosferde (9–15 km yükseklikte) sürekli olarak üretilir. Nötronlar, karbon-14 üretmek için nitrojen-14'le reaksiyona girer. Karbon organik malzemeye dâhil edildiğinde (ve bu nedenle artık üretilmediğinde) çürümeye başlar. Karbon-14 tarihlemesi (karbon tarihlemesi) arkeoloji için son derece yararlıdır, ancak uzun vadeli jeolojik çalışmalar için o kadar yararlı değildir.

Genel olarak, radyometrik yaş tayininin herhangi bir sistem için yaklaşık 10 yarı ömür için faydalı olduğunu söyleyebiliriz. Bunun ötesinde, bozulma o kadar kapsamlıdır ki, sonuçlar belirsiz hale gelir.

Bu radyoizotopların çoğu birbirini tamamlar ve ölçülen yaşları doğrulamak için aynı kayaç malzemeleri üzerinde kullanılabilir.

Radyometrik yaş tayini, ilk olarak jeolog Arthur Holmes (1890–1965) tarafından Dünyanın yaşını belirlemek için kullanıldı. Uranyum-238'in yarı ömrü 4,47 milyar yıl olan kurşun-206'ya bozunmasının Dünyanın yaşını belirlemek için kullanılabileceğini fark etti. Orijinal tahmini yaklaşık 3,0 milyar yıldı. Tahmini yanlıştı çünkü ilk hesaplamalar, numune içindeki tüm kurşunun uranyum-238'in radyoaktif bozunmasından geldiğini ve başlangıçta hiçbirinin olmadığını varsayıyordu. Bununla birlikte, bu varsayım sorunludur, çünkü Dünyadaki metamorfoza uğramış, diğer kayalara maruz kalmış vb kayaçlar, – özellikle eski olanlar– oluştukları zaman genellikle radyoaktif ve radyoaktif olmayan izotoplara sahip elementler de dâhil olmak üzere çeşitli elementler içerirler. Bu komplikasyon, erken Güneş Sisteminin değişmemiş materyallerini temsil eden meteorlardaki kurşun izotop konsantrasyonlarına bakılarak nihayetinde aşılmıştır. Bilim insanları, farklılaşmamış göktaşlarında ne kadar kurşun olduğunu inceleyerek, en eski kayalara ne kadar dâhil edildiğini belirleyebilirler. Bunlar, Dünyadaki kayaların tarihlenmesi üzerinde bir kontrol sağlar. Gözden geçirilmiş tahminler, bugün aşina olduğumuz Dünyanın yaşı için bir değer verir.

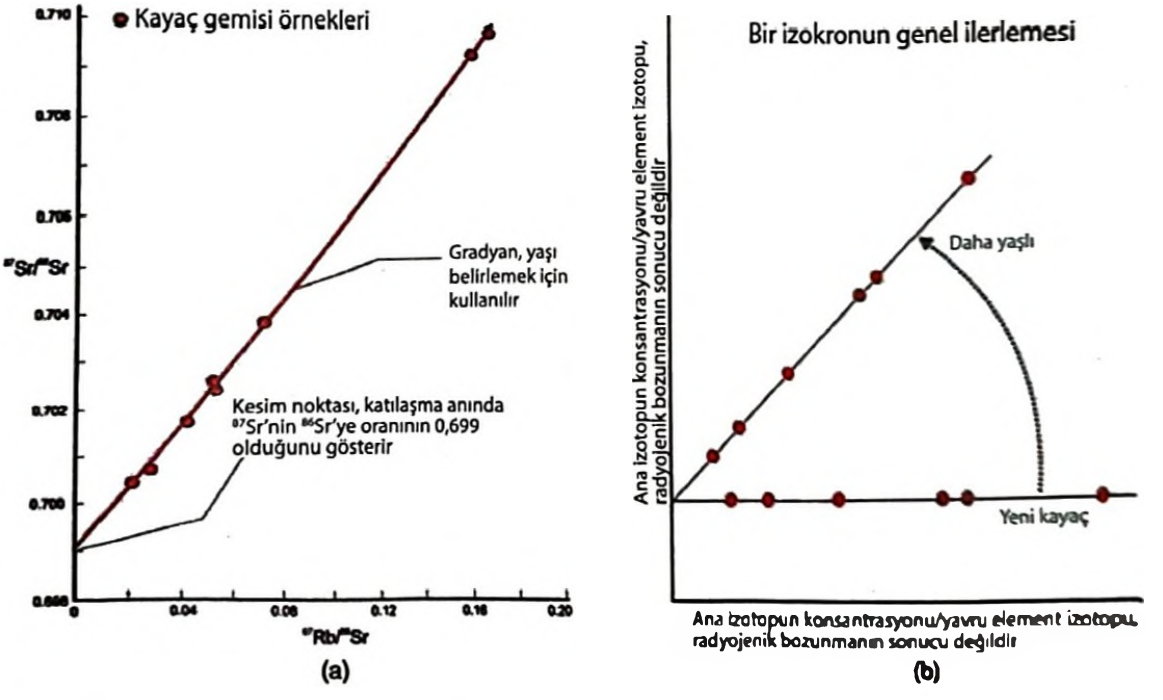
13.9.1.1 Yaş Belirlemede İzokron Yöntemi

Holmes'un çalışması, sonunda izokron yaş belirleme yöntemine yol açtığı için öncüydü. İzokron tarihlemede, kullandığımız radyoizotop için ebeveyn ve yavru izotopları ölçmenin yanı sıra (örneğin çok eski Ay kayaçları için, ebeveyn ^{87}Rb'yi ve onun yavru bozunma ürünü ^{87}Sr'yi ölçebiliriz; bkz. Tablo 13.1), ayrıca radyoaktif bozunmanın ürünü olmayan ve bu nedenle konsantrasyonu jeolojik zaman ölçeklerinde kararlı olan yavru elementin (^{86}Sr) ek bir izotopunu ölçeriz.

Radyoaktif olmayan izotopun (^{86}Sr) kimyası, radyoaktif bozunmanın (^{87}Sr) yan ürününe benzer olduğundan, kayaç ilk oluştuğunda ve kayaçta radyoaktif bozunma başlamadan önce her birinin aynı nispi miktarlarının dâhil edilmesini beklerdik. Böylece, radyoaktif olmayan izotop (^{86}Sr), bize bu elementin (Sr) bir kısmının oluştuğu zaman kayaçtaki varlığını düzeltmemiz için bir yol sağlar.

Radyoaktif ebeveynin (^{87}Rb) konsantrasyonunun, onun yavru ürününün (^{86}Sr) radyojenik olmayan izotopunun konsantrasyonuna oranını bir eksen üzerinde çiziyoruz. Diğer eksende, yavru ürünün konsantrasyonunun, yavrunun radyojenik olmayan izotopuna ($^{87}Sr/^{86}Sr$) oranını çiziyoruz. ^{87}Rb bozunmasının (^{86}Sr) yan ürününün radyojenik olmayan izotopunun değeri, bozunma başlamadan önce farklı numunelerimizde başlangıçtan itibaren bu tür elementin (Sr) kayaçta ne kadar olduğunu hesaba katmak için değerleri normalleştirir. Bu çizim, gradyandan yaşın türetilebileceği düz bir çizgi sağlar (Şekil 13.13). Kayaç ne kadar genç olursa, eğim o kadar yatay bir çizgiye meyleder. Bu nasıl açıklanır? Bunu daha ayrıntılı olarak ele alalım.

Kayacın ilk oluştuğu zamanı düşünün (Şekil 13.13b). Yavru ürünün (^{87}Sr) bozunmayan izotopuna (^{86}Sr) oranı, başlangıçta dâhil edilenin ötesinde ^{87}Sr üretmek için herhangi bir bozunma olmadığından, tüm taze kayaçlarda aynı olacaktır. Her iki izotopun benzer kimyası (bu durumda ^{87}Sr ve ^{86}Sr), başlan-



Şekil 13.13 (a) Bir Ay kayacı için izokron örneği. Bu örnek, Apollo 17 görevinde toplanan ultramafik bileşimli magmatik bir kayaç olan dünite (örnek numarası 72417) aittir. Kayacın farklı parçaları analiz edilir. Yaşı rubidyum-stronsiyum sistemi kullanılarak hesaplanır. Grafiğin gradyanı 4,47±0,1 milyar yıllık bir zamanı ifade eder. (b) İlk katılaşmanın ardından kayaç yaşlandıkça bir izokron eğrisinin nasıl geliştiğinin genel ilkesini gösteren bir grafik (Kaynak: Charles Cockell).

gıçta herhangi bir numuneye benzer miktarların dâhil edildiği anlamına gelir, dolayısıyla *y* eksenindeki sabit oran. Buna karşılık, ana izotop (^{87}Rb), ikincil ürünün (^{86}Sr) radyojenik olmayan izotopundan kimyasal olarak farklıdır ve bu nedenle her ikisinin miktarı birbiriyle ilişkili değildir ve farklı örneklerde farklı olabilir, bu da *x* ekseni ve dolayısıyla yatay çizgi boyunca farklı oranlara yol açar. (Şekil 13.13b).

Zaman ilerledikçe ne olur? Ana radyoizotopun (^{87}Rb) ikincil ürünün (^{86}Sr) radyojenik olmayan izotopuna konsantrasyonunun oranı, ^{87}Rb azalırken ikincil ürünün (^{86}Sr) radyojenik olmayan izotopunun konsantrasyonu aynı kaldığı için küçülür (x ekseni), Buna karşılık, radyoizotopun (^{87}Sr) yavrusunun konsantrasyonu (radyoaktif bozunma nedeniyle) artarken, yavru ürünün (^{86}Sr) radyojenik olmayan izotopunun konsantrasyonu aynı kalır, dolayısıyla y eksenindeki oran artar. Genel olarak çizginin eğimi artar (Şekil 13.13b).

Bu yaklaşımı anlamanın daha resmi bir yöntemi, izokron yöntemi için denklemi yazmaktır:

$$\frac{D + \Delta P_t}{D_i} = \frac{\Delta P_t}{P - \Delta P_t}\left(\frac{P - \Delta P_t}{D_i}\right) + \frac{D}{D_i}$$

D, yavru izotopun başlangıç konsantrasyonudur (buradaki örnekte ^{87}Sr), D_t, radyoaktif bozunmanın sonucu olmayan (sabit bir oranda olduğu varsayılır; buradaki örnek), *P* ana izotopun başlangıç konsantrasyonudur (buradaki örnekte ^{87}Rb) ve ΔP_t, *t* zamanında bozunan ana izotopun toplam miktarıdır.

Sunulan denklem, karmaşık görünse de, doğrudan ölçülebilen değerleri içerdiği için yararlıdır. $P - \Delta P_t$, çalışma sırasında ölçülen ana izotop konsantrasyonudur. $D + \Delta P_t$, ölçüm anındaki yavru izotopun konsantrasyonudur ve D_t, ölçüm anında radyoaktif bozunmanın sonucu olmayan yan ürünün izotopunun konsantrasyonudur.

İki değerle, $D+\Delta P_t/D_t$ (yavru izotopunun nispi konsantrasyonu ve bunun sonucu olmayan izotopunun radyoaktif bozunması; Şekil 13.13'teki ^{87}Sr/^{86}Sr) ve $P-\Delta P_t/Di$ (radyoaktif bozunmanın sonucu olmayan ebeveyn ve yavru izotopun bağıl konsantrasyonu; Şekil 13.13'te ^{87}Rb/^{86}Sr), bir izokron grafiği elde etmek için çiziyoruz.

Grafiğin eğimi, $P-\Delta P_t/P-\Delta P_t$ ($e^{\lambda t} - 1$)'e eşittir, burada *t*, kayacın oluşmasından bu yana geçen süredir ve sabit oran olan λ, ln *2/T* olarak verilir, burada *T* yarı ömür. Böylece, örneklerin yaşını belirlemek için bu eğimi kullanabiliriz.

13.9.1.2 Soyu Tükenmiş Radyoizotoplar

Radyoizotopların bilhassa akıllıca bir kullanımı, Dünyanın farklılaşmasıyla çıkıyor. Dünya, ilk-gezegen diskinden biriktiğinde, ^{182}Hf (hafniyum) radyoaktif nüklidini onun içine dâhil etmişti. Bu izotopun dokuz milyon yıllık kısa bir yarı ömrü vardır, bu da 90 milyon yıl içinde (10 yarı ömür) etkin bir şekilde yok

olduğu anlamına gelir. Bu elementler, artık Dünyada bulunmadığından **soyu tükenmiş radyonüklidler** olarak bilinir. Çok faydalı oldukları ortaya çıkıyor. ^{182}Hf, mantoda bulunanlar gibi kayaçlarda olmayı tercih eden bir elementtir. Litofil element olarak adlandırılır. Bununla birlikte, bir siderofil element olan bozunma ürünü ^{182}W (tungsten), çekirdeğin demirinde karıştırılmayı tercih eder. Eğer Dünya oldukça hızlı bir şekilde farklılaşmış olsaydı (100 milyon yıldan daha kısa bir süre içinde), o zaman Hf, tamamı çürümeden önce mantoda kapana kısılmış olurdu. Çürümesinden üretilen tungsten de mantoda kapana kısılmış olurdu. Bugün, radyojenik olmayan tungsten izotop ^{183}W'yla karşılaştırıldığında, manto ve kabuğun silikat kayalarında ^{182}W'da zenginleşme bulmayı beklerdik. Buna karşılık, eğer çekirdek oluşumu çok yavaş olsaydı, hafniyumun çekirdek oluşmadan önce çoğunlukla bozunmasını ve ^{182}W yavru izotopunun çekirdeğe hareket etme şansı vermesini beklerdik. ^{182}W'deki zenginleştirme gerçekten de Dünyanın silikatlarında bulunur ve bu, çekirdek oluşumunun oldukça hızlı gerçekleştiğini gösterir. Zenginleşmenin büyüklüğü, farklılaşmanın Dünya oluştuktan yaklaşık 30 milyon yıl sonra meydana geldiğini gösteriyor.

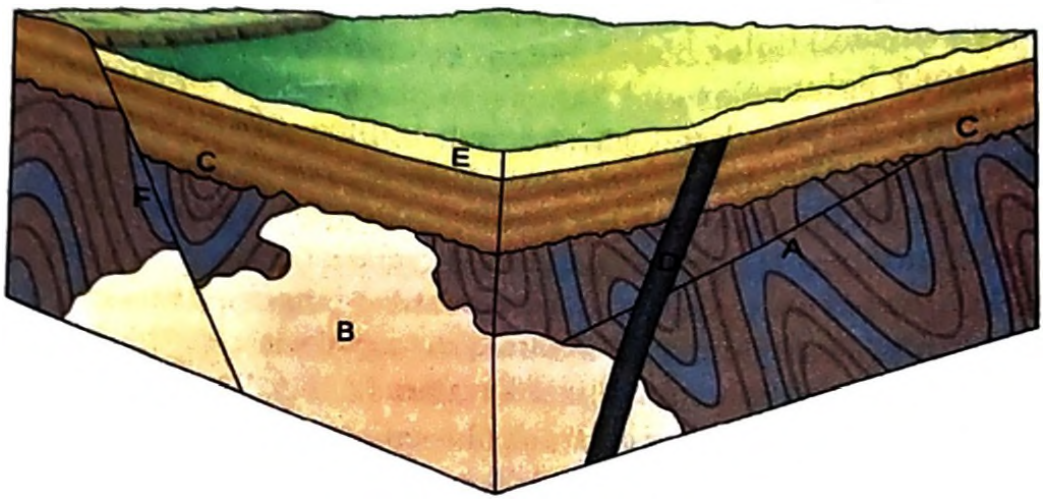
Merak edebileceğiniz bir soru, ^{182}Hf gibi bu erken soyu tükenmiş radyonüklidlerin ilk olarak nereden geldiğidir? Güneş sisteminin oluşumundan hemen önce, muhtemelen Güneş Sistemimizin oluştuğu yıldız oluşum bölgesinde, yıldızlarda ve süpernovalarda (Bölüm 8) nötron yakalama reaksiyonlarında üretildiler. Göktaşları ayrıca bize çevre ve Güneş sisteminin oluştuğu malzemeler hakkında bilgi veren soyu tükenmiş nüklid bozunma ürünleri kaynağı sağlar.

13.9.2 Göreceli Tarihlendirme

Kayaçları tarihlemenin bir başka yolu da, onları yaşı bilinen diğer kayaç dizileriyle karşılaştırmaktır (belki de son bölümde açıklandığı gibi radyometrik yaş tayiniyle belirlenir). Göreceli yaş tarihleme ilkeleri, Danimarkalı jeolog Nicolas Steno (1638-1686) tarafından detaylandırıldı. Birbirlerine göre yaşlarını deşifre etmek için kayaç birimlerini karşılaştırarak kayaçları tarihlendirebiliriz. Bunu yapmak için kayaçlar arasındaki bazı temel jeolojik ilişkileri tanımamız gerekir. Kayaçları yorumlamanın ve aralarındaki ilişkileri incelemenin birçok yolu vardır ve bunlar genellikle birden çok yeniden işleme, levha tektoniği ve benzeri olaylarla karmaşık hale gelir. Yine de, kayaç kaydında gördüklerimizi anlamlandırmaya çalışmak için bazı temel fikirler kullanılabilir. Kayaçlara, özellikle tortul kayaçların katmanlarına uygulanan bazı ilkeleri inceleyelim (Şekil 13.14).

13.9.2.1 Süperpozisyon İlkesi

Süperpozisyon ilkesi, genel olarak herhangi bir kayaç tabakasının altındakilerden daha genç olduğunu kabul eder (en yaşlısı altta ve en genci üstte). Kayaç katmanlarında büyük ölçekli deformasyon veya yeniden çalışma olmadığı



Şekil 13.14 Kayaçların göreceli yaş tarihlendirmesinin bazı ilkelerini gösteren diyagram, özellikle çapraz kesme ilişkileri ilkesini göstermektedir. Bu ilişkiler yapılara göreli bir yaş vermek için kullanılabilir. A Bölgesi, bir fay tarafından kesilen kıvrımlı bir kayaç tabakasıdır. Fay, kayacın katlanmasından sonra meydana gelmiş olmalıdır. B Bölgesi, A Bölgesi kıvrıldıktan sonra gerçekleşmiş olması gereken, A Bölgesinden geçen büyük bir kayaç kesme girişidir. C Bölgesi, A ve B Bölgeleri oluşturulduktan sonra gerçekleşmiş olması gereken, üzerinde kayaç tabakalarının biriktiği A ve B Bölgelerini kesen erozyondur. D Bölgesi, A, B ve C Bölgelerini kesen volkanik bir saldırıdır, yani bu birimlerden daha gençtir. E Bölgesi daha da genç kayaç tabakalarıdır (C ve D Bölgelerinin üzerindedir). F Bölgesi, B, C ve E Bölgelerini kesen çok yeni bir faydır (Kaynak: wikicommons, Woudloper).

varsayılırsa, bu ilke tortuların, lavların veya diğer kayaların zamanla birbiri üzerine sıralı olarak katmanlandığı kayalara uygulanır.

13.9.2.2 Orijinal Yataylık İlkesi

Kütleçekim altında yerleşme genellikle tortul tabakalarının (ve lavlar gibi magmatik kaya püskürmelerinin) yatay bir biçimde yerleşmesine neden olur. Katmanlar kayaç deformasyonuyla katlanırsa, orijinal yataylık ilkesi bize deformasyon olayının muhtemelen kayaçlar oluştuktan sonra meydana geldiğini söyler.

13.9.2.3 Çapraz Kesme İlişkileri İlkesi

Bir dizi kayaç tabakamız varsa ve sonra başka bir özelliğin bu tabakaları kestiğini tespit edersek, bu olayın kayaç tabakaları yerleştirildikten sonra meydana geldiğini varsaymak mantıklıdır. Böyle bir özellik bir fay veya bir dayk (bir kayaya magma veya tortu girişi) olabilir. Kayaçları kesen herhangi bir özellik, kesilen en genç kayaçtan daha gençtir (Şekil 13.14).

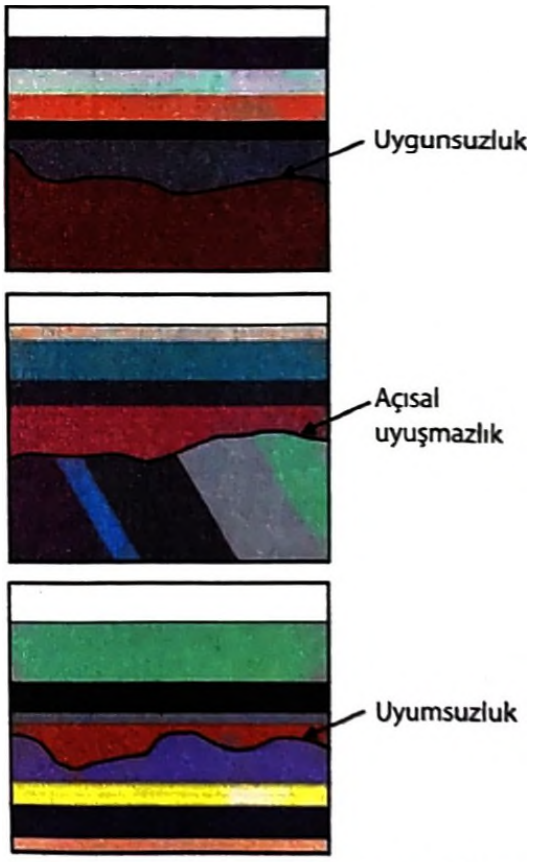
13.9.2.4 Faunal Dizi İlkesi

Organizmalar zaman içinde evrimleşmiş ve nesli tükenmiştir ve bu nedenle kayaçların fosil içeriği evrimsel değişiklikleri yansıtacak şekilde sistematik bir şekilde değişmektedir. Bazen 'kayaç birimleri içindeki organizmalar zamanla değişir' şeklinde yorumlanır, eğer organizmaların evrimsel sırasını biliyorsak [belki de filogenetik ağaç çalışmaları (Bölüm 6) veya başka bir bölgeden fosil kanıtları yoluyla] kayaçları fosil kayıtlarını kullanarak doğru kronolojik sıraya yerleştirebiliriz.

Yukarıdaki ilkelerin hiçbiri birbirini dışlamaz ve bunlardan birkaçını belirli bir kaya stratigrafisine uygulayarak, belirli herhangi bir ilgi tabakasının yaşını tespit etmek mümkündür.

13.9.3 Uyuşmazlıklar

Jeologların kayaların birbirleriyle olan ilişkisini anlamak için kullandıkları bir diğer araç da 'uyumsuzluklara' bakmaktır. Uyumsuzluk, birbirinden oldukça farklı iki kayaç kütlesini birbirinden ayıran ve bunların sürekli olarak yerleşmediğini, ancak aralarında bir boşluk veya gecikme olduğunu gösteren erozyon yüzeyidir. Uygunsuzlukların ve yaşlarının incelenmesi, az önce incelediğimiz ilkeler tarafından yönlendirilebilir. Bu özelliklerin en ünlülerinden bazıları, ilk olarak James Hutton tarafından zaman içinde kayaç oluşumlarındaki değişikliklerin örnekleri olarak tanımlanan İskoçya genelinde bir dizi uyumsuzluk olan 'Hutton Uyuşmalıkları'dır. Bu özellikler onu Üniformitarizm üzerine fikirlerine götürdü. Bu kısımda, jeologların Dünyada ve diğer gezegen cisimlerinde tanıdığı bazı uyumsuzluk türlerini özetlemeye değer.



Şekil 13.15 Kayaçların göreceli tarihlendirilmesinde kullanılan farklı uyuşmazlık türleri (Kaynak: Charles Cockell).

13.9.3.1 Uygunsuzluk

Yatay bir dizideki kayaçlar, magmatik veya metamorfik anakaya kadar aşınmışsa ve ardından tortul tabakaların birikmesiyle devam ederse, bir uygunsuzluk ortaya çıkabilir (Şekil 13.15).

13.9.3.2 Açısal Uyuşmazlık

Bir uyumsuzluğun altındaki ve üstündeki kayaçların farklı yönelimleri

varsa, bu, kayacı döndüren, ardından erozyona uğrayan ve ardından yeniden çökeltilen bir deformasyon dönemi olduğunu gösterir. Birimler bir açıda olduğundan ve üstlerindeki birimlerle kesildiğinden, bu üç türün tanınması en kolay olanıdır (Şekil 13.15).

13.9.3.3 Uyumsuzluk

Uyumsuzlukta, yataya yakın bir biçimde tortul kayaçlar aşınmıştır. Erozyon profili daha sonra müteakip tortul biriktirmeyle kaplanır. Bu süreç, bir erozyon periyodu olduğunu ve daha sonra neredeyse yatay katmanlarda yeniden birikme olduğunu göstermektedir. Uyumsuzlukların tanınması en zor olanıdır çünkü birimler neredeyse yataydır ve sadece küçük bir süreksiz tabaka gözlemlenebilir (bu bir toprak horizonu olabilir; Şekil 13.15). Bir uyumsuzluktan farklıdır, burada tortul kayaçlar aşınmış bir magmatik ana kayacın üzerine gelir.

Mars, Gale Kraterindeki Sharp Dağında Curiosity gezgini tarafından gözlemlenen killerin ve sülfatların üzerine oturan lav katmanları gibi bazı uyumsuzlukların muhteşem örneklerini sunar (Şekil 13.16).

13.10 Jeolojik Zaman Ölçekleri

Kayaçların nasıl katmanlandırıldığını gördük. Kayaçların göreceli tarihlendirilmesi ve uyumsuzlukların oluşumunun ardındaki fikirleri göz önünde bulundurarak, bu süreçlerin meydana geldiği uzun zaman dilimlerini incelemeye başlıyoruz. Bu zaman dilimleri nelerdir? Dünyanın jeolojik tarihi ani yıkıcı değişimlerle (depremler ve volkanlar gibi) noktalanmış olsa da, jeolojik süreçler genel olarak çok yavaştır. Aşağıda, bir yıl boyunca hareketlerin meydana geldiği tipik mesafeler olarak verilen çeşitli jeolojik özelliklerin değişim oranlarına ilişkin bazı örnekler verilmiştir:

- Büyük Kanyon Kesimi – 0,06 cm
- Atlantik Okyanusunun okyanus ortası sırtı boyunca açılması – 2,8 cm
- San Andreas Fayının Hareketi – 5 cm
- Alplerin Yükselişi – 0,05 cm

Bununla birlikte, milyonlarca ve milyarlarca yıl boyunca bu değişiklikler birikir ve biyolojik değişikliklerle birlikte, daha sonraki bir bölümde kitlesel

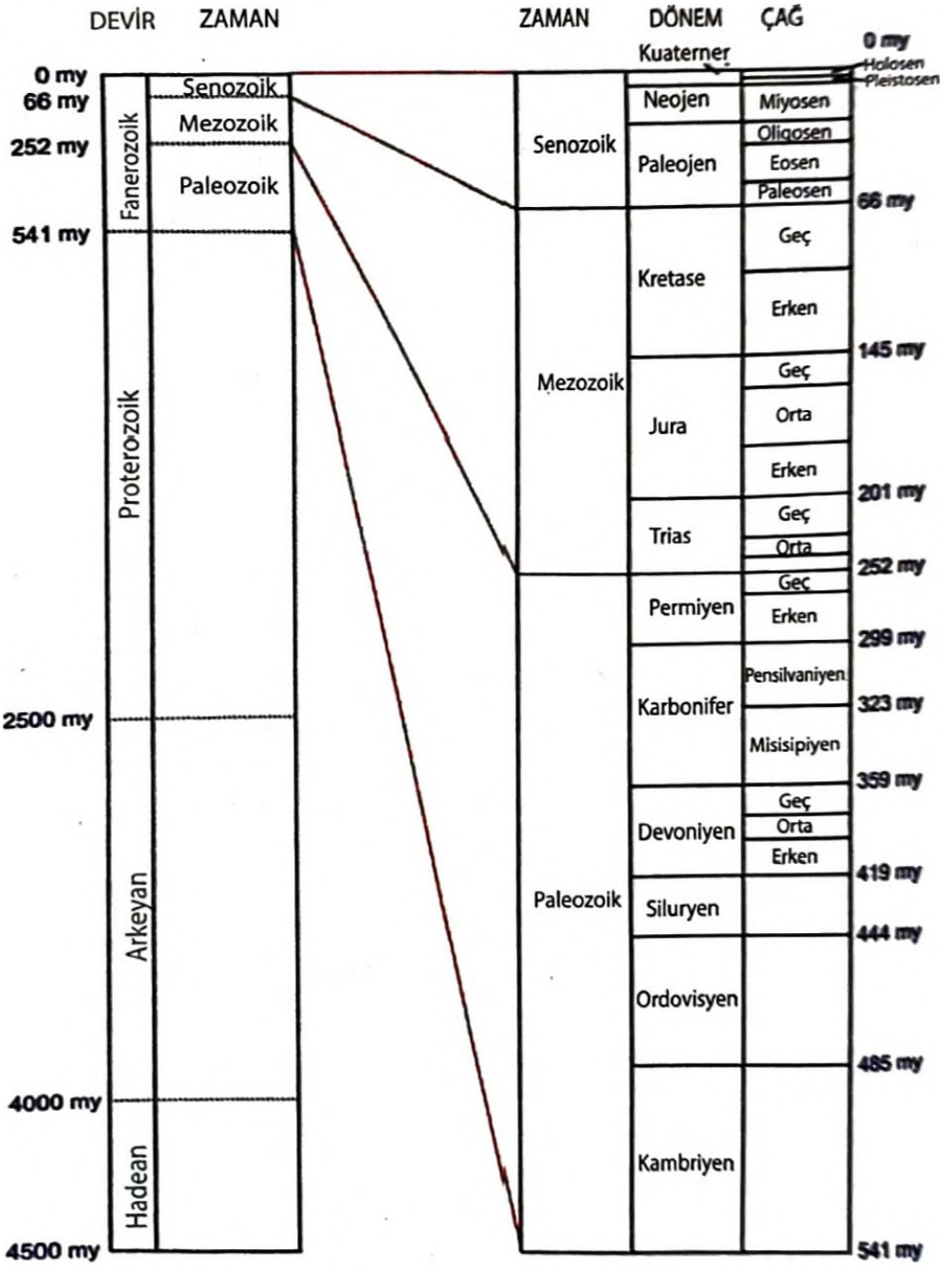


Şekil 13.16 Mars'taki bir uyuşmazlık (Sharp Dağı, Gale Krateri) şemada beyaz noktalarla gösterilmiştir. Lavın beyaz noktaların üzerinde, eski tortulların ise aşağıda olduğu düşünülüyor (Kaynak: NASA).

yok oluşları tartışırken göreceğimiz gibi jeolojik zaman periyotlarını tanımlamak için kullanılabilirler.

13.11 Jeolojik Zamanın Başlıca Sınıflandırmaları

Jeolojik zaman ölçekleri, 1800'lerde kayaçların göreceli tarihlenmesinden geliştirilmiştir. Daha yakın zamanlarda, radyometrik teknikler, bilim insanlarının birimlerin mutlak yaşlarını daha büyük bir doğrulukla belirlemesine izin verdi. Victoria döneminde İngiliz bilim insanlarının fosil avcılığı ve jeolojik sınıf-



Şekil 13.17 Jeolojik zamanın hiyerarşileri (Kaynak: Charles Cockell).

landırmayla özel bir ilgisi olduğundan, isimlerin çoğu İngiltere'deki bölgelere (örneğin Devonshire adı Devoniyen'den gelmektedir) aittir.

Jeolojik zamanlar, bir bakıma Linnean tür sınıflandırması gibi bir hiyerarşi içinde düzenlenmiştir (Şekil 13.17).

Jeolojik zamanın en büyük alt bölümü devirdir (Eon). Dört ana devir Hadean, Arkeyan, Proterozoik ve Fanerozoik'tir. Bazen Hadean, Arkeyan ve Proterozoik, Prekambriyen adı verilen bir süperdevirde (supereon) bir araya toplanır.

Bir sonraki seviyede, devirler zamana (Era) bölünür. Örnek olarak, Fanerozoik Devrin (sizin ve benim içinde yaşadığımız) Paleozoik (en eski zaman), Mezozoik ve yine sizin ve benim içinde yaşadığımız en genç zaman olan Senozoik olarak bölünmesi verilebilir.

Zamanların kendileri de dönemlere (Periyot) bölünmüştür. Fanerozoik'te en eski dönem Kambriyen'dir. Fanerozoik'in en son dönemi ise Kuvaterner'dir.

Son olarak, bu dönemleri çağlara (Epoch) ayırabiliriz. Kuvaterner döneminin kendisi, Pleistosen ve Holosen olmak üzere iki çağa bölünmüştür.

Özetle, sen ve ben, Fanerozoik devrin Senozoik zamanının Kuaterner döneminin Holosen çağında yaşıyoruz.

13.12 Bazı Jeolojik Zamanlar ve Meydana Gelen Biyolojik Değişiklikler

13.12.1 Prekambriyen

Daha önce tartıştığımız gibi, jeolojik zaman periyotları genellikle kayaç kayıtlarındaki değişikliklerle tanımlanır. Örneğin, Kretase'nin sonu, Bölüm 15'te tartışacağımız gibi, kayaçlarda bir kitlesel yok oluşla bağlantılı olan belirgin bir değişiklikle tanımlanır. Şaşırtıcı olmayan bir şekilde jeolojik zaman periyotları, bir dereceye kadar Dünyadaki mevcut biyolojide meydana gelen büyük değişikliklerle ilişkilidir çünkü genellikle kayaç kayıtlarındaki değişikliklere yansıyan çevresel değişikliklere gezegendeki baskın yaşam formlarındaki büyük değişiklikler eşlik eder. Az önce incelediğimiz sınıflandırma şemasına ve bunların biyolojiyle nasıl ilişkili olduğuna ilişkin olarak bazı önemli jeolojik zaman periyotları hakkında bazı gözlemler yapmaya değer.

Jeolojik zaman, Hadean, Arkeyan ve Proterozoik'i kapsayan süperon olan Prekambriyen'le başlar. Prekambriyen zaman, Dünya tarihinin yaklaşık %88'ini kapsar. Bu süre zarfında, yeryüzünün biyotası yalnızca mikroorganizmalardan oluşuyordu.

Proterozoik sırasında meydana gelen son derece etkili bir değişiklik, gezegeni kökten değiştiren 2,4 milyar yıl önceki oksijendeki bir artış olan Büyük Oksidasyon Olayıydı. Bir sonraki bölümü bunu daha detaylı inceleyerek geçireceğiz. Bu önemli bozulmaya rağmen, Prekambriyen'i Dünyanın mikrobiyal egemenliği dönemi olarak nitelendirebiliriz. Daha önceki bölümlerde tartışıl-

dığı gibi, Bölüm 5'te tartışılan çeşitli mikrobiyal metabolizmaların nasıl ve ne zaman ortaya çıktığını bilmiyoruz. Hepsi, ilk Arkeyan Dünyasında çok hızlı bir şekilde ortaya çıkmış olabilir ve sonraki iki milyar yılı rafine ederek ve evrimleşerek geçirebilirdi, ancak genellikle fazla değişmedi. Alternatif olarak, Prekambriyen sadece metabolizmalarda değil, aynı zamanda çekirdek algılama, mikrobiyal iletişim ve mikrobiyal dünyanın diğer yönlerinde de uzun bir sürekli yenilik dönemi olabilirdi.

13.12.2 Fanerozoik: Hayvanların Ortaya Çıkışı ve Karmaşıklık

541 milyon yıl önce Proterozoik'ten (Prekambriyen'in son çağı) Fanerozoik'e geçerken, Dünyanın biyolojisinde büyük değişiklikler meydana gelmeye başlar. Fanerozoik, Prekambriyen'den sonra başlar ve genellikle çok hücreli organizmaların ortaya çıkışı ve yaygınlaşmalarıyla ilişkili devirdir. Fanerozoik, her biri kendi karakteristik jeolojisine ve biyolojisine sahip olan üç zamana bölünmüştür.

13.12.2.1 Paleozoik Zaman

İlk olarak Paleozoik Zaman (541–252 milyon yıl önce) var. Paleozoik 'antik yaşam' anlamına gelir. Bu zamanın ilk dönemi Kambriyen, Dünya kıtası **Rodinia**'nın ayrılmasıyla başladı ve Dünyanın levhaları bir kez daha bir araya geldiği için yeni bir Dünya Kıtası, **Pangea**'nın oluşumuyla kapandı.

Bu süre zarfında ilk çok hücreli organizmalar fosil kayıtlarında görünür hale gelir. Bu fosiller ilk önce Güney Avustralya'da bulunan Flinders Range'teki Ediyakaran tepelerinde gözlendi ve bu fosiller esrarengiz (Şekil 13.18). Birçok simetrik vücut planının deney yapıldığı bir zaman olduğunu düşünen bir radyal, yaprak benzeri ve doğrusal solucan benzeri biçimler çeşitliliği gösterirler. Yaklaşık 575 milyon yıl önce görünen Ediyakaran Faunası, kesinlikle Dünyadaki ilk çok hücreli ökaryotlar değiller, ancak bir dizi hayvan formu için ilk fosil kanıtlarıdır. Boyutları birkaç santimetreden bir metrenin üzerine kadar değişir ve bilateral vücut planları olan organizmalar için ilk kanıtlarla yaklaşık 20 milyon yıl sonra takip ederler.



Şekil 13.18 Ediyakaran'ın esrarengiz yaratıkları ve vücut planları (Kaynak: Wikicommons, Ryan Somma).

Ediyakaran Faunası, Kambriyen patlamasının organizmalarına yol açar. Yaklaşık 542 milyon yıl önce, hayvan yaşamının fosil kaydında kayda değer bir artış meydana gelir, bu

organizmaların kaya kaydındaki korunmasını iyileştiren iskeletlerin evrimine kısmen atfedilebilir. Faunadaki bu genişleme, çeşitli küçük kabuklu solucanlar ve diğer organizmalardan oluşan küçük shelly faunayla (SSF) başlar. Bunlar fosil faunasında büyük bir genişlemenin öncüsüdür. Chengjiang biyota, Yunnan Eyaleti, Çin ve Kanada'daki biraz genç Burgess Şeyli (Şekil 13.19), bu fosillerin tek yerleri olmasa da, Kambriyen Faunasının en iyi örneklerini korur.

Kambriyen dönemi büyük deniz ortamlarında yaşayan eklembacaklıların çok bulunmasından dolayı halk arasında Trilobitlerin Çağı olarak da bilinir (Şekil 13.20). Fosil kayıtlarında en az 15.000 bilinen tür var. Permiyenlerin sonuna doğru permiyen kütle tükenmesi tarafından tahrip edilene kadar deniz habitatlarına egemen oldular. Echinoderms (bugün deniz kestaneleri ve denizyıldızı dâhil) ve süngerler de dâhil olmak üzere Kambriyen Faunasında temsil edilen birçok grup vardı. Kambriyen ayrıca kendi şubemizin ortaya çıkışını gördü, omurgalıların (omurgalı akorların) bir alt şube olduğunu gördü. Küçük kurbağa benzeri yaratıklar, bir gün tüm gezegen yüzeyini kolonize edecek geniş omurgalıların ortaya çıkışı için sahneyi belirlemiştir.

Kambriyen-Ordovisyen sınırını tanımlayan bu yaşam biçimlerinin bir kısmının neslinin tükenmesi, Kambriyen patlamasını izleyen Büyük Ordovisyen Biyoçeşitliliği Etkinliği (GOBE) olarak adlandırılan deniz yaşamı çeşitliliğinde devam eden bir artış izledi.

Paleozoik sırasında erken kara bitkileri geliştirildi. En erken bitkilerin alglerden geliştiği düşünülmektedir. Aslen havuzlarda ve kıtalardaki su kütlelerinde yaşanan periyodik çölleşme, erken bitkilerin kalın hücreler duvarları geliştirmesi, kurutulmaya karşı dayanıklı erken yapraklar ve kökleri yüzeyin altında su ve besinler elde etmek için bir seçim baskısı sağlayacaktır. Bu yapısal yenilikler, çok hücreli organizmaların sudan karaya kadar kalıcı transferi



*Şekil 13.19 Örnek bir kambriyen fosili (*Ottoia Prolifica*), Burgess Şeyli'nden bir tür deniz omurgasızı* (Kaynak: Wikicommons, Wilson 44691).

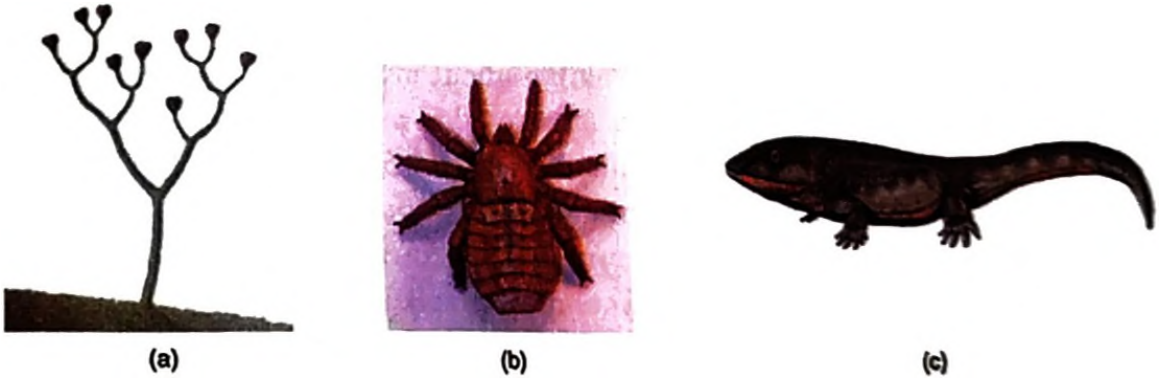


Şekil 13.20 Trilobitler. Kambriyen'in her yerde bulunan deniz sakinleri. Burada yaklaşık 500 milyon yıl önce yaşayan paradoksitler adı verilen bir türü gösterilir. Bu örnek yaklaşık 10 cm uzunluğundadır.

için birer zorunluluktu. Bu bitkilerin en eskisi, birkaç milimetreden birkaç santimetre uzunluğa kadar büyüyen ve ilk kez 425 milyon yıl önceki kayaç kayıtlarında görünen, silindirik bir bitki olan *Cooksonia*'yı (Şekil 13.21) içermektedir. Fosil kayıtlarındaki kökler için ilk kanıtlar yaklaşık 400 milyon yıl öncedir. Yaklaşık 410 milyon yıldan beri seçkin fosilleri koruyan İskoçya'nın Rhynie Çörtleri, en az yedi bitki türünü içerir ve *Cooksonia*'nın görünümünden bu yana bitkilerin çeşitliliğini önerir. Bitkiler hemen hemen kesinlikle kara kütlelerinin ilk sakinleri değildi. Weng'an, Güney Çin'deki Doushantuo oluşumunun (635–551 milyon yıl) olağanüstü korunmuş fosilleri, Prekambriyen ve Kambriyen'deki kara kütlelerinde likenlerin varlığını göstermektedir. Mikrobiyal tabakalar ve kayaçların üzerindeki mikroorganizmaların serbest yaşamı biyofilmler, muhtemelen Prekambriyen döneminde bu süre zarfından önce kıtaların üzerinde büyüyordu. Bununla birlikte araziyi büyük ölçüde istila eden ilk çok hücreli organizmalar muhtemelen bitkilerdi.

İlk böcekler bitkileri hızla takip ederek kara kütlelerini istila etti. Lake Bölgesinden kayaların bulunduğu fosil kanıtları, İngiltere, yaklaşık 470 milyon yıl öncesinden 410 milyon yıl önceye kadar, İngiltere Shropshire'daki fosiller, örümceklerin, dev akreplerin ve kırılganların kolonize toprakları olduğunu gösteriyor. Soyu tükenmiş ve örümcekten çok böceğe benzeyen bir görünüme sahip sekiz bacaklı bir hayvan olan trigonotarbidler (Şekil 13.21), zamanın baskın bir omurgasızıydı. Yaklaşık 335 milyon yıl öncesinde, böceklerin yusufçukların fosilleri ve diğer hava böcekleriyle birlikte gökyüzüne çıktıklarına dair kesin bir kanıt var.

Yaklaşık 350 milyon yıl önce bitki ve böcek istilası o kadar büyüktü ki, Dünya muazzam ve biyolojik olarak verimli ormanlarla kaplıydı. Bu Karbonifer (359–299 milyon yıl önce) ormanları sonunda sığ suda korunarak Sanayi Devrimini yönlendiren kömüre yol açtı. Ormanlara yosunlar, eğrelti otları ve at



Şekil 13.21 Karaların istilası. Karbonifer'le birlikte bitkiler, böcekler ve erken tetrapodlar karayı istila etti. (a) En erken bitkilerden birinin (Cooksonia) *bir sanatçı tarafından imgelenmesi.(b) Sekiz bacaklı omurgasız trigonotarbidlerin bir modeli* (Kaynak: Jason Dunlop). *(c) Erken bir tetrapod olan* Pederpes*'in bir sanatçı tarafından imgelenmesi.*

kuyrukları hâkimdi (çiçekli bitkiler çok daha sonra ortaya çıktı ve yaklaşık 120 milyon yıl önce küresel olarak yaygınlaştı). 35 m yüksekliğindeki *Lepidodendron* da dâhil olmak üzere karbonifer bitkilerinden bazıları çok büyüktü.

Karbonifer ormanları, böceklerin ve bitkilerin yanı sıra omurgalılara da ev sahipliği yapıyordu. Yaklaşık 370 milyon yıl önce, İskoçya Elgin'den gelen fosil kanıtları, ilk balık benzeri amfibilerin karada olduğunu gösteriyor. 345 milyon yıl önce, 1 m uzunluğundaki *Pederpes* (Şekil 13.21) gibi kısa kuyruklu gerçek tetrapodlar karada yürüyordu. İlk tetrapodlar, sürüngenlerin ve memelilerin öncüleri oldukları için önemli bir evrimsel yenilikti.

Kara biyotasının bu yükselişi önemlidir çünkü bu organizmalar eninde sonunda yeryüzündeki yaşama hakim olacaktır. Bugün okyanuslar Dünyanın %71'ini kaplamasına rağmen, karada deniz ortamına kıyasla yaklaşık dört kat daha fazla ökaryotik tür olduğu ve Dünyada toplam sayının yaklaşık dokuz milyon olduğu tahmin edilmektedir.

Paleozoik'in sonu, tarihin en büyük kitlesel yok oluşuyla, Trilobitler de dâhil olmak üzere tüm deniz hayvanı türlerinin yaklaşık %90'ını ve kara hayvanlarının %70'ini yok eden Permiyen sonu yok oluşuyla belirlenir.

13.12.2.2 Mezozoik Zaman

Paleozoik, Mezozoik tarafından takip edilir (252-66 milyon yıl önce, *Mezozoik* 'orta yaşam' anlamına gelir). Bu zamanın başında kıtalar Pangea olarak birleştirildi, ancak bu dönemin ortasında (yaklaşık 225 milyon yıl önce) ayrılmaya başladı. Bu dönemde iklim, genellikle, Triyas (Mezozoik'in ilk dönemi) sırasında sıcak ve kuru koşullarla ve Mezozoik dönemin son döneminde Kretase'ye geçişli sıcak tropik durumlarla karakterize edilebilir. Antarktika'daki dinozor fosillerinin keşfi, zaman zaman ılık koşulların kutuplara uzatıldığı gerçeğinin kanıtıdır.

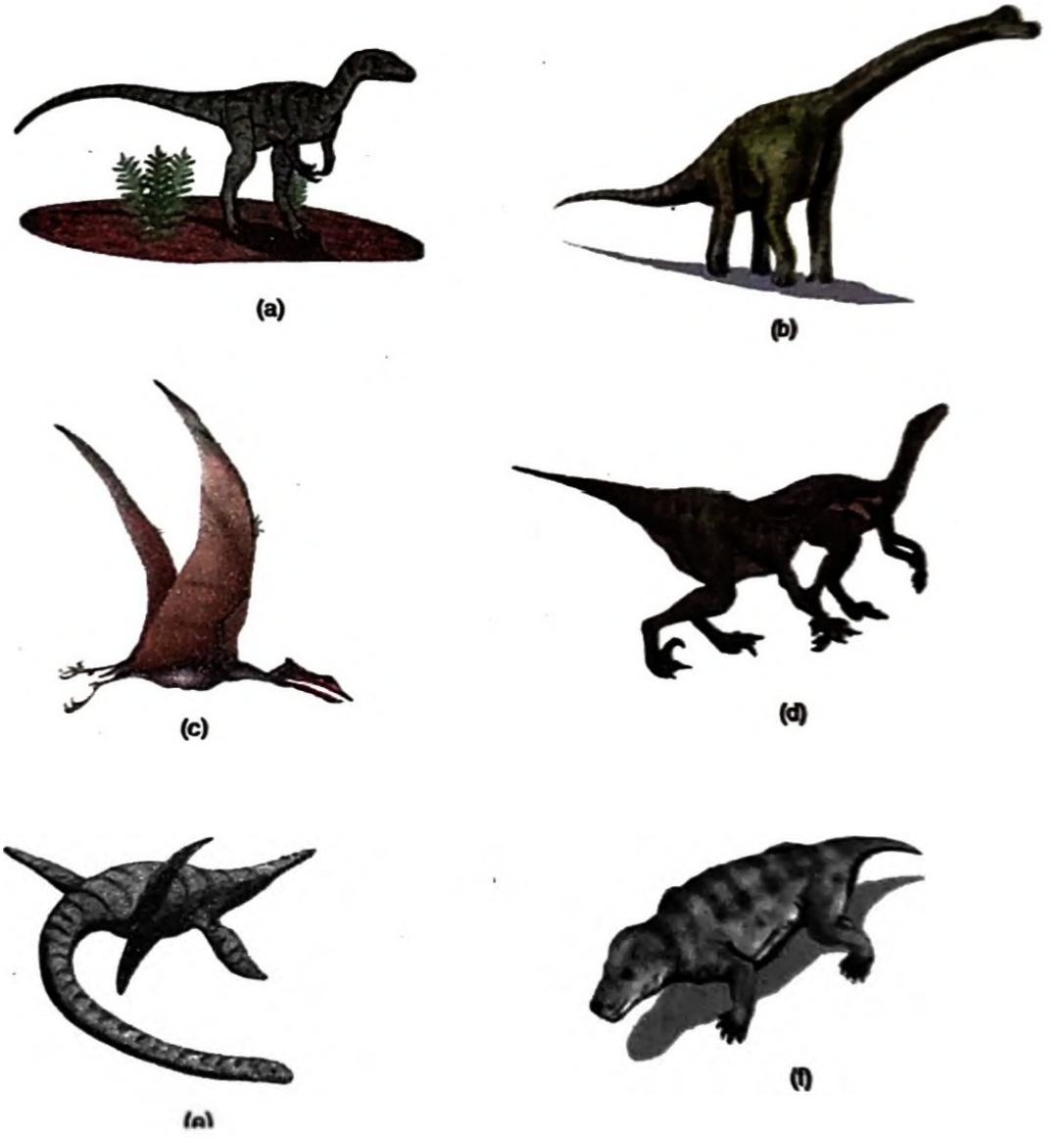
Sürüngenler, daha kuru iklimine uyum sağlama yeteneklerinden dolayı Mezozoik dönemin en bol miktarda bulunan hayvanı oldu. Deri, kabukları kurumaya karşı korunan yumurtalara bırakılan vücut sıvılarının ve embriyoların korunmasına yardımcı oldu. En eski sürüngenler muhtemelen Karbonifer'in ortalarında, *Hyalonomus* gibi 30 cm uzunluğundaki bir kertenkele benzeri, yumurtlayan organizmalardan ortaya çıkmıştır. Bir kabuk içine çevrili bir sıvı ortamı sağlayarak, yavruları saran yumurta evrimi, karadaki hayvanların gerçek bağımsızlığını işaret etti. Bu organizmalar Mezozoik'te çeşitlenir.

Sonunda, sürüngenlerin çeşitlendirilmesi o kadar iyi hale geldi ki Mezozoik aynı zamanda 'Dinozorların Çağı' olarak da bilinmektedir. (Şekil 13.22). Dinozorlar, *Archosaur*'un büyük soyunun bir parçasıydı. Bugün Archosaurs timsahlar ve kuşlar tarafından temsil edilir. Triasik dönemde ilk küçük dinozorlar ortaya çıktı. Örneğin *Eoraptor*, 1 m yüksekliğinde küçük, çevik bir dinozordu (Şekil 13.22). Jura döneminde daha büyük ve daha bol dinozorlar ortaya çıktı ve

Kretase'ye egemen hale geldi. Bunların en büyüğünden bazıları, 20 m'nin üzerinde uzunluklara ulaşan *Brachiosaurus* (Şekil 13.22) gibi Sauropod'lardı.

Sauropodların yanı sıra, muhtemelen avını kesmek için kullanılan, arka bacağında muazzam bir pençe bulunan, insan boyutunda hızlı bir yaratık olan *Deinonychus* (Şekil 13.22) dâhil olmak üzere terapodlar da evrimleşmiştir. Therapod soyu, en eski kuş olan *Archaeopteryx*'i meydana getirir.

Bu süre zarfında kanatlı pterosaurlar (dinozor soyundan gelmeyen, kanatlı sürüngenler) de dâhil olmak üzere diğer sürüngenler de önemliydi. *Quetzalco-*



Şekil 13.22 *Sanatçıların bazı Mezozoik memeli ve sürüngenlerine dair izlenimleri (a)* Eoraptor resto (Kaynak: Wikicommons, Conty). *(b)* Brachiosaurus altithorax (Kaynak: Wikicommons, Nobu Tamura). *(c)* Quetzalcoatlus (Kaynak: Wikicommons, Public Domain). *(d)* Deinonychus Antirrhopus (Kaynak: Wikicommons, Michal Manas). *(e)* Plesiosaurus Dolichodeirus (Kaynak: Wikicommons; Adam Stuart Smith). *(f) Bunun, küçük de olsa ilk memelilerin ortaya çıktığı çağ olduğunu hatırlamamak ihmalkarlık olur. Bu görüntü köpek benzeri* Thrinaxodon'u *gösterir* (Kaynak: Wikicommons, Nobu Tamura).

atlus gibi pterosaurların bazıları (Şekil 13.22), 15 m'ye kadar olan kanat kaplamalarına ulaştı.

Mezozoik boyunca, en başarılı deniz sürüngenleri, su içindeki verimli hareket için aerodinamik gövdeleri ve yüzgeçleri olan *Plesiosaurs* ve *İchthyosaur*'lardı (Şekil 13.22). Bununla birlikte, yeni plankton gruplarının, yengeçlerin ve ıstakozların ataları gibi yeni omurgasızlar ve köpekbalıkları da dâhil olmak üzere modern balıkların ortaya çıkmasıyla tüm deniz âleminde çeşitli bir devrim yaşadı.

Bu dönemde köpek benzeri *Thrinxodon* gibi (Şekil 13.22) küçük memeliler ortaya çıktı. Bunlar, sıcakkanlı hayvanlardı ve vücutları kılla kaplıydı. Cynotondia kladındaki sinodontlara ('köpek dişleri' anlamına gelir) aitlerdi ve sürüngenlerin egemen olduğu ekosistemlerin kenarında bulunan çalıları karıştırmada başarılıydılar. Diş türlerini ve kaburgalarını sadece göğüs kafelerinin önünde (sürüngenlerin aksine) farklılaştırmışlardır. Tüm modern memelilerin öncülleri olurlar.

Bu zamanın ana bitki yaşamı, açık tohumlu veya çam ağaçları gibi tohum üreten ama çiçekleri olmayan bitkilerdi. Kapalı tohumlu bitkiler (angiospermler) dönemin ortalarında ortaya çıktı ve çeşitlilik bakımından hızlı artış sağladı. Bugün bitki hayatında baskın olan form bunlardır.

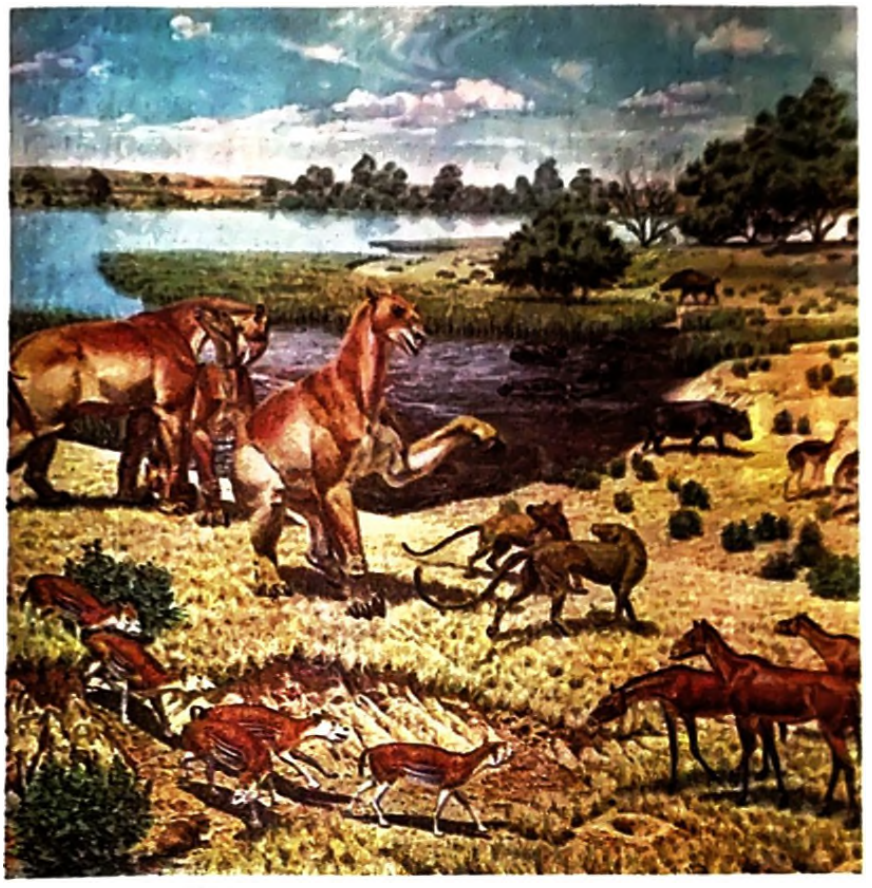
Mezozoik zaman, 65,5 milyon yıl önce kitlesel bir yok oluşla sona erdi. Dinozorlar da dâhil olmak üzere birçok hayvan grubu aniden kayboldu. Kayaç kaydındaki bu değişiklik, Kretase'nin ve Mezozoik zamanın sonunu tanımlar.

Birçok bilim insanı, bu olaya Dünyayla çarpışan bir kuyruklu yıldızın veya asteroitin neden olduğuna inanıyor. Etkisi, havayı dolduran, Güneş ışığını engelleyen geniş bir toz bulutu olacaktır. Bitkiler soğuktan ve fotosentez için ışık eksikliğinden, otçullar da bitkilerin hemen ardından öldü. Bitki yiyenleri yiyen etoburlar da öldü. Memeliler de dâhil olmak üzere birçok hayvan, bu nesli tükenme olayından kurtulanların torunlarıdır. Bu senaryo için kanıtları Bölüm 15'te daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz.

13.12.2.3 Senozoik Zaman

Mezozoik zamanı, Senozoik zaman takip ediyor (günümüzden 66 milyon yıl önce). Bu zamanda iklim, genellikle sıcak ve hafif olmuş, son birkaç milyon yılda ise buzul çağ yaşanmıştır. Balinalar ve yunuslar gibi deniz hayvanları bu dönemde gelişti. Memelilerin sayısı artmaya başladı ve birçok farklı ortamda –karada, havada, denizde– sürüngenlerin boşalttığı nişlerde yaşamalarını sağlayan uyarlanımları geliştirmeye başladılar. Çimler çeşitlilik ve bolluk olarak arttı ve otlak hayvanlar için bir gıda kaynağı sağladı.

Avrupa'daki Alpler, Hindistan'daki Himalayalar ve Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Rocky Dağları dâhil olmak üzere Senozoik zamanda birçok dağ aralığı oluştu. Bu dağların büyümesi, Buzul Çağ Senozoik zamanın (Kuaterner



Şekil 13.23 Senozoik'in (66 milyon yıl önceden bugüne kadar) Miyosen çağının (23.030–5.333 milyon yıl önce) bazı memeli türlerini betimleyen ve daha genel olarak, sürüngenlerin yok oluşundan sonra memelilerin artık baskın olduğu Dünyayı gösteren bir görüntü. Merkezin solundaki büyük hayvanlar, atlar ve develerle (toynaklılar) ilgili bir grup otçul memeli olan soyu tükenmiş chalicothere'*ler.*

dönemde) geç döneminde oluştuğundan iklimin soğumasına yardımcı olmuş olabilir. Dağlıkların, kayaç aşındırma reaksiyonlarının olduğu, sera gazı CO_2'yi (Bölüm 16) tüketen, böylece soğumaya neden olan geniş bir taze kayaç yüzeyleri sağladığı düşünülmektedir. İklim değiştikçe hayvanlar, buzulların erimesinden meydana gelen okyanusların yükseliş ve düşüşlerine uyum sağlamak zorunda kaldılar. Bu dönem bazen 'Memelilerin Çağı' olarak adlandırılır (Şekil 13.23). Senozoik zaman, Bölüm 21'de geri döneceğimiz gibi, biyolojinin modern insan-



Şekil 13.24 Senozoik biyoloji. Yörünge dinamiklerini hesaplayabilen ve evrimleştiği gezegeni terk edebilen, alet yapma becerisine sahip bir kuyruksuz maymun ortaya çıkıyor (Kaynak: NASA).

ların evrimi de dâhil olmak üzere bugüne kadar aşina olduğumuz şekillere ve formlara dönüştüğünü görmektedir.

İnsanların alet geliştirme kabiliyeti (Şekil 13.24) ile Dünya gezegenindeki endüstriyel aktivitenin yol açtığı değişiklikler çarpıcı olarak değerlendirilmiş ve yeni bir jeolojik dönemin tanımlanması gerektiği öne sürülmüştür: Antroposen.

Tartışma Noktası: Antroposen

Jeolojik zaman periyotları genellikle kayaç kaydındaki değişikliklerle tanımlanır. Genellikle bu değişikliklere gezegendeki biyotada büyük değişiklikler eşlik eder, belki de en iyi örneklerden biri dinozorları ve diğer birçok kara ve deniz organizmasını yok eden Kretase sonu neslinin tükenmesidir. Gezegende yaklaşık yedi milyar insanımız ve şu anda gezegen atmosferinin bileşimini değiştiren endüstriyel faaliyetlerimizle, jeolojik zamanda yeni bir dönem tanımlamamız önerildi: Antroposen. Bu Epoch, Holosen'den devam edecekti. Sizce bu makul mü? Dünyanın geçmiş tarihinde değişen jeolojik dönemlerle, çağları ve çağları tanımlayan faktörlerle tutarlı mı? İnsan uygarlığının yükselişinden bu yana Dünyada değişen ve bunun neden olduğu bazı önemli faktörleri sıralayabilir misiniz? Yeni bir çağı hak ediyorlar mı?

Crutzen, P.J. (2002) The geology of mankind. *Nature* **415**, 23.

Steffen, W., Persson, A., Deutsch, L. et al. (2011) The Anthropocene: from global change to planetary stewardship. *Ambio*, doi: 10.1007/s13280-011-0185-x

13.13 Sonuç

Dünyanın iç yapısı, gezegenin yüzeyinin jeolojik zaman dilimlerinde hareket eden levhalardan oluştuğu şekildedir. Levhaların hareketinin jeosfer, hidrosfer, atmosfer ve biyosfer için sonuçları vardır. Levha tektoniği ve bozunma gibi diğer süreçler tarafından farklı kayaç türlerinin değiştirilme şekli kayaç döngüsüyle tanımlanabilir. Levha tektoniği diğer gezegenlerde mutlaka meydana gelmese de, kayaç döngüsü, örneğin erozyon ve tortullaşma, özellikle sıvı su bulunan yerlerde gerçekleşmesini bekleyeceğimiz diğer gezegenlerde de birçok yönden kayaçların kaderini tanımlar Kayaçları tarihlemek için hem mutlak hem de bağıl yöntemler kullanılarak çeşitli yöntemler kullanılabilir. Jeolojik zamanın artan ayrıntı hiyerarşilerine bölünmesi, biyolojideki filogenetiğe bir şekilde benzer ve jeolojik bilginin sistematik bir sıralamasına izin verir. Bu yaklaşımlar, Dünyada olduğu gibi diğer gezegenler için de geçerlidir. Son yıllarda, bazı bilim insanları, insan endüstriyel faaliyetinin Dünya gezegeni üzerindeki etkisinin çok büyük olduğunu ve yeni bir çağın Antroposen olarak tanımlanması gerektiğini öne sürdüler.

İleri Okumalar

Kitaplar

Canup, R.M., Righter, K. (2000) *The Origin of the Earth and Moon.* Arizona Üniversitesi Yayınları, Tucson.

Hazen, R.M. (2013) *The Story of Earth: The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet.* Penguin Books, London.

Yayınlar

Burke, K. (2011) Plate tectonics, the Wilson cycle, and mantle plumes: geodynamics from the top. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science* **39**, 1–29.

Favilli, F., Egli, M., Brandova, D., Ivy-Ochs, S., Kubik, P., Cherubini, P., Mirabella, A., Sartori, G., Giaccai, D., Haeberli, W. (2009) Combined use of relative and absolute dating techniques for detecting signals of Alpine landscape evolution during the late Pleistocene and early Holocene. *Geomorphology* **112**, 48–66.

Hazen, R.M., Papineau, D., Bleeker, W., Downs, R.T., Ferry, J.M., McCoy, T.J., Sverjensky, D.A., Yang, H. (2008). Mineral evolution. American Mineralogist 93, 1693–1720.

Hawkesworth, C.J., Kemp, A.I.S. (2006) Evolution of the continental crust. Nature 443, 811–817.

Karson, J.A. (2002) Geologic structure of the uppermost oceanic crust created at fast- to intermediate-rate spreading centers. Annual Reviews in Earth and Planetary Sciences 30, 347–384.

Pisani, D., Poling, L.L., Lyons-Weiler, M., Hedges, S.B. (2004) The colonization of land by animals: molecular phylogeny and divergence times among arthropods. BMC Biology 2, doi:10.1186/1741-7007-2-1.

Rosing, M.T., Bird, D.K., Sleep, N.H., Glassley, W., Albarede, F. (2006) The rise of continents–an essay on the geologic consequences of photosynthesis. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 232, 99–113.

Valentine, J.W., Jablonski, D., Erwin, D.H. (1999) Fossils, molecules and embryos: new perspectives on the Cambrian explosion. Development 126, 851–859.

Wagner, G.A., Krbetschek, M., Degering, D., Bahain, J.-J., Shao, Q., Falguères, C., Voinchet, P., Dolo, J.-M., Garcia, T., Rightmire, G.P. (2010) Radiometric dating of the type-site for Homo heidelbergensis at Mauer, Germany. Proceedings ofthe National Academy of Sciences 107, 19726–19730.

Walker, J.D., Geissman, J.W., Bowring, S.A., Babcock, L.E. (2012) Geologic Time Scale v. 4.0. Geological Society ofAmerica, doi: 10.1130/2012.

Watanabe, Y., Martini, J.E.J., Ohmoto, H. (2000) Geochemical evidence for terrestrial ecosystems 2.6 billion years ago. Nature 408, 574–578

14

OKSİJENİN ARTIŞI

Öğrenme Çıktıları

- Erken Dünyadaki oksijen konsantrasyonunun düşük olduğunu nasıl bildiğimizi açıklamak.
- Dünyadaki başlıca oksijen kaynaklarını ve çukurlarını anlamak.
- Dünya tarihi boyunca neden ani oksijen artışlarının meydana geldiğine dair bazı teorileri tanımlamak.
- Kartopu Dünyası kavramını ve bu olayların nasıl meydana geldiğini ve sonrasında nasıl tersine döndüğünü açıklamak.
- Oksijenin artışının yaşam açısından sonuçlarını açıklamak.
- Oksijenin artışını çok hücreli canlıların ortaya çıkışına ve nihayetinde zekâ sahibi canlılara bağlayan bazı fikirleri açıklamak.

14.1 Dünyadaki Çarpıcı Değişimler

İnsan ömrünün kısalığı göz önüne alındığında, Dünya tarihinin neredeyse değişmez olarak görülme eğilimi vardır. Bununla birlikte, gezegenin tarihi boyunca bazı çarpıcı olaylar meydana gelmiştir. Kitlesel yok oluşlar, karaların kolonizasyonu, hayvanların ortaya çıkışı –tüm bu olaylar Dünya sistemindeki büyük evrimsel geçişler ya da bozulmalar olarak kabul edilirler. En önemlisi, bu değişikliklerden bazılarına yaşamın kendisi neden olmuştur.

Bu değişikliklerin her biri kendi içinde bir ders kitabını işgal edecektir, ancak burada sadece gezegeniyle birlikte gelişen bir biyotayı şekillendirebilecek çeşitli önemli olayları açıklamakla ilgilenmiyoruz. Evrendeki herhangi bir gezegende yaşamın ortaya çıkması için etkileri olabilecek belirli değişiklikleri belirlemek ve bir biyotanın bir gezegendeki çevresel koşulları etkileyebileceği derin yolları tanımlamak istiyoruz.

Belki de Dünya tarihi boyunca meydana gelen en önemli çevresel değişikliklerden biri, atmosferik oksijendeki artıştır. Yaklaşık 2,4 milyar yıl önce (Büyük Oksidasyon Olayı) ve yine yaklaşık 700 milyon yıl önce, Dünya atmosferinde bugün bildiğimiz seviyelere yol açan çarpıcı bir oksijen artışı oldu.

Bölüm 10'da tartıştığımız gibi, erken Dünyanın atmosferik bileşimi, ilkel uçucu madde envanterinden çıkan CO_2, N_2, H_2, CH_4, SO_2, H_2S gibi bir dizi gazın egemen olduğu bir atmosfere sahipti. Bu sırada oksijen konsantrasyonları ihmal edilebilir düzeydeydi. Ancak, Dünya tarihinin bir noktasında, Bölüm 5'te incelediğimiz gibi, atık ürün olarak oksijenin serbest bırakılmasıyla birlikte enerji (ATP) üretimini yönlendirmek için suyu elektron vericisi olarak kullanma özelliğine sahip olan oksijenli fotosentez gelişti.

Bugün, Dünya atmosferindeki oksijen konsantrasyonu %20,95'tir ve bu gaz, bu kitabın yazarı da dâhil olmak üzere neredeyse tüm çok hücreli organizmalara güç sağlayan oksijenli solunumdaki elektron alıcısıdır. Bu son yorum, hiç de uçarı ve manasız değildir. Bu ifadede bir sebep-sonuç ilişkisi olduğunu varsayarsak, oksijenin artışının bu gezegende ve potansiyel olarak diğerlerinde zekâ sahibi canlıların ortaya çıkışı için gerekli olduğunu söylüyoruz.

Zekâdan bağımsız olarak, oksijenli solunum, üretken kemoheterotrofik biyosferin çoğuna güç sağlar ve gezegendeki biyokütle onsuz daha küçük olurdu. Bölüm 5'ten, oksijensiz metabolizma türlerinin tipik olarak oksijenli solunumdan yaklaşık on kat daha az enerji ürettiğini hatırlayacaksınız.

Bu noktalar bizi hemen asıl sorumuza getiriyor: Erken Dünyanın düşük oksijenli atmosferinden, son derece üretken, oksijenli solunum yapan flora ve faunasıyla günümüz gezegenine nasıl geldik? Bu geçişe hangi faktörler neden oldu ve bu geçişin gezegen ve yaşam açısından sonuçları nelerdi? Oksijenin artışı bazen halk ağzında tüm zamanların en büyük kirlilik olayı olarak anılır. Bu pek de adil bir yorum değil çünkü oksijenin artışının arkasındaki organizmalar (siyanobakteriler) atmosferi kirlettiklerini pek bilmiyorlardı, ancak yine de bu olayın bütün önemini yeterince anlatıyor.

Bu bölümde, bir gezegenin yaşam koşullarındaki değişikliklerin ve yaşam ile gezegen çevresinin birlikte evriminin önemli bir örneği olarak bu değişikliği daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz.

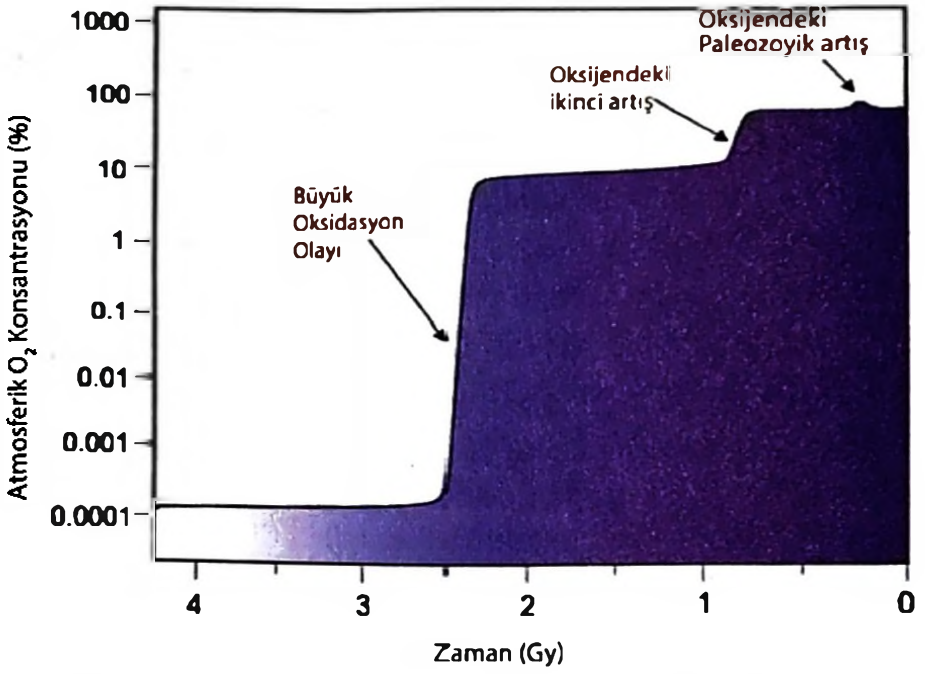
14.2 Zaman İçerisinde Oksijenin Ölçümü

Oksijen konsantrasyonlarının zaman içinde değiştiğini nasıl biliyoruz? Bilim insanlarının geçmişteki atmosferik gazları ölçmek için kullandığı birkaç yol vardır. Bu yollardan biri, buz çekirdeklerinden gaz çıkarmak ve konsantrasyonu ölçmektir. Bu, Antarktika buz çekirdeklerindeki CO_2 çalışmasında başarıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak bunlar bizi yalnızca yüzbinlerce yıl geriye götürebilir. Elimizde Dünyanın erken dönemlerinden kalan buzlar yok.

Bunun yerine, bilim insanları jeolojik temsilcilere güveniyorlar. Jeolojik temsilciler, oluştukları ortam hakkında bize bir şeyler söyleyebilecek kayaçların, minerallerin veya bileşiklerin sahip olduğu özelliklerdeki değişikliklerdir. Kısacası temsilci, doğrudan ölçemeyeceğimiz bir şey hakkında bilgi sağlayan

bir tür ölçümdür. Dünya tarihinin uzak geçmişindeki oksijen bolluğuna dair temsilciler toplamak için kayaç kayıtlarına bakıyoruz.

Bu jeolojik temsilciler, Dünyanın tarihi boyunca en az iki büyük oksijen artışı (ve tartışacağımız bu iki büyük artıştan bu yana konsantrasyondaki diğer değişiklikler) yaşadığını göstermektedir. İlk değişiklik yaklaşık 2,4 milyar yıl önce gerçekleşti. O zamandan önce, atmosferdeki oksijen konsantrasyonları önemsizdi, muhtemelen mevcut atmosferik seviyenin 10^{-5} katından çok daha azdı (ve potansiyel olarak mevcut atmosferik seviyenin 10^{-15} katı kadar düşüktü). Paleoproterozoyik'teki ilk artış (Proterozoyik'in 2,5 ila 1,6 milyar yıl önceki ilk çağı), oksijen konsantrasyonlarını günümüz seviyelerinin küçük bir yüzdesine taşıdı. Neoproterozoyik'te (Proterozoyik'in son dönemi, 1 milyar yıldan 541 milyon yıla kadar olan dönem), yaklaşık 700 milyon yıl önce, oksijen seviyelerinde ikinci bir artış meydana geldi. Oksijen konsantrasyonları, bugünkü seviyesine ulaşmasına yol açan bir artış veya artışlarla birlikte, bugünkü seviyesinin en az %10'una yükseldi. Günümüze yakın bir dönem olan Paleozoyik'te, oksijen konsantrasyonlarının günümüz değerlerinin üzerine (yaklaşık %30) çıktığına dair kanıtlar vardır. Şekil 14.1'de, Dünyanın tarihi boyunca atmosferik oksijen konsantrasyonlarının ana modellerini gösteren bir şema görebilirsiniz.



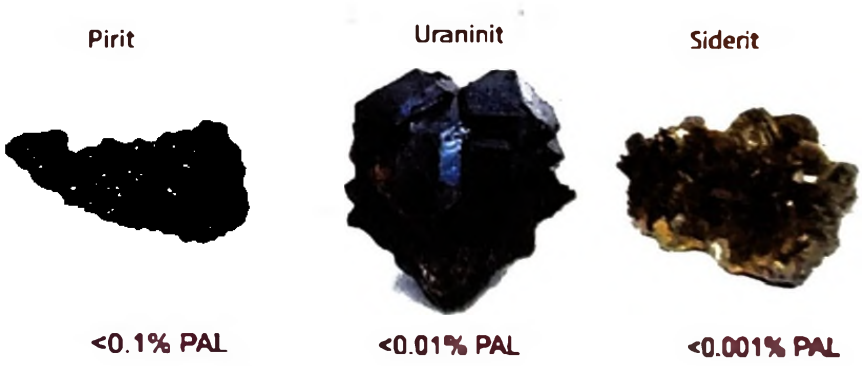
Şekil 14.1 Zaman içinde karasal atmosferik oksijenin tarihini gösteren şematik. Grafik, Paleozoyik'te oksijendeki iki büyük artışı ve bir oksijen nabzını göstermektedir. y ekseni logaritmik bir ölçektir. Yaklaşık 2,4 milyar yıl öncesine ait bir değer üst sınırdır (Kaynak: Charles Cockell).

14.2.1 Düşük Oksijen Konsantrasyonlarında Oluşan Mineraller

Oluşumları oldukça spesifik oksijen konsantrasyonlarıyla ilişkili olan minerallerin yaygınlığına bakmak, oksijen konsantrasyonlarını anlamanın çok etkili bir yoludur. Oksijen konsantrasyonları farklı ortamlarda çok değişken olmasına rağmen (bugünkü Dünyada bile oksijenin hiç olmadığı veya çok az olduğu çok sayıda yeraltı ortamı vardır), farklı minerallerin bolluğuna ilişkin genel eğilimler, küresel koşullar hakkında önemli bilgiler sağlayabilir.

Düşük oksijen konsantrasyonlarında oluşma eğiliminde olan minerallerin bir örneği (Şekil 14.2), genellikle Mevcut Atmosfer Seviyesinin (veya PAL*) %0,1'inden daha düşük bir oksijen konsantrasyonunda oluşan pirittir (demir sülfür, FeS_2). PAL teriminin mutlak oksijen yüzdesi değil, %20,95 olan mevcut atmosferik seviyenin bir yüzdesi olduğuna dikkat edin. Bu nedenle %10 PAL, %2,1'lik bir oksijen konsantrasyonu olacaktır (oksijen seviyeleri bazen mutlak konsantrasyonda veya PAL olarak ifade edilebildiğinden dikkatli olunmalıdır). Bu minerallerin bir başka örneği olan uraninit (uranyum oksit, UO_2), %0,01 PAL'den daha düşük oksijen konsantrasyonlarında oluşur. Siderit (demir karbonat; $FeCO_3$), %0,001 PAL veya daha azında oluşur. Özellikle bu oksitlerin tortullarda biriken mineraller olan kırıntılı minerallerdeki konsantrasyonlarına bakabiliriz. Bu mineraller, tortulların maruz kaldığı atmosferik koşulları yansıtırlar. Modern nehirlerde pirit, uraninit ve siderit, taşıma sırasında tamamen oksitlenir ve bu nedenle kırıntılı tortullarda bulunmazlar.

Bu minerallerin tümü, yaklaşık 2,4 milyar yıl öncesindeki tortullarda daha yaygındır ve o sırada atmosferdeki düşük oksijen konsantrasyonlarının genel koşullarını ortaya koyarlar.



Şekil 14.2 Mevcut Atmosfer Seviyelerinin altındaki düşük oksijen konsantrasyonlarında oluşumu tercih edilen mineraller (PAL; Kaynak: wikicommons, Rob Lavinsky).

* [İng.] Present Atmospheric Level –çn.

14.2.2 Elementlerin Oksidasyon Durumundaki Değişiklikler

Oksijen konsantrasyonları için bir temsilci olarak, zaman içinde minerallerin oksidasyon durumuna veya redoks durumuna da bakabiliriz.

Bazı elementler sadece bir oksidasyon durumunda çözünür. Örneğin, demir ve manganez indirgenmiş formdayken (sırasıyla Fe^{+2} ve Mn^{+4}) daha oksitlenmiş formlarına (sırasıyla Fe^{+3} ve Mn^{+6}) kıyasla çok daha fazla çözünürler. Uranyum ve molibden, aksine, oksitlenmiş formlarında (U^{+6} ve Mo^{+6}) olduklarında, indirgenmiş formlarına (U^{+4} ve Mo^{+4}) kıyasla çok daha fazla çözünürler.

Büyük Oksidasyon Olayında demirde çarpıcı değişiklikler olduğu açıktır. Yaklaşık 2,4 milyar yıldan eski topraklar veya paleosoller, 1,8 milyar yıldan daha genç olanlara göre demir bakımından önemli ölçüde yoksundur. Bu gözlem, demirin 2,4 ve 1,8 milyar yıl önceki oksidasyon durumundaki bir değişiklikle açıklanır. 2,4 milyar yıl öncesinde demir, esas olarak suda çözünür indirgenmiş formdaydı (Fe^{+2}) ve topraktan daha kolay sızıyordu. Büyük Oksidasyon Olayından sonra, daha az çözünür (Fe^{+3}) formda, topraktan daha zor süzülür hale geldi.

Oksitlenmiş demir veya hematitten (Fe_2O_3) türetilen demir açısından zengin tortullar olan 'kırmızı yataklar', yaklaşık 2,3 milyar yıldan sonra bol miktarda artar ve bu da geniş ölçüde oksijenli koşulların var olduğunu gösterir.

Benzer özellikler manganez çalışmalarında da gözlenmiştir. Yaklaşık 2,2 milyar yıl önce okyanus tortullarında ani bir manganez birikimi meydana geldi. Nötr pH'lı deniz suyunda, O_2 çözünür Mn^{+2}'yı oksitleyerek çözünmeyen Mn^{+4} üretecek ve bu da gözlemleri hesaba katarak tortullarda çökecektir. Kimya, suyun oksijenlendiğini gösteriyor. Bu devasa birikimin sonucu insanlar için oldukça önemliydi. Kalahari manganez sahası 11 x 50 km genişliğinde ve yaklaşık 50 m kalınlığındadır. Bugün Güney Afrika'da çıkarılan manganezin çoğunun bulunduğu yer, atmosferin oksidasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkan eski tortulların şimdi nasıl ekonomik öneme sahip olduğunu gösteriyor.

14.2.3 Bantlı Demir Oluşumları ve İzotopları

Yaklaşık 2,4 milyar yıl önceki oksijen artışına ilişkin çok önemli bir kanıt, Bantlı Demir Oluşumlarıdır (BIF*'ler). BIF'ler, çört katmanları arasında parlak kırmızı demir oksit bantları içeren ayırt edici kayaçlardır (silika bakımından zengin kaya; Şekil 14.3).

BIF'lerin oluşum süreci tam olarak anlaşılamamıştır. Ancak bunların deniz suyunda demir oksitlerin çökelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Oksijence fakir bir atmosferdeki ilk sularda, çok çözünür indirgenmiş formda (Fe^{2+}) demir bulunurdu. Ara sıra bu demir, çok çözünür olmayan ve BIF'leri oluşturmak üzere su sütunundan çökeltilecek olan demir oksitlere (Fe^{+3} durumunda demir içerir) oksitlendi.

---

* [İng.] Banded Iron Formations –çn.



Şekil 14.3 Demir oksit katmanlarıyla (kırmızı; Kaynak: wikicommons, Woudloper) karıştırılmış çört katmanlarını (gri/siyah) gösteren bantlı bir demir oluşumu.

Buna hangi süreçler neden oldu? Belki de fotosentezden oksijen üreten siyanobakterilerin mevsimsel çiçek açmalarının neden olduğu suyun lokal oksijenlenmesi bir mekanizma olarak önerilmektedir. Kemootrofik demir oksitleyici bakteriler de demiri oksitlemek ve çözünmeyen demir oksitleri üretmek için başka bir aday olarak önerilmektedir. Oksijenin sülfürlerle reaksiyonundan oksijen oluşturan sülfatlardaki bir artış ek bir işleme neden olmuş olabilir. Sülfatlar okyanuslara karıştı ve sülfat indirgeyen bakteriler tarafından indirgendi. Oluşan biyolojik sülfür daha sonra indirgenmiş demire bağlandı ve derin okyanuslarda demir sülfürler oluşturdu. BIF'ler nadiren 1,8 milyar yıl öncesinde de bulunur, bu da oksijen artışının BIF oluşumunun bitiminden yaklaşık 600 milyon yıl önce meydana geldiği düşünüldüğünden, okyanusların oksijenlenmesinin yavaş ve gecikmiş bir süreç olduğunu gösterir. Bu, derin okyanusların oksijenlenmesinin yüzey sularından daha uzun sürdüğü gerçeğini yansıtabilir.

Bantlı demir oluşumları ayrıca oksijen konsantrasyonlarındaki değişiklikler için izotopik kanıtlar sunar. Bazı elementler oksitlendiklerinde sadece oksidasyon durumunu değiştirmekle kalmaz, aynı zamanda izotopik olarak parçalara ayrılır. Krom elementi, Cr^{+3}'dan Cr^{+6}'ya oksitlendiğinde parçalanabilir ve $^{53}Cr/^{52}Cr$ oranında bir artışa neden olabilir. Parçalanmış Cr izotop verileri, yaklaşık 2,8-2,6 milyar yıl öncesinde okyanus yüzey sularında Cr^{+6} birikimini gösterir, bu, atmosferik oksijendeki ilk büyük artıştan önce yüzey okyanus oksijenasyonunda olası bir geçici yükselmenin kanıtıdır.

14.2.4 Kükürt İzotop Parçalaması

Önceki bölümlerde, düşük oksijen konsantrasyonlarında minerallerin oluşumu ve korunması ile sulu ortamlarda oksijen konsantrasyonları için temsilci olarak elementlerin oksidasyon durumlarındaki değişikliklere odaklandık. Burada, hem sulu hem de atmosferik oksijen seviyelerini sınırlamak için kullanılabilecek temsilciler olarak izotopların kullanımını daha ayrıntılı olarak araştırıyoruz.

Kükürt, geçmiş oksijen seviyelerini araştırmak için önemli bir unsur haline geldi. Dört kararlı kükürt izotopu (^{32}S, ^{33}S, ^{34}S ve ^{36}S) vardır. 12. Bölümde, eski kayaç kayıtlarında yaşam kanıtı aramak için ^{32}S ve ^{34}S'nin nasıl kullanı-

labileceğini gördük. Özellikle, organizmalar tarafından ^{34}S'ye kıyasla ^{32}S'nin parçalara ayrılması veya tercihli kullanımı, mikrobiyal sülfat indirgemesi gibi biyolojik işlemlerden üretilen sülfitlerde daha yüksek bir ^{32}S konsantrasyonuyla sonuçlanır.

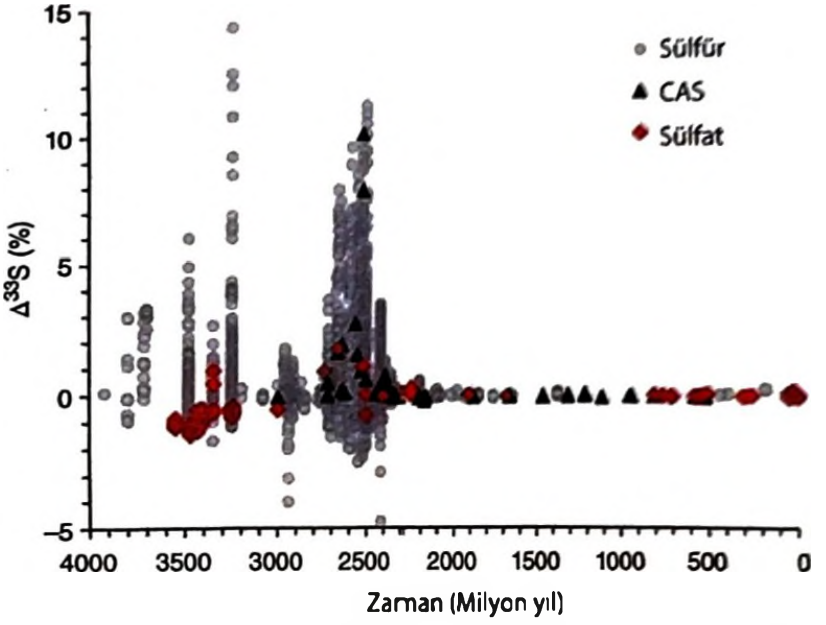
Bununla birlikte, kükürt parçalanması, ancak sülfat konsantrasyonları en az 1 mM (bir milimol) konsantrasyona ulaştığında başarılabilir. Arkeyan kayaçlarında önemli $^{34}S/^{32}S$ kükürt parçalanması olmaması, sülfat konsantrasyonlarının oldukça düşük olduğunu düşündürür ve bu, sülfat iyonları ($SO4^{-2}$) üretmek için oksitlenmiş koşullar gerektiğinden, Dünya yüzeyinin çok oksitleyici olmadığını düşündürür. 2,3 milyar yıl önce, biyolojik aktiviteye işaret eden güçlü parçalanmaya sahip kükürt mineralleri bulunabilir, bu da oksijen konsantrasyonunun arttığını ve okyanuslardaki sülfat konsantrasyonlarının yükselmesine neden olduğunu düşündürmektedir.

Eski kayaçlarda gözlenen parçalanma genellikle izotopların göreli kütleleriyle orantılıdır. Bunun nedeni, izotopların kütlesinin kimyasal tepkimelerini ve bağlarının gücünü etkileyerek hafif izotoplarda biraz daha reaktif bağlar gibi küçük farklılıklar oluşturmasıdır (Bölüm 12). Bu kütleye bağlı parçalama, yaşamı aramanın tipik bir yoludur. Örneğin kükürtte kütleye bağlı parçalanmanın, belirli bir parçalama derecesi verildiğinde, ^{33}S ve ^{32}S arasındaki parçalamanın, ^{34}S ve ^{32}S arasındakinin yarısı olmasını bekleriz.

Bununla birlikte, izotopik parçalamanın meydana gelebileceği başka bir yol daha vardır ve bu, kükürt izotoplarını kütlelerinden bağımsız olarak parçalayan bir işlemdir (kütleden bağımsız parçalama). Kütleden bağımsız parçalama sağlayabilen işleme verilebilecek bir örnek yanardağlar tarafından, özellikle kısa dalga boylu morötesi radyasyon tarafından üretilen SO ve SO_2 gazlarının ışıkla yönlendirilen bölünmesidir (fotoliz).

SO^2'nin fotolize olması için kısa dalga boylu UV radyasyonunun atmosferin derinliklerine nüfuz etmesi gerekir. Bölüm 10'da tartıştığımız gibi, atmosferik oksijen yokluğunda stratosferde ozon oluşmaz. Günümüz Dünyasında, ozon yaklaşık 295 nm dalga boyunun altındaki UV radyasyonunu emer, ancak erken Dünyada ozonun yokluğunda 200 nm'ye kadar UV radyasyonu atmosfere nüfuz edebilir ve kükürt gazlarının kütleden bağımsız parçalanmasına izin verebilirdi.

Oksijen atmosferde bir kez biriktiğinde, bunun iki etkisi olurdu: (i) sülfürlü gazlarla reaksiyona girerek sülfürik asit oluşturacak, bu da atmosferden yağmur olarak yağacak ve böylece atmosferi kükürt gazlarından arındıracak ve (ii) kısa dalga boylu UV radyasyonunu engelleyecek bir ozon kalkanı oluşturacaktı. Yaklaşık 2,4 milyar yıl öncesinde kükürt izotoplarında kütleden bağımsız parçalamanın varlığı, ancak bu belirteçlerin yaklaşık 2,4 milyar yıl önce kaybolması, atmosferdeki oksijen varlığının kanıtı olarak yorumlanır (Şekil 14.4).



Şekil 14.4 Zaman içinde kükürtün kütleden bağımsız parçalanması (MIF[*], *Δ2,4 milyar yıldan sonra $\Delta^{33}S$ sinyalinin kaybolduğunu gösteriyor. Grafik, tortul sülfürler (gri daireler), sülfatlar (kırmızı elmaslar) ve karbonat kayalarında bulunan sülfatlar olan karbonatla ilişkili sülfat (CAS*[†]*) dâhil olmak üzere farklı kükürt bileşikleri türlerinde ölçülen kükürt parçalanmasını gösterir (siyah üçgenler; Claire vd. (2014)]. Büyük delta'nın ($\Delta^{33}S$), $\delta^{33}S$'nin kütleyle orantılı olarak beklenen parçalanmasından sapması olduğuna dikkat edin.*

14.3 Büyük Oksidasyon Olayının Kanıtlarını Özetlemek

Çeşitli değişikliklerin meydana geldiği tarihlerdeki bazı belirsizlikleri kabul ederek, aslında sadece $\Delta^{33}S$ (%) incelediğimiz çeşitli kanıtlar (ve bunun dışındaki diğer kanıtlar) arasında dikkate değer bir görüş birliği vardır. Kanıtlar, oksijende ani bir artışın yaklaşık 2,4 milyar yıl önce meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 14.1). Bu, Dünyanın jeokimyasal ortamında önemli bir geçiş olan Büyük Oksidasyon Olayını işaret ediyor.

Oksijendeki artışlar için doğrulanmış kanıtlar etkileyici ve kendi içinde tutarlı olsa da, oksijendeki bu artışın neden meydana geldiği sorusunu gündeme getirmektedir. Jeolojik açıdan çarpıcı ve hızlı bir yükselişe hangi faktörler yol açtı?

Bu değişimin nasıl gerçekleştiğine dair bazı hipotezleri anlamak için, önce oksijen kaynaklarını ve çukurlarını anlamalıyız.

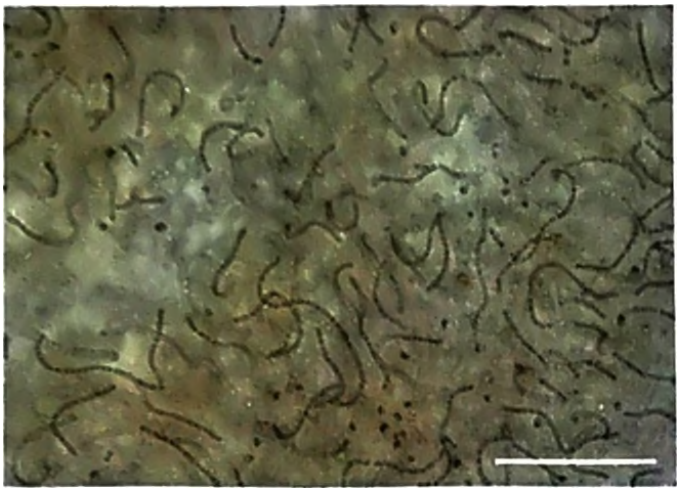
14.4 Oksijenin Kaynağı

Serbest oksijenin birincil kaynağı siyanobakteriyel oksijenik fotosentezdi (Şekil 14.5).

---

* [İng.] Mass-Independent Fractionation –çn.

† [İng.] Carbonate Associated Sulfate –çn.



Şekil 14.5 Siyanobakteriler. Atmosferik oksijendeki büyük ölçekli artıştan sorumlu birincil şüpheliler. Burada ipliksi, segmentli Nostoc *cinsinin bir türü gösterilmektedir. Ölçek çubuğu 100 μm'dir* (Kaynak: wikicommons, Gibon).

Bu organizmalar elektron vericisi olarak su kullandıkları için oksijen gazı üretilir (Bölüm 5):

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \quad (14.1)$$

Fotosentezin 3,5 ila 2,7 milyar yıl arasında ortaya çıktığı düşünülüyor, ancak kesin zamanlamanın tam olarak belirlenmesi zor. Bu tartışma için çok önemli olan, oksijenik fotosentezin Büyük Oksidasyon Olayından çok önce evrimleşmesi olasılığıdır; bu, olaydan önce siyanobakteriler tarafından üretilen oksijenin, atmosferik oksijen konsantrasyonlarında büyük ölçekli bir artışa neden olmadan önce bir şekilde silinmiş olması gerektiğini ima eder. Bu görüş, atmosferik oksijendeki büyük ölçekli artıştan çok önce var olan 'oksijen vahaları' için bir dizi kanıt tarafından desteklenmektedir. Örnekler arasında Kanada'da o sırada lokalize oksijenli su olduğunu doğrulayan 2,8 milyar yıl önceki sığ su kireçtaşları ve 2,4 milyar yıldan daha eski kayaçlardaki siyanobakteriler için biyobelirteçler sayılabilir.

14.5 Oksijen Çukurları

Oksijenin atmosferden uzaklaştırılabileceği yollar vardır. Oksijen için bu 'çukurlar,' birikme şansı bulamadan onu atmosferden temizler. İki ana süreç şunlardır:

1. Ölü organik materyalin oksidasyonu. Fotosentez için yukarıda gösterilen reaksiyon yolu iki şekilde tersine çevrilebilir. Ters reaksiyon, organizmalar tarafından enerji üretmek için elektron alıcısı olarak oksijen kullanılarak organiklerin oksitlendiği oksijenli solunum sürecidir (Bölüm 5), böylece oksijeni temizler. Ölü organizmalardan gelen organik materyal oksijen içeren bir atmosferde abiyotik olarak oksitlendiğinde de reaksiyon tersine çevrilebilir. Her iki durumda da oksijen tüketilir.
2. İndirgeyici elementler ve bileşiklerle reaksiyon. Oksijen, volkanlardan solunan hidrojen ve hidrojen sülfür gibi indirgenmiş gazlarla (Şekil 14.6) ve su kütlelerinde ferro demir (Fe^{+2}) gibi indirgenmiş elementlerle reaksiyona girer. Bu süreçte atmosferden uzaklaştırılır.



Şekil 14.6 Volkanlar, erken Dünya tarihinde atmosferik oksijeni tüketecek azaltılmış bileşiklerin (gazlar) bir kaynağıdır. Bu etkileyici patlama, 21 Nisan 1990'da Alaska'daki Redoubt Dağında meydana gelmiştir (Kaynak: USGS).

14.6 Oksijen Neden Arttı?

Önceki bölümlerde oksijenin hem kaynakları hem de çukurları olduğunu gördük. Dünyanın geçmiş tarihi boyunca oksijenin yükselmesinin, kaynaklar ve çukurlar arasındaki dengedeki bir değişiklikten kaynaklanması gerektiğini tahmin edebiliriz.

İlk fotosentetik organizmalar tarafından üretilen oksijenin çoğu, atmosferdeki volkanik gazlar ve okyanuslardaki ferro demir gibi indirgenmiş elementler tarafından silinmiş olabilir. Başka bir deyişle, oksijenli fotosentez, Büyük Oksidasyon Olayından bir süre önce meydana gelmiş olabilir, ancak oksijen bu ortamda atmosferde birikme şansı bulamamıştı.

Oksijende belirli artışlara yol açabilecek çeşitli mekanizmalar önerilmiştir. Bu fikirlerden birkaçını inceleyelim:

1. ***Mantodan dışarı salınan gazların redoks durumunda bir değişiklik oldu.*** 2,7 milyar yıl civarında bir kıta sabitlenme döneminin meydana geldiği düşünülmektedir. Bu sırada volkanizmanın, ağırlıklı olarak denizaltından kara ve denizaltı karışımına geçtiği öne sürülmüştür. Denizaltı volkanizması indirgeyici gazlar üretmede ve dolayısıyla oksijeni temizlemede daha etkilidir. Eğer katkısı azalırsa, daha az oksijen tüketilir ve birikmeye başlayabilirdi. Bununla birlikte, indirgenmiş gazların üretimindeki farkın oksijendeki artışın ölçeğini açıklayamayacak gibi görünmesi, bu teoriyle ilgili bir problemdir..
2. ***Denizsel besin kaynağında bir değişiklik oldu.*** Fosfor, bitkilerden önce tüm oksijenli fotosentezden sorumlu organizmalar olan siyanobakteriler için önemli bir besindir. Fosfor genellikle demir oksitler üzerine tutunma yoluyla sudan kaybolur. Bununla birlikte, siyanobakteriler okyanuslardaki oksijenin varlığını yerel olarak arttırdığından ve suyun oksijen açısından daha zengin olmasına neden olduğundan, demirin çökelmesine neden olurdu (Bantlı Demir Oluşumları halinde). Sonunda, demir tüketimi arttığında, fosforu su sütunundan çekme yeteneği daha az olurdu. Artan fosfor

miktarı, fotosentetik üretkenlikte bir artışa yol açacak ve böylece bir geri bildirim sürecinde oksijen kaynağını güçlendirmiş olacaktı.

3. ***Oksijendeki artış, atmosferik metan seviyelerindeki düşüşten kaynaklanmış olabilir.*** Metanın oksijenle reaksiyona girme ve onu atmosferden uzaklaştırma eğilimi vardır. Metan üretimindeki azalmanın, soğumaya başlayan bir Dünyayla bağlantılı olduğu varsayılmıştır. Manto soğudukça nikel (Ni) bakımından daha az zengin kayalar püskürdü. Ni, biyolojik metanogenezde yer alan bir dizi enzimde anahtar bir metal kofaktördür. Metanojenler, metan kullanılabilirliği azaldıkça, oksijenle reaksiyona girmek için mevcut olan atmosferik metan konsantrasyonlarını azaltarak oksijen konsantrasyonlarının artmasına yol açacak ve üretkenliklerinde bir azalma meydana gelecekti. Kayaç kayıtlarında görülen Ni miktarındaki düşüş bir metan çöküşünü tetiklemek için yeterli olmayabileceğinden, bu fikirle ilgili sorunlar vardır.
4. ***Gelişmiş bir organik gömme dönemi vardı.*** Eğer daha fazla karbon gömülü olsaydı, organik maddeyle reaksiyona girme şansı olmayacağından net bir oksijen birikimi olurdu. Bununla birlikte, organik materyal uzaklaştırılıp ısıtıldığında, karbon nihayetinde atmosfere CO_2 olarak geri dönecektir, bu nedenle bu mekanizma oksijen konsantrasyonlarını artırmak için kısa vadeli bir olasılık sağlasa da, oksijende uzun vadeli geri dönüşü olmayan bir artışa nasıl neden olabileceğini öngörmek zor.
5. ***Oksijen ve UV radyasyonu arasındaki etkileşimler tarafından yönlendirilen geri bildirimle dengede tutulan iki kararlı durum arasında bir geçiş vardı.*** UV radyasyonunun oksijeni yok etme ve dolayısıyla atmosferdeki ömrünü azaltma eğilimi vardır. Atmosferik oksijen konsantrasyonları bir eşik seviyesine ulaştığında, ozon aracılığıyla UV koruması etkili hale geldi. Bu, oksijenin atmosferik ömrünü artırdı ve oksijen seviyelerinin olumlu bir geri bildirim etkisiyle daha da artmasına neden oldu. Büyük Oksidasyon Olayı, düşük oksijen ve yüksek oksijen kararlı durumları arasındaki geçişi işaretler.
6. ***Daha hafif bir gaz olan hidrojen uzayda kaybolduğu için Dünya geri dönüşü olmayan bir şekilde oksitlendi.*** Dünyanın erken tarihi boyunca, gezegen ilk hafif hidrojen gazı envanterini uzayda kaybetti. Hidrojenin kendisi ve metan da dâhil olmak üzere, o zamandan sonra var olan gazlardaki çoğu hidrojen atomu, nihayetinde suyun (H_2O) parçalanmasından üretildi. Bu gazlar uzayda kaybolduğundan veya bileşenlerine ayrılarak hidrojenin uzayda kaybıyla sonuçlandığından, gezegende daha ağır olan ve uzaya kolayca kaçamayan net bir oksijen birikimi oldu. Böylece, Dünya geri dönüşü olmayan bir şekilde oksitlendi.

Cevabı bilmiyoruz. Bu fikirlerin tümü (ve var olan diğerleri) aktif bilimsel tartışmanın konusudur. Hiçbiri birbirini dışlamak zorunda değildir ve bu fak-

törlerin ve diğerlerinin birkaçının, Dünyanın sabit bir düşük oksijen durumundan daha yüksek oksijen seviyelerine sahip diğer bir durumu yaratmak için bir araya gelmesi mümkündür.

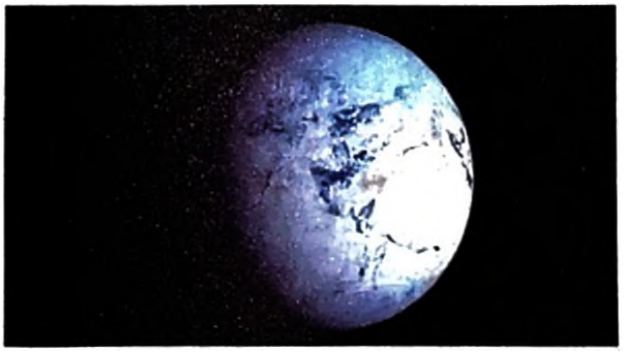
Ayrıca, yaklaşık 2,4 milyar yıl ve 700 milyon yıl önce gerçekleşen iki oksijen artışından aynı faktörlerin sorumlu olmadığı neredeyse kesindir. Burada Büyük Oksidasyon Olayına odaklandık, ancak oksijen kaynakları ve yutaklarındaki değişikliklerdeki benzer mekanizmalar da oksijendeki ikinci büyük artışı tetikleyecekti.

Bu artışlar arasındaki uzun zaman aralıklarında oksijenin neredeyse sabit seviyelerde düzenlenmesinin farklı mekanizmalar tarafından yönlendirildiği düşünülmektedir. Artan oksijen seviyelerinin piritin (demir sülfürler) ve organik maddenin oksidatif ayrışmasını artırması muhtemeldir, bu da daha fazla oksijen tüketimine ve dolayısıyla negatif bir geri bildirim etkisiyle konsantrasyonları dengede tutmaya yol açar. Daha yüksek oksijen konsantrasyonları, daha fazla oksijen tüketecek olan oksijenli solunumu da artırabilir, böylece oksijen konsantrasyonları üzerinde başka bir olumsuz geri bildirim sağlar. Bitkilerin ortaya çıkmasıyla yükselen oksijen seviyeleriyle, organik maddeyle reaksiyonlarda oksijen tüketen orman yangınları daha yaygın olacaktır.

14.7 Kartopu Dünya Dönemi

Hiç şüphe yok ki, oksijen konsantrasyonundaki bu değişikliklerin Dünya ortamı için büyük sonuçları olacaktı. Atmosferik oksijen konsantrasyonundaki her iki büyük artışla bağlantılı olan en çarpıcı iklim değişikliklerinden biri, **Kartopu Dünya** dönemidir (Şekil 14.7).

Oksijende ilk artış meydana geldiğinde önemli buzullaşmalar olduğuna dair kayaç kaydı kanıtları var. 2,45–2,22 milyar yıl önce Paleoproterozoik çağda, Huronian buzullaşma aralığı bir dizi özellik tarafından kaydedilir. O dönemin kayaçları, eridikçe yüzen buz tabakalarından düşen ve aksi takdirde ince taneli derin su çökeltilerine büyük taşlar sokan kayaçlar olan damlataş-





Şekil 14.7 Solda: Bir sanatçının Kartopu Dünya izlenimi (Kaynak: Chris Butler/SPL). *Sağda: Kartopu Dünyanın başlamasıyla sonuçlanan iklim sistemindeki olumlu geri bildirim etkisinin genel şeması.*

ları içerir. Güçlü buzullar, üzerinde hareket ettikleri kayaçları parçalayarak, kayaçların üzerinde buzulların içindeki buz ve kayaçların neden olduğu çizik izleri bırakırlar. Tilit adı verilen kayaç karışımları da buzul ortamlarının bir özelliğidir ve kayaç kayıtlarında bulunurlar.

Küresel buzullaşmanın belki de en açıklayıcı kanıtlarından biri, oluştukları sırada ekvatorda bulunan kayaçlarda buzullaşma özelliklerinin varlığıdır. Tortullar oluştuğunda, manyetit (Fe_2O_3) gibi manyetik mineral tanecikleri yakalarlar. Bu küçük çubuk mıknatıslar, kendilerini Dünyanın manyetik alanının yönüne göre yönlendirirler. Paleoproterozoik kayaçlarda bulunan manyetit, kayaç katmanlarına neredeyse paralel uzanmaktadır, bu da Dünyanın manyetik alanının yeryüzüne yatay olduğu anlamına gelir. Bu durum, ekvator bölgelerinin yakınında meydana gelir (kutuplara daha yakın, manyetik alan yüzeyden Dünyanın çekirdeğine doğru beslenir ve yere neredeyse diktir). Bu nedenle, kanıtlar ekvator bölgelerine yakın buzul koşulları önermektedir.

Paleoproterozoik'teki küresel buzullaşmalara ilişkin kanıtlar, Neoproterozoik'te, aradaki iki milyar yılda oluşan buzullaşmalar için (eğer varsa) çok az kanıtla tekrarlanır. Neoproterozoik buzullaşmalar (dört buzullaşmadan ikisi, 715 ve 610 milyon yıl önce meydana gelmiştir), 610 milyon yıl önce Marino buzullaşmasıyla sona erer, bu da oksijendeki ikinci büyük artışın meydana geldiği zamana denk gelmektedir.

Bu buzullaşmaların birkaç olası nedeni vardır. Yukarıda oksijendeki artışla bağlantılı olarak tartışılan metandaki bir azalma, sera etkisini de azaltacaktı. Metan, bir sera gazı olarak CO_2'den yaklaşık 20 kat daha etkilidir ve azalması, Dünyanın soğumasına ve buzullaşmanın tetiklenmesine neden olmuş olabilir. Bir başka neden de kıtaların konfigürasyonu olabilirdi. Şüphelenildiği gibi ekvatorda yerleşmiş olsalardı, CO_2'nin kayaçlarla reaksiyonlarda tüketildiği, böylece sera etkisinin azaltıldığı karbonat-silikat döngüsünde atmosferik karbondioksit konsantrasyonlarını azaltabilecek yoğun tropik yağmurlara neden olabilirlerdi.

Buzullaşmaların başlaması kaçak soğumaya neden olabilir. Rus bilim insanı Mikhail Budyko (1920–2001), 30° enlem ve üzerinde buzullarla kaplı olması durumunda Dünyanın, soğurduğundan daha fazla Güneş ışığını yansıtarak daha fazla soğumaya neden olacağını hesapladı. Buzulların ekvatora doğru ilerlemesi, Dünya tamamen donana kadar olumlu bir geri bildirim etkisiyle (Şekil 14.7) daha fazla Güneş ışığını yansıtacaktır.

Bu çarpıcı ve düşündürücü senaryo, bariz bir soruyu gündeme getiriyor: Tüm bunları düşünmek için burada var olduğumuza göre, Dünya bu felaketten nasıl kurtuldu? Cevap, karbondioksitin birikmesinde yatmaktadır. Volkanik patlamalar atmosferde karbondioksit birikmesine neden olabilirdi. Bununla beraber, çok az okyanus ve küresel buz örtüsünün altında onunla reaksiyona girmek veya onu soğurmak için açığa çıkan kayaçlarla konsantrasyonlar, yoğun bir sera ısınmasının başlayacağı, buzulları eriteceği ve Dünyayı buzullaşma-

dan önceki haline döndüreceği bir noktaya yükselmiş olacaktı. Bu hipotez doğruysa, buzullaşmanın sonunda atmosferdeki yüksek karbondioksit konsantrasyonlarının minerallerde çökeltilmesiyle oluşan büyük karbonat kayaç katmanları için kanıt bulmayı beklerdik. Bu örtü karbonatlar gerçekten de kayaç kayıtlarında bulunurlar (Şekil 14.8). Volkanlar tarafından solunan karbondioksite benzer karbon izotop değerleri, bir sera olayının Kartopu buzullarını sona erdirdiği fikrini desteklemektedir.



Şekil 14.8 Örtü karbonatları. Kartopu Dünyayı sona erdiren bir sera olayından sorumlu olabilecek yüksek CO_2 konsantrasyonlarının kanıtıdır. Bu, Çin, Jiulongwan'daki Doushantuo Formasyonunda, diğer kayaç oluşumları arasında Neoproterozoik bir örtü karbonat çıkıntısıdır (Fm; Kaynak: Uluslararası jeobiyoloji konferansı).

Bilim insanları tarafından gündeme getirilen bir bilmece, Dünya biyotasının küresel çevredeki bu hızlı değişikliklerden nasıl kurtulduğudur. Küresel buzullaşmalara rağmen, geriye birçok yaşam alanı kalacaktır. Okyanuslar tamamen donmadığı için derin deniz habitatları var olacaktı. Buz katmanları, fotosentez için ışığı önemli ölçüde azaltacak ve eğer kilometrelerce kalınlıkta olsaydı, onu tamamen ortadan kaldıracaktı. Bununla birlikte, buz tabakalarının yüzeyinde yaşayan birçok üretken fotosentetik topluluk biliyoruz. Yüksek Arktik'te, mikrobiyal tabakalardaki canlılar buz tabakalarının yüzeyinde yaşar, Güneş ışığından enerji elde ederler ve tabaka içinde yaşayan birçok heterotrofik organizmayı besleyen organik karbonu üretirler. Birçok kutup buzulunun yüzeyinde, rüzgârla savrulan tortullar, siyanobakteriler ve bütün bir mikrop topluluğunu içeren küçük dairesel çöküntüler olan kriyokonit delikleri bulunur. Koyu tortullar, koyu kahverengi veya siyah renkleri nedeniyle Güneş ışığını emer, buzu eritir ve mikropların



Şekil 14.9 Alaska'daki Juneau buz sahası kriyokonit delikleri. Buz yüzeyinde başarılı olabilecek tek tip mikrobiyal topluluk. Her bir deliğin çapı birkaç santimetredir ve tortul ve mikroorganizmalarla doludur (Kaynak: Nozomu Takeuchi).

büyüyebileceği sulu bir yaşam alanı oluşturur. Kriyokonit delikleri (Şekil 14.9) sadece birkaç santimetre çapında olabilirler.

Daha da dikkat çekici olanı, Antarktika'nın buz tabakalarında veya kalıcı olarak buzla kaplı göllerinde yaşayan organizmalardır. Kriyokonit deliklerine benzer şekilde, mikroplar buz içinde koyu keçeleşmiş topluluklar oluştururlar. Çok derine gömülmemeleri koşuluyla, yeterince Güneş ışığı buza nüfuz ederek mikroplar tarafından emilir, bu da etraflarındaki buzu ısıtır ve eritir, böylece içinde büyüyebilecekleri sulu bir kalıntıya neden olur. Tamamen buzla kaplı bir Dünya olduğunu varsaysak bile, bugün Dünyada bu buzlu yüzeyde yaşamış olabilecek birçok mikrobiyal topluluk örneğini görebiliriz. Yine de bu koşullar altında, Dünyanın fotosentetik üretkenliğinin bugüne kıyasla önemli ölçüde azalacağını söylemek yanlış olmaza. Fotik bölge içinde yaşayan organizmalara bir yaşam alanı sağlamak için açık okyanus genişlikleri veya verimli kıyı bölgeleri olmadan, fotosentetik organizmalar için mevcut bölgeler sınırlı olabilirdi.

Bu, biyosferin oldukça küçültülmüş bir görünümü olsa da, Dünyanın tamamen buzla kaplı olduğu kesin değildir. Daha yakın tarihli modelleme sonuçları, tropik ve ekvator bölgelerinin tamamen buzla kaplı olmayabileceğini ve ekvator suyunun bir bölgeyi buzsuz bıraktığını göstermektedir. Budyko'nun felaket tahminleri, onları tasarladığı sırada ileri görüşlü olmasına rağmen, belki de tam olarak gerçekleşmedi. Bununla birlikte, Kartopu Dünya dönemi, bir gezegendeki değişen biyota ve gezegen ölçeğindeki çevresel koşullar arasındaki bağlantının en çarpıcı örneklerinden bazılarını sunmaya devam ediyor.

Tartışma Noktası: Günümüzün Kartopu Dünyasında Yaşam

Kartopu Dünya, sezgisel olarak oldukça yıkıcı bir olay gibi görünüyor. Buz örtüsü, okyanuslara ışık girişini azaltacak ve buzla kaplı okyanusların üst bölgelerindeki sıcaklıkları azaltacaktı. Ayrıca okyanuslar ve atmosfer arasındaki gaz alışverişini de azaltacaktı. Bununla birlikte, derin okyanus hidrotermal menfezleri gibi birçok habitatın nispeten değişmeden kalacağını hayal edebiliriz. Acaba öyle mi? Bir düşünce deneyi olarak, bir Kartopu Dünyasının günümüz Dünyası ile onun atmosferi, okyanusları ve biyosferi üzerindeki etkisini düşünün. Hangi döngüleri ve geri bildirimlerin değiştirmesini beklersiniz? Yaşam için farklı habitatların göreceli bolluğunu ve bu habitatların nasıl ve neden değişeceğini düşünün. 16. Bölümü tamamladığınızda bu soruyu yeniden gözden geçirmek isteyebilirsiniz.

Corsetti, F.A., Olcott, A.N., Bakermans, C. (2006) The biotic response to Neoproterozoic snowball Earth. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology* **232**, 114–130.

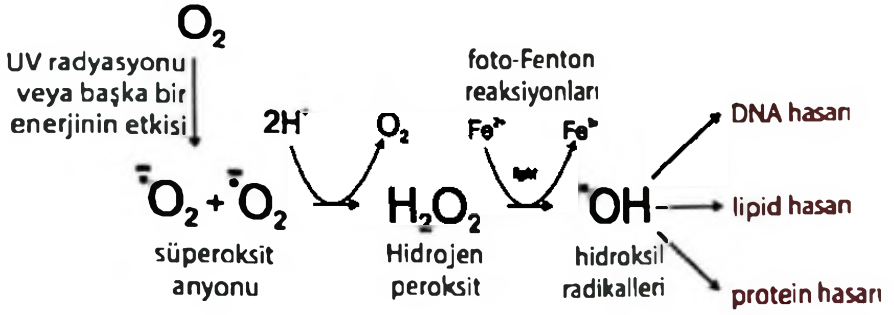
14.8 Oksijen Artışının Diğer Biyolojik Sonuçları

Kartopu Dünya olayları, yaşamın dağılımını belirlemede etkili olabilirdi, ancak oksijendeki artışın kendisinin derin etkileri olacaktı. Oksijen reaktiftir ve UV radyasyonu veya diğer iyonik türlerle birlikte **serbest oksijen radikalleri** gibi

kimyasal reaktif oksijen türleri üretir (Şekil 14.10). Serbest radikaller zar lipidlerini oksitleyebilir, proteinlerden kofaktörleri ayırabilir ve proteinler ile nükleik asitler gibi temel biyolojik molekülleri oksitleyebilir. Süperoksit anyonlarının (zararlı hidroksil radikallerinin öncüleri) oksijen ve hidrojen peroksite dönüşmesini katalizleyen yaygın bir enzim olan *Süperoksit Dismutaz* da dâhil olmak üzere, bu stresle başa çıkmak için evrimleşmiş bir dizi enzimatik yol vardır. Oksijenin, özellikle oksijenli solunumun oksijensiz solunumdan en az on kat daha fazla ATP üretmesi gibi bazı yararlı sonuçları olmasına rağmen, düşük konsantrasyonlarda atmosferik oksijene sahip bir Dünyada yaşamak üzere evrimleşen Dünya yüzeyinde oksijensiz solunum yapan organizmaların üç seçeneği vardı: evrimleşmek, saklanmak veya nesillerinin tükenmesi.

Yüksek oksijen ve onun serbest radikalleriyle başa çıkmak için evrimsel mekanizma, oksijendeki ilk artıştan önce neredeyse kesinlikle yerini almıştı. Atmosferik oksijendeki ilk büyük artıştan önce siyanobakteriler tarafından bölgesel oksijen üretimi, oksijenli solunum yapan organizmaların evrimleşebileceği oksijen vahaları üretebilirdi. Atmosferik oksijendeki artıştan çok önce reaktif oksijen türleriyle başa çıkacak mekanizmaların evrimi için bir seçilim baskısı sağlayabilirdi. Atmosferik oksijendeki büyük ölçekli artış, muhtemelen bu oksijene uyarlanmış organizmaların daha fazla sayıda yüzey habitatına yayılmasını önceden haber verirdi.

Oksijendeki artış ve Dünya ortamının genel oksijenlenmesi, redoks reaksiyonları için elektron vericilerinin ve alıcılarının sayısını değiştirecekti. Sülfat ve sabit nitrojen bileşikleri (örneğin nitrat ve nitrit) daha geniş bir şekilde sürdürülür ve elde edilebilir, uzaysal aralığı ve mevcut kemoheterotrofik reaksiyonların bolluğunu genişletirdi. Bununla birlikte, metan, hidrojen ve diğer indirgenmiş bileşikler, en azından doğrudan atmosfere maruz kalan habitatlarda, kemoototrofik reaksiyonların uzaysal bolluğunu azaltarak daha az kullanılabilir hale gelecekti.



Şekil 14.10 'Foto-Fenton reaksiyonlarında' üretimi demir ve ışıkla katalize edilebilen hidroksil radikalleri de dâhil olmak üzere biyolojik olarak zararlı radikaller üreten oksijen içeren bazı reaksiyonları gösteren bir şema. Atmosferik oksijendeki artış, bu reaksiyonların yaygınlığını artıracaktı (Kaynak: Charles Cockell).

14.9 Oksijen ve Hayvanların Ortaya Çıkışı

Oksijen artışının en çarpıcı sonuçlarından birisinin, oksijenli solunum olasılığından yararlanan daha karmaşık organizmaların ortaya çıkması olduğu düşünülmektedir. Bölüm 5'te gördüğümüz gibi oksijenli solunum, oksijensiz metabolizma çeşitlerinden çok daha fazla enerji (ATP) üretebilir. Bu daha fazla enerji varlığıyla daha büyük ve daha karmaşık organizmaların ortaya çıkışının mümkün olduğu varsayılmaktadır.

Fosil kayıtlarındaki Büyük Oksidasyon Olayının yakınında, küçük karmaşık organizmaların korunmuş kalıntıları ortaya çıkmaya başlar. Spiral şekilli organizmaların (*Grypania*) fosilleri 1,9 milyar yıl yaşındaki şistlerde bulunur. Bunlar muhtemelen alglerdir. Akritark fosilleri, muhtemelen ökaryotik organizmaların kalıntıları olan yaklaşık 50 µm çapındaki organik fosiller, 2,1 milyar yıl öncesine ait Sibirya şistlerinde bulunur. Çin'de 1,85 milyar yıl yaşında olan başka akritark fosilleri bulunmuştur. Çin'deki yerleşim yerlerinde 1,7 milyar yıl yaşından küçük, simetrik fosiller bulunur. Dikenli akritarklar ise Avustralya'da yaklaşık 1,5 milyar yıldan kalma kayaçlarda bulunur. Bu organizmalar, bugün aşina olduğumuz büyük, çok hücreli, farklılaşmış organizmalar değillerdi. Bununla birlikte, büyüme ve karmaşıklık için daha fazla enerjiye sahip organizma biçimlerinin olasılığını öne sürüyorlar ve bu, oksijendeki ilk artışın ve büyümeye devam devam eden biyokütlenin bir sonucu olabilir.

Neoproterozoik'teki oksijenin ikinci artışı, büyük hayvanların ortaya çıkışıyla rastlantısal olarak meydana gelmiştir. Ediyakaran döneminde yaşamış boru ve yaprak şekilli organizmaların esrarengiz kalıpları, 585 ile 542 milyon yıl arasındaki kayaçlarda bulunmuştur. Önceki bölümde gördüğümüz gibi, ilk olarak Avustralya'nın Ediyakara Tepelerinde keşfedildiler. Ayrıca Bölüm 13'te, Kambriyen döneminin başında (542 milyon yıl önce) sert gövdeli kalıntıların fosil kayıtlarında yer aldığını gördük. Ediyakaran faunası yok olur ve korunan fosillerin sayısı muazzam bir şekilde artar. Hayvan yaşamının biyolojik çeşitliliği artar. Bu, 'Kambriyen Patlaması'dır. Bu zamanda organizmalar, bu gözlemleri hesaba katarak, iskeletler ve sert kabuklar için kullanılan minerallerin daha kolay korunmasını sağlayan çökeltme yeteneğini geliştirdiler.

Oksijendeki ikinci artışla hayvanların ortaya çıkışı arasındaki bağlantı, enerjileri yoğun çok hücreli yapıları harekete geçirmek için yeterli oksijenin mevcudiyetiyle ilişkili olabilir. Yaklaşık %10'luk bir oksijen konsantrasyonunun, hayvanların solunumu için yeterli olduğu düşünülmektedir.

Dikkate alınması gereken bir başka faktör de enerjinin besin zincirinde bir seviyeden diğerine hareketidir. Enerji, organizmalar tarafından elde edildiğinden ve bir sonraki trofik seviyede bir avcıya aktarıldığından, ekolojik bir zincir kurulur. Oksijenli solunum, yalnızca daha fazla enerji üretme kapasitesinden dolayı değil, aynı zamanda oksijensiz solunumla karşılaştırıldığında genellikle daha verimli enerji ve biyokütle üretme kapasitesinden dolayı trofik seviyeyi

oksijensiz solunumdan daha fazla destekleyebilir. Oksijenli solunum her trofik seviyede daha fazla enerji birikimine ve dolayısıyla daha uzun besin zincirlerine ve her seviyede art arda daha büyük organizmaların varlığına izin vermesinin ekosistemlerde daha fazla karmaşıklığa katkıda bulunması muhtemel görünüyor.

Organizmaların neden daha büyük olma eğiliminde olduğu bariz bir sorudur. Bu soru, onlarca yıldır evrimsel biyologları meşgul etmekte. Bu eğilimi görmenin bir yolu, diğer olası faydalara ek olarak daha büyük organizmaların avı ezme konusunda daha yetenekli olacağı gerçeğini düşünmektir. Büyüme enerjisi oksijenli solunum yoluyla mevcutsa, organizmalar arasındaki rekabetten kaynaklanan seçilim baskıları daha büyük formlara, evrimsel bir 'silahlanma yarışına' izin verme eğiliminde olacaktır. Bu durumda yırtıcılık önemli bir faktör olurdu. Trilobit fosillerinde, Kambriyen'in en büyük yırtıcılarından biri olan eklembacaklıların habercisi *Anomalocaris*'in (bu müthiş erken dönem yaratığının bir modeli Şekil 14.11'de gösterilmiştir) saldırılarının yaraları görülmektedir. Bu fosiller o dönemde yırtıcı ile av arasındaki etkileşimlere kanıt sağlarlar.

Büyük çok hücreli organizmalar ortaya çıktıktan sonra, mutasyon sürecinin çeşitli organizma boyutlarıyla sonuçlanan mevcut parametre uzayını "keşfetmesi" kaçınılmazdı (elbette bu, daha küçük boyutu tercih eden evrimsel seçilim baskıları varsa, organizmaların da daha küçültülemeyeceği anlamına gelmez).

Yeni vücut planlarının ve formlarının keşfedilmesinde rol oynayabilecek bir başka faktör de genlerin düzenlenmesindeki zayıflıktır. Günümüzde Hox genleri (homeobox genlerinin bir grubu), hayvanlarda vücut planlarını ve simetriyi kontrol eden genlerdir. Muhtemelen, hayvanların erken yükselişi sırasında bu genler daha az iyi düzenlenmiş ve karmaşık bir halde olacaklardı. Bazı bilim insanları, bu genlerin zayıf organizasyonu ve düzenlenmesinin, yaşamın, jeolojik olarak kısa zaman dilimlerinde vücut organizasyonlarının parametre uzayını keşfetmesini sağlayabileceğini öne sürdüler.



Şekil 14.11 Anomalocaris'in bir modeli. *Kambriyen'de hayvan büyüklüğündeki artışın bir açıklaması olabilecek, avcı-av arasındaki 'silahlanma yarışı' için kanıt sağlayan erken bir Kambriyen avcısı. Organizma yaklaşık 1 m uzunluğundaydı* (Kaynak: wikicommons).

Bazı araştırmacılar, hayvanların ortaya çıkışının diğer çevresel faktörlerle ilişkili olabileceğini öne sürdüler. Örneğin, küresel buzullaşmalar tarafından yakınlaşmaya zorlanan işbirlikçi hücre yapıları, nihaye-

tinde farklılaşmış hücre yapıları olarak ortaya çıkmış olabilir. Bu tür fikirler ilgi çekici olsa da, deneysel olarak test edilmesi zordur. Oksijensiz solunumun daha düşük enerji verimi hakkında bildiklerimiz göz önüne alındığında, oksijenin muhtemelen karmaşık organizmaların ortaya çıkışına izin veren büyük bir çevresel değişiklik olduğunu varsaymak mantıklı görünüyor.

Tartışma Noktası: Diğer gezegenlerde oksijen artışı

Büyük Oksidasyon Olayında Dünyadaki oksijenin artışı, en azından oksijen kaynakları ve çukurları olmak üzere, çeşitli faktörlere bağlıydı. Bu karmaşıklıklara rağmen, gezegen boyutunun başka yerlerdeki varsayımsal oksijen artışını nasıl etkileyebileceğini düşünebiliriz. Aşağıdaki önermeyi düşünün: Daha küçük bir gezegen, oksijen için bir çukur görevi görecek daha düşük miktarda indirgenmiş gaza sahip olabilir. Bu nedenle çukur daha hızlı tükenecek ve O_2 konsantrasyonları daha erken yükselerek potansiyel olarak çok hücreli yaşamın ve zekâ sahibi canlıların daha hızlı ortaya çıkmasına yol açacaktır. Bu önermeye katılıyor musunuz? Bir gezegenle ilgili başka hangi faktörler, Dünyada gördüğümüz varsayımsal oksijen tarihini değiştirebilir?

McKay, C.P. (1996) Time for intelligence on other planets. In: *Circumstellar Habitable Zones* (Doyle, L.R., ed.), Travis House, Menlo Park, pp. 405–419.

Catling, D.C., Glein, C.R., Zahnle, K.J., McKay, C.P. (2005) Why O2 is required by complex life on habitable planets and the concept of planetary 'oxygenation time'. *Astrobiology* **5**, 415–438.

14.10 Yüksek Oksijen Dönemleri

Bu bölüm, oksijenin bugünden daha düşük olduğu Dünya tarihinin çoğunluğuna odaklanmıştır. Bununla birlikte, oksijen konsantrasyonlarının bugünden daha yüksek olduğu zamanlar da olmuştur. Oksijen çukurları ve kaynakları arasındaki değişen denge, zaman içinde oksijende gözlenen artışlara ve O_2'nin günümüzdeki seviyesine oranla yükselmesine neden oldu.

Yaklaşık 300 milyon yıl önce, oksijen seviyeleri yaklaşık %30 arttı ve bu yüksek oksijen konsantrasyonunun, o sırada kayaç kayıtlarında gözlemlenen böcek devliği olayını açıkladığı düşünülüyor. Oksijenlerini elde etmek için öncelikle difüzyona veya ilkel karın kasılma biçimlerine dayanan böcekler gibi omurgasızlar, gazın daha fazla mevcudiyetiyle daha büyük boyutlara ulaşabilirdi. 1 m kanat açıklığına sahip bir *griffenfly* (yusufçukların atası) olan *Meganeura*'nın fosil izleri ve diğer kanıtlar bu döneme tanıklık etmektedir (Şekil 14.12).

Oksijenin artışının nedenleri belirsizdir. Bir olasılık, Karbonifer'in dev ormanları gömüldükçe, içlerinde kilitlenen karbonun gömülmesi ve fotosentezden net bir oksijen birikmesine neden olmasıdır. Bu, o zamanlar bitkilerin yapısal materyallerini, lignini ve selülozu parçalayabilen organizmaların eksikliğinden kaynaklanmış olabilir.



(a) (b)

Şekil 14.12 Dev böceklerin oksijen konsantrasyonlarının bugünden daha yüksek olduğu bir döneme tanıklık etmesi düşünülmektedir. (a) Yaklaşık 50 cm uzunluğunda bir griffenfly'dan (yusufçukların atası) bir Meganeura *fosil kanadı. (b) Bu dev böcekler, yaklaşık 25 cm çapında bir kütükte bu etkileyici yaratıklardan birini gösteren bir modelle gösterilmiştir* (Kaynak: wikicommons, Ghedoghedo ve GermanOle).

14.11 Sonuç

Dünya tarihi boyunca yaşam, kıtaların değişen konumu gibi büyük jeolojik değişikliklerden etkilenmiştir. Bununla birlikte, yaşamın kendisi, jeosfer ve sonraki yaşam fırsatları için etkileri olan Dünya çevresinde değişiklikler yarattı. Bu bölümde, jeosfer-biyosfer eşleşmesinin önemli bir örneği olarak Dünya atmosferindeki oksijenin tarihine baktık. Jeokimyacıların, jeolojik temsilcileri kullanarak, oksijen tarihini nasıl yeniden inşa edebildiklerini gördük. Bilim insanları, bu bilgiyi kayaç kayıtlarındaki jeokimyasal ve biyolojik gözlemlerle ilişkilendirerek bu eşleşmenin nasıl çalıştığını anlamaya başlıyorlar. Oksijendeki artışların, Dünyanın kimyasındaki radikal değişikliklerle bağlantılı olmasının yanı sıra, gezegenimizin tarihindeki en önemli evrimsel geçişlerin bazılarının, özellikle de hayvanların ortaya çıkması ve nihayetinde zekâya yol açmasının arkasında olabileceğini bulduk. Bu bölüm, aşağıdakileri içeren bariz soruları davet ediyor: Bu artış kaçınılmaz mıydı? Her zaman diğer gezegenlerde ve aynı genel kalıplarla mı meydana gelecek? Oksijenin tarihi bize diğer gezegenlerdeki büyük hayvan benzeri organizmaların olasılıkları ve olasılıkları ve dolayısıyla zekânın yükselme olasılığı hakkında ne söylüyor?

İleri Okumalar

Kitaplar

Canfield, D.E. (2014) *Oxygen A Four Billion Year History*. Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton.

Lane, N. (2002) *Oxygen: The Molecule that Made the World*. Oxford Üniversitesi Yayınları, Oxford.

Yayınlar

Anbar, A., Duan, Y., Lyons, T.W., Arnold, G.L., Kendall, B., Creaser, R.A., Kaufman, A.J., Gordon, G.W., Scott, C., Garvin, J., Buick, R. (2007) A whiff of oxygen be-

fore the great oxidation event. *Science* 317, 1903–1906.

Berner, R.A., Beerling, D.J., Dudley, R., Robinson, J.M., Wildman, R.A. (2003) Phanerozoic atmospheric oxygen. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 31, 105–134.

Canfield, D.E., Poulton, S.W., Narbonne, G.M. (2007) Late Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science* 315, 92–95.

Catling, D.C., Zahnle, K.J., McKay, C.P. (2001) Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of the early Earth. *Science* 293, 839–843.

Catling, D.C., Claire, M.W. (2005) How Earth's atmosphere evolved to an oxic state. *Earth and Planetary Science Letters* 237, 1–20.

Claire, M.W., Kasting, J.F., Domagal-Goldman, S., Buick, R., Stueeken, E., Meadows, V. (2014) Modeling the signature of sulfur mass-independent fractionation produced in the Archean atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 141, 365–380.

Dudley, R. (1998). Atmospheric oxygen, giant Paleozoic insects, and the evolution of aerial locomotor performance. *Journal of Experimental Biology* 201, 1043–1059.

Farquhar, J., Bao, H.M., Thiemens, M. (2000) Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle. *Science* 289, 756–758.

Frei, R., Gaucher, C., Poulton, S.W., Canfield, D.E. (2009) Fluctuations in Precambrian atmospheric oxygenation recorded by chromium isotopes. *Nature* 461, 250–253.

Guo, Q., Strauss, H., Kaufman, A.J., Schröder, S., Gutzmer, J., Wing, B., Baker, M.A., Bekker, A., Jin, Q., Kim, S.-T., Farquhar, J. (2009) Reconstructing Earth's surface oxidation across the Archean-Proterozoic transition. *Geology* 37, 399–402.

Hoffmann, P.F., Schrag, D.P. (2002) The Snowball Earth Hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova* 14, 129–155.

Holland, H.D. (2006) Oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 361, 903–915.

Knoll, A.H. (2011) The multiple origins of complex multicellularity. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39, 217–239.

Lenton, T.M., Watson, A.J. (2000) Redfield revisited: 2. What regulates the oxygen content of the atmosphere? *Biogeochemical Cycles* 14, 249–268.

Schirrmeister, B.E., de Vos, J.M., Antonelli, A., Bagheri, H.C. (2013) Evolution of multicellularity coincided with increased diversification of cyanobacteria and the Great Oxidation Event. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 1791–1796.

Stolper, D.A., Revsbech, N.P., Canfield, D.E. (2010) Aerobic growth at nanomolar oxygen concentration. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 18755–18760.

15

KİTLESEL YOK OLUŞLAR

Öğrenme Çıktıları

- Kitlesel yok oluşların ne olduğunu anlamak.
- Fanerozoik'te beş kitlesel yok oluş olduğunu bilmek ve bunların özelliklerinden bazılarına dikkat çekebilmek.
- Kitlesel yok oluşların sözde nedenlerinden bazılarını tanımlamak.
- Kretase–Paleojen yok oluşunun bir asteroit çarpmasının rolüne dair bazı önemli kanıtları açıklayabilmek.
- Kitlesel yok oluşlar için öne sürülen kanıtları örnek olarak kullanarak bilimdeki tartışmaların doğasını anlamak.
- Bazı bilim insanlarının Dünya sistemindeki mevcut değişiklikleri neden altıncı kitlesel yok oluş olarak tanımladıklarını açıklamak.

15.1 Yok Oluş

Dünyadaki yaşamın evrimi, sürekli olarak kademeli ve istikrarlı bir süreç olmamıştır. Geçen bölümde gördüğümüz gibi, yaşamın kendisi çevrede küresel ölçekte çok önemli değişiklikleri hızlandırabilir. Esasen oksijenli fotosentezin evriminden kaynaklanan Büyük Oksidasyon Olayı, canlılık için muazzam sonuçlar doğurdu. Bunun gibi bir örnekte, yaşamın nasıl çevresel değişikliklerin itici gücü olduğunu görüyoruz. Bununla birlikte yaşam, bazen Dünya-Yaşam sisteminin birlikte evriminde daha çok bir yolcu olmuştur. Büyük ölçekli bir asteroit çarpması, biyosferde büyük bir bozulmaya neden olabilir ve yaşam, Dünya dışı kaynaklı bu değişikliklerin akılsız bir kurbanı olur (daha sonra göreceğimiz gibi, bu tehditleri önlemek akıllı bir organizmanın imkânlarının ötesinde olmasa da).

Yaşam ister bir sürücü ister bir yolcu olsun, bu değişiklikler gezegen biyosferinin büyük ölçekli evrimsel eğilimlerini gelişigüzel bir olay haline getirdi. Ani değişimler sadece yaşam için yeni fırsatlar yaratmakla kalmamış, aynı zamanda çok çeşitli taksonları da yok etmiştir. Dünya tarihi boyunca, biyosfer **kitlesel yok oluş** dönemlerine maruz kalmıştır. Bu yok oluşlardan bazılarını, bunların önerilen nedenlerini ve bir gezegendeki yaşamın süresini anlamak için önemlerini keşfedeceğiz.

15.2 Yok Oluş Nedir?

Bir türün son bireyi öldüğünde bir yok oluş meydana gelir. Ancak, ne yazık ki, bir türün sonu her zaman bu şekilde gelmez. Bu olayın yaşanmasından çok önce de bir yok oluş meydana gelebilir. Bir yok oluş, bireylerin var oluğu, ancak sürdürülebilir üreme şansının düşük olduğu durumlarda **İşlevsel Yok Oluş** olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, bireyler kalsa bile türler fiilen yok olur. İşlevsel bir yok oluş, bir organizmanın küçük bir popülasyonunun, genetik olarak sağlıksızlaşıp canlı yavrular üretemeyecek duruma gelmesi sonucu meydana gelebilir.

İnsan kaynaklı yok oluşun en ikonik ve belki de en üzücü örneklerinden biri, Yolcu Güvercini veya Yabani Güvercindir (*Ectopistes migratorius*; Şekil 15.1). On dokuzuncu yüzyılda Kuzey Amerika ormanlarını işgal eden bu kuş o kadar fazlaydı ki sayısının üç ila beş milyar arasında olduğu tahmin ediliyordu. Sürüleri o kadar büyük ve genişti ki, Güneş ışığını engelliyor ve göç ederken yüzlerce kilometre kareyi kaplıyorlardı. Etlerini satmak amacıyla yoğun ve endüstriyel ölçekte avlanmaları, 1880'lerin sonlarında büyük nüfus düşüşlerine yol açtı. On dokuzuncu yüzyılın sonlarına doğru ormanların odun için yok edilmesi, en sonunda bu güvercinlerin yaşam alanlarını nüfusları minimum yaşayabilir boyutun altına düşene kadar azalttı. Bu güvercinin soyu temelde işlevsel olarak tükenmişti. Vahşi doğadaki son Yolcu Güvercini, Eylül 1899'da Babcock, Wisconsin, Amerika Birleşik Devletleri'nde vuruldu. Bununla birlikte, Martha adlı Dünyadaki son Yolcu Güvercini, 1 Eylül 1914'te Cincinnati Hayvanat Bahçesinde öğleden sonra 1:00 civarında tek başına öldü.

Bir türün çevresi, türün uyarlanabileceğinden daha hızlı değiştiğinde, bir türün uyarlanımları artık onun kaynaklar elde etmesine ve rekabet etmesine izin vermede yeterli olmadığında, doğal yok oluşlar meydana gelebilir. Yok oluşlar yerel, yaygın veya küresel olabilirler. Günümüzde Kuzey Amerika'nın bazı bölgelerinde bulunan bozkurt (*Canis lupus*) soyunun, İngiltere'de muhtemelen Kral VII. Henry'nin (1485-1509) saltanatı sırasında veya hemen sonrasında tükenmesi yerel yok oluşa örnek olarak verilebilir.



Şekil 15.1 Yolcu veya Yabani Güvercin'in bir tahnitçilik örneği (Kaynak: wikicommons, Ltshears).

Yok oluş, Dünyadaki çoğu türün kaderidir. Muhtemelen şimdiye kadar var olan tüm türlerin yaklaşık %99,9'u yok olmuştur. Bu türlerin çoğu, yerel yok oluşlar veya tek bir türü eşiğin ötesine iten koşullar nede-

niyle yok olmuştur, buna türlerin yok oluşu denir. Bir **yok oluş olayı**, küresel olmayan, ancak birden fazla türü etkileyebilecek olayları ifade eder. Böyle bir olaya örnek olarak, kuzey yarımkürede yaklaşık 11.000 yıl önce, yünlü mamut (*Mammuthus primigenius*) dâhil olmak üzere birçok büyük memelinin neslinin tükenmesine neden olan Pleistosen sonu yok oluşu verilebilir. Bu yok oluş, iklim değişikliği ve/veya insanların avlanmasından kaynaklanmış olabilir.

Bununla birlikte kayaç kayıtlarında, çok daha yaygın bir yok oluşun meydana geldiği olayların kanıtı vardır. Bu olaylara **kitlesel yok oluşlar** denir.

Kitlesel yok oluş, gezegen ölçeğinde birçok türün yok olmasıdır. Genellikle olağanüstü ve hızlı gezegensel değişimler olduğu anlamına gelir ve her türlü yaşamı etkiler (örneğin bitkiler ve hayvanlar, ekvator ve kutup organizmaları, büyük ve küçük hayvanlar, etoburlar ve otoburlar). Kitlesel yok oluşun uygun bir tanımı, evrimsel biyolog David Jablonski tarafından 'göreceli olarak kısa bir jeolojik zaman aralığı boyunca coğrafi olarak yaygın birden fazla yüksek taksonun maruz kaldığı, mevcut çeşitlilikte en azından geçici bir düşüşe neden olan nesil tükenmesi miktarındaki herhangi bir önemli artış (yani soyun sona ermesi)' olarak yapıldı.

Kitlesel yok oluş olasılığı, Fransız jeolog Baron Georges Cuvier (1769–1832) tarafından kabul edildi ve kendisi buzul çağı tortullarında bulunan dev kemiklerin günümüzde yaşayan hiçbir canlı organizmayla örtüşmediğine dikkat çekti. Yakın zamana kadar, kademeli jeolojik değişim baskın güç olarak kabul edildi. Felaketler ilginç, ancak daha çok sansasyonel olarak kabul edildi. Bugün, bazı kitlesel yok oluşların felaket olaylarıyla bağlantılı olduğunu biliyoruz.

Kitlesel yok oluşlar Dünya tarihini noktalamış olsa da, düzenli bir model önermek için güçlü bir kanıt yoktur. 1980'lerde, yok oluş olaylarının periyodik olduğu iddia edildi ve kabul edilen teorilerden biri, bu olayın her 26 milyon yılda bir gerçekleştiğiydi. Sunulan önerilerden biri, bu olaylara iç Güneş Sistemini bozarak düzenli aralıklarla asteroit ve kuyruklu yıldız çarpmalarına neden olan, Nemesis adı verilen Güneşin uzak bir eşlikçisinin neden olduğuydu. Diğer bilim insanları, periyodik yok oluşların, Güneş sisteminin Samanyolu Gökadası etrafındaki 250 milyon yıllık yolculuğuyla, Dünyanın gökadanın sarmal kollarından periyodik geçişlerinin neden olduğu değişikliklerle bağlantılı olup olmadığını merak ettiler. Bu teoriler, kitlesel yok oluşların sabit bir periyodikliği olmayan çeşitli nedenlerle tetiklendiği görüşüyle zayıfladı.

Kitlesel yok oluşlar yavaş (kademeli bir kitlesel yok oluş) veya çok hızlı (ani bir kitlesel yok oluş) bir biçime meydana gelebilir. Herhangi bir yok oluşun altında yatan mekanizmalar, sürecin ne kadar hızlı gerçekleşeceğini belirleyecektir. Herhangi bir kitlesel yok oluşun ardından, çevresel kararlılığın ve artan organizma çeşitliliğinin (uyarlanabilir radyasyon) meydana geldiği bir **iyileşme aralığı** vardır.

Bu olaylardan etkilenen organizmalar kendi içinde gruplara ayrılır. **Geride kalan taksonlar**, yok oluştan kurtulan taksonlardır, hayatta kalmayı başaran

grupların belirli temsilcileridir. **Afet taksonları** kısaca üremeye devam eden ve bozulan koşullardan yararlanan organizmalardır. Bunlar, kitlesel bir yok oluştan kısa bir süre sonra egemen olan fırsatçı gruplardır. **Öncül taksonlar,** bir neslin tükenmesinden sonra uzun vadede öne çıkan yeni baskın grupların filogenetik atalarını oluşturmaya devam eden organizmalardır.

15.3 Beş Büyük Kitlesel Yok Oluş

Fanerozoik'te bilinen beş kitlesel yok oluş vardır. Tablo 15.1, bu yok oluşların her birini ve aile, cins, tür düzeyinde yok oluşun büyüklüğüne ilişkin bazı tahminleri göstermektedir. Yok oluşlar genellikle meydana geldikleri jeolojik dönemin sonuyla veya meydana geldikleri iki dönemin arasıyla adlandırılırlar.

Tablo 15.1 Fanerozoik'in beş büyük yok oluşu. Biyolojik hiyerarşinin farklı seviyelerinde yok oluşun büyüklüğüne ilişkin bazı örnekler gösterilmektedir.

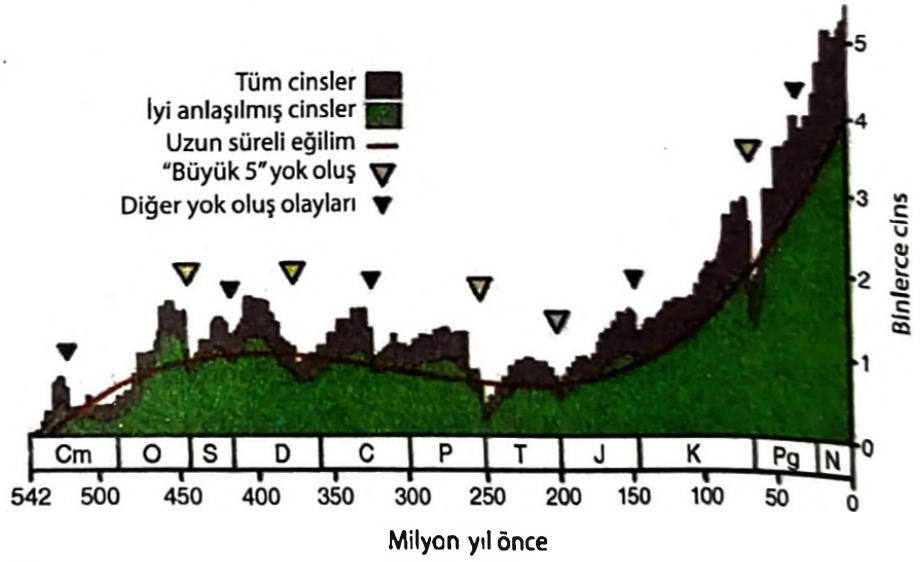
Yok oluş	Zaman (Milyon yıl önce)	Ailesel yok oluş (%)	Cinssel yok oluş (%)	Türsel yok oluş (%)
Kretase–Paleojen yok oluşu	~65.5	17	40	75
Triyas sonu yok oluşu	~201	23	50	80
Permiyen–Triyas yok oluşu	~252	57	56	80-90
Geç Devoniyen yok oluşu	~372	19	57	75
Ordovisyen–Silüryen yok oluşu	~444	27	57	86

Tablo 15.1'de verilen, farklı biyolojik hiyerarşi seviyelerindeki yok oluş büyüklüğü değerleri tahminidir ve neden belirsiz olduklarını anlamak önemlidir. Bu değerler, eksik fosil kayıtlarına dayanmaktadır. Bu eksiklik, birçok organizmanın yetersiz korunmasından ve korunmanın gerçekleştiği ortamların, o sırada Dünya üzerindeki ortamların yalnızca küçük bir bölümünü temsil etmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, bir yok oluş olayından önceki ve sonraki göreceli karşılaştırmalar, iskeletlerin fosil kayıtlarda saklanması esnasında bir değişim geçirmeleri beklenmediği için, muhtemelen oldukça doğrudur. Belirli taksonların mutlak bolluğunu tanımlamak daha zordur. Sayılar fosillerin sınıflandırılmasına ve bunların ailelere, cinslere ve türlere nasıl atandığına bağlı olduğundan belirsizlikler ortaya çıkar; bu da fosillerin çoğu uzun zaman önce soyu tükenmiş olan organizmaların temsilcileri olduğu için zordur. Sayılar, bu belirsizliklerin matematiksel olarak nasıl ele alındığına bağlı olarak değişir. Bununla birlikte, fosil kayıtlarındaki tür çeşitliliğinde büyük kayıpların olduğu şüphe götürmez ve bu olayların göreceli şiddeti oldukça iyi ölçülebilir. Permiyen sonu yok oluşu, Fanerozoik'in beş büyük kitlesel yok oluşunun en şiddetlisidir.

Bu sayılar aynı zamanda biyolojik sınıflandırmanın yüksek hiyerarşilerinde yok olma oranlarının daha düşük olduğunu göstermektedir (Bölüm 6). Bunun üzerine biraz düşünürseniz nedenini anlayabilirsiniz. Bütün bir aileyi ortadan kaldırmak, farklı cinsler arasında ve Dünyanın farklı bölgelerinde birçok türün neslinin tükenmesini gerektirecektir, bu nedenle, biyolojik hiyerarşinin art arda daha yüksek seviyelerini yok etmek genellikle daha zordur. Bu istatistiklere de yansımaktadır.

Beş büyük kitlesel yok oluş, Dünya gezegeninde artan canlı çeşitliliği zemininde meydana gelir (Şekil 15.2). Bu olaylar sırasında çeşitlilikteki büyük azalmalara rağmen, yok oluşu takiben, canlı çeşitliliği birkaç on milyon yıl veya daha kısa bir süre içinde yok oluş öncesi seviyelere ulaşmıştır. Yok oluşlar, daha sonra yeni türler tarafından işgal edilecek olan nişlerin boşalmasının yarattığı etkiye sahiptir. Bu durum çeşitliliğin, en azından jeolojik zaman dönemleri bağlamında, neden hızla iyileşebileceğini açıklayabilir.

Belki de bu boş niş fırsatlarından en ünlüsü, memeliler için nişler ortaya çıkaran Kretase–Paleojen (K–Pj) sınırında gerçekleşen dinozorların ölümüdür. O zamana kadar, sürüngenlerle kabaca aynı zamanda evrimleşmiş olsalar da, memelilerin çoğu küçük veya gececiydi. Sürüngenlerin egemen olduğu bir biyosferin uçlarında yaşamlarını sürdürdüler. Kretase'den sonra, büyük organizmalar için mevcut nişlerin çoğu boşaldı, küçük sıçan benzeri memeliler buralara egemen olmayı başardılar. Memeliler sonunda, örneğin Kuzey ve Güney Amerika'daki dev etçil kuşlarla rekabet ederek, karada, denizde ve havada yeni mevcut ekolojik alanları ele geçirmeyi başardılar. Memelilerin artışı sonunda bizim ortaya çıkışımıza yol açacak.



***Şekil 15.2** Tüm cinsleri ve iyi anlaşılmış olanları (ayrı cinsler olarak iyi tanımlanmış) gösteren, Fanerozoik sırasında deniz organizması cinslerinin değişen çeşitliliği. Fanerozoik'teki başlıca beş yok oluşun ('Büyük 5') yanı sıra, yine de kayaç kayıtlarındaki çeşitlilikte azalmalar meydana getiren daha küçük yok oluşlar ('Diğer Yok Oluş Olayları') da gösterilmektedir* (Kaynak: wikicommons, Albert Mestre).

15.4 Dünya Tarihindeki Diğer Yok Oluşlar

Beş büyük kitlesel yok oluşla büyülenmek kolaydır. Sonuçta hepsi çok çarpıcı olaylar. Bununla birlikte, Dünyadaki yaşam, tam olarak anlaşılmayan veya nedenleri belirlenmeyen daha küçük yok oluşlar da yaşadı. Bir sonraki bölümde tartışacağımız bazı nedenler de dâhil olmak üzere çevresel koşullardaki değişiklikler, Dünyadaki yaşamın, sürekli olarak türleri sınırlarının ötesine itme potansiyeline sahip bozulmalara maruz kaldığı anlamına gelir.

Ayrıca tartışmamızın yalnızca Fanerozoik üzerine odaklandığını da fark edeceksiniz. Bu yanlılığın nedeni, kalıntıları genellikle kayaç kayıtlarında kötü bir şekilde korunduğu için mikropların kitlesel yok oluşa maruz kaldığına dair elimizde çok az kanıt bulunmasıdır. Kayaçlarda fosilleşmiş büyük gövdeli organizmalar, kitlesel yok oluşları değerlendirmek için daha iyi bir kayıt sağlar. İstisnalar, kalsiyum karbonat kabukları oluşturan ve kayaç kayıtlarında bulunan foraminifera gibi mikroorganizmalardır. Bu mikroorganizmalar, K–Pj sınırında yok olmaya maruz kaldılar, bu da bu canlıların gezegen ölçeğindeki çevresel değişiklikler esnasında zarar gördüğünü düşündürdü.

Dünya tarihinde Fanerozoik'ten önce de, çarpıcı çevresel değişikliklerin olduğu dönemleri biliyoruz. Bunlardan bazılarını daha önce tartışmıştık: Geç Dönem Ağır Bombardımanı, Kartopu Dünyası olayları ve Büyük Oksidasyon Olayı. Fosil kayıtlarına ilişkin kanıtlar zayıf olsa da, bunların, çevresel koşullardaki değişikliklerden etkilenen çok özelleşmiş veya küçük coğrafi dağılımları olan prokaryot grupları ve erken ökaryotlar için yok olma dönemleri olabileceğini düşünmek mantıklı olabilir.

15.5 Yok Oluşun Nedenleri

Kitlesel yok oluşun nedenleri nelerdir? Aşağıdaki bölümlerde bazı büyük kitlesel yok oluşlar için tartışacağımız birkaç önde gelen sebep vardır. Burada, onları tanıtmak için bazı genel yorumlar yapılmıştır.

Volkanik nedenler. Büyük ölçekli volkanik patlamalar, atmosfere CO_2 salma, sera etkisini artırma ve dolayısıyla çarpıcı bir ısınma dönemine neden olma potansiyeline sahiptir. Isınma, su kütlelerindeki organizmalarda ısıl strese neden olmak ve habitat aralığındaki değişiklikler dâhil olmak üzere potansiyel olarak çeşitli zincirleme etkilere neden olabilir. Metan gazı hidratlarının volkanik aktiviteyle erimesi, metan gazının atmosfere salınmasına neden olacak ve bunun kendisi sera ısınmasında bir artışa neden olacaktır. Bu bölümde volkanik nedenleri daha ayrıntılı olarak tartışacağız.

Deniz seviyesi değişimi. Deniz seviyesi değişiklikleri, kıta sahanlığı alanını veya kolonizasyon için uygun araziyi değiştirir. Tür çeşitliliğinin, mevcut habitatın fiziksel alanıyla ilişkili olduğu bilinmektedir. Ne kadar fazla habitat mevcutsa, o kadar fazla tür barındırılabilir. Bu tür-alan ilişkisi olarak bilinir. Deniz seviyesindeki değişimin neden olduğu, denizde ve karada mevcut habi-

tat alanının azalması bu nedenle yok oluşa neden olabilir. Deniz seviyesindeki değişiklikler, bazı yok oluş mekanizmalarının nasıl bağlantılı olabileceğini gösteren, buzulların erimesinin deniz seviyesini artıracağı ısınma olaylarıyla ilişkilendirilebilir.

Asteroit ve kuyruklu yıldız çarpmaları. Dünya, tarihi boyunca asteroitler ve kuyruklu yıldızlar tarafından dövüldü. Çarpmaların neden olduğu geniş çaplı etkilerin atmosfere toz salma, Güneş ışığını kesme, fotosentezi durdurma ve böylece diğer etkilerin yanı sıra besin zincirlerini bozma potansiyeli vardır. Bu mekanizmayı bu bölümde daha ayrıntılı olarak tartışacağız.

Süpernova ve gama ışını patlamaları. Bu, kitlesel yok oluşların önerilen nedenleri arasında daha sıra dışı olanıdır. Gökadamız içerisinde oldukça sakin bir mahallede yaşıyoruz. Bununla birlikte, Güneş Sistemi gökada çevresinde 250 milyon yıllık yolculuğuna devam ederken, yaklaşık her 200–300 milyon yılda bir, Dünyaya yeterince yakın bir yerde (yaklaşık 30 ışık yılı) ozon tabakasının delinmesine neden olan, atmosferin iyonlaşması ve atmosferik kimyanın bozulması yoluyla iklimi etkileyen bir süpernova patlamasının meydana gelebileceği tahmin edilmektedir. Kesinlikle bu olaylar bizim gökadamızda meydana gelir. 1604 yılında, 20.000 ışık yılı uzaklıkta bir süpernova gözlemlendi (Kepler süpernovası; Bölüm 9, Şekil 9.6). Bu, çıplak gözle görülebilen en son olaydı. Yoğun ve çok uzak radyasyon patlamaları (muhtemelen süpernova patlamaları veya nötron yıldızları arasındaki çarpışmalardan kaynaklanan) olan gama ışını patlamaları, yeterince yakın bir mesafede meydana gelmeleri halinde atmosfer koşullarında değişikliklere neden olabilir. Bu olayları kitlesel yok oluşların nedeni olarak belirlemedeki en büyük sorun, olayları kayaç kayıtlarındaki değişikliklerle ilişkilendirmenin zorluğudur. Buz çekirdeklerinde demir-60 ve berilyum-10 aramak için girişimlerde bulunuldu. Bu kısa ömürlü izotoplar süpernova patlamalarında oluşur ve bu nedenle konsantrasyonlarındaki yükselmeler yakın zamanlı bir olayın varlığını düşündürür. Kutup buzu kaydı için, 40.000 öncesi için önerildiği gibi, Berilyum-10 zirveleri ileri sürüldü. Derin okyanus kabuğunda 2,8 milyon yıl önce bir demir-60 tepe noktası rapor edildi. Ancak bu tepe noktalarının genişliği, sıklıkları ve astronomik yöntemlerle patlama adayı bulunamaması bu iddiaları şüpheli kılmaktadır.

Biyolojik değişiklikler. Yaşamın kendisi yok oluşu sürekli kılabilir. Biyosfer değiştikçe, hayatta kalmak için daha iyi donanımlı organizmalar, yok olma yolundaki diğer organizmaları geride bırakabilir. Ek olarak, yeni organizmalar çevresel koşulları diğer organizmaların yok oluşuna neden olacak kadar değiştirebilir. Büyük Oksidasyon Olayı (Bölüm 14), metabolizmadaki (oksijenli fotosentezde elektron vericisi olarak suyun kullanılması) evrimsel bir yeniliğin atmosferdeki oksijen konsantrasyonlarını artırarak küresel ölçekte çevresel değişikliklere nasıl yol açtığının bir örneğidir. Yüzeyde yaşayan bazı anaerobik mikroorganizmalar yok olmaya sürüklenmiş olabilir. Devoniyen sonu yok oluşunda göreceğimiz gibi, ormanların evrimi yok oluşa neden olabilecek bir olaydır.

Çoklu etkiler. Yukarıda açıklanan olayların hiçbiri birbirini dışlamaz ve bazı yok oluş olaylarının bu mekanizmaların bir kombinasyonu olması mümkündür, çünkü bunların tümü biyosferde strese neden olacaktır.

Şimdi, bazı kitlesel yok oluşları ve bunların önerilen nedenlerini inceleyelim.

15.6 Kretase Sonu Yok Oluşu

Tüm Fanerozoik yok oluşlar arasında, bir zamanlar Kretase–Tersiyer (K–T) yok oluşu olarak adlandırılan, Kretase–Paleojen (K–Pj) yok oluşunun (Paleojen gayri resmi olarak Alt Tersiyer olarak bilinir) en büyük ilgiyi çektiğini söylemek yanlış olmaz. Bu yok oluş ayrıca, Kretase sonu yok oluşu olarak da adlandırılır. Kısmen en yakın zamanlı ve bu nedenle fosil kayıtlarının en iyi korunmuş olduğu yok oluş olduğu için en yoğun ilgiyi görmektedir. Belki de bu durum, yıkımın ölçeği Permiyen sonu yok oluşuyla denk olmadığı için yersizdir. Dinozorların ölümüyle olan ilişkisi kötü şöhretinin bir kısmını açıklayabilir, ancak aynı zamanda okyanus taksonlarının (plankton grupları dâhil) ve birçok kara hayvanının neslinin tükenmesine de neden olmuştur.

Bununla birlikte, bu yok oluş öğreticidir, çünkü gerçekleşme nedenlerine yönelik öneriler, son bölümde kısaca açıklanan olası mekanizmaların neredeyse tamamını kapsar. Bu nedenle önce bu yok oluşu incelemek önemlidir. Önerilen nedenlerden birine –meteor çarpması– dair güçlü kanıtlar vardır.

Tartışma Noktası: Ya K–Pj Yok Oluşu Olmasaydı?

'Ya Olursa?' tipi düşünce deneyleri her zaman bilimsel olarak faydalı değildir, ancak bizi farklı şeyler hakkında düşünmeye, evrenimiz hakkında ne kadarının belirli koşullara bağlı olduğunu ve evren hakkında ne kadarının kaçınılmaz olduğunu düşünmeye teşvik etmede rol oynayabilirler. Böyle *gedanken deneylerinden* (düşünce deneyi) biri, K–Pj yok oluşu olmasaydı ne olurdu. Dinozorlar zekâ sahibi canlılar olur muydu? Bu spekülasyonlardan belki de en bilineni Dale Russell'ın dinozoroididir (Şekil 15.3). Russell, Kanada Ulusal Müzesinde omurgalı fosillerinin sorumlusuydu ve Troodontid dinozorlarının izlediği evrimsel bir yol hakkında spekülasyonlar yaptı. Russell, dinozorlar arasında ensefalizasyon katsayısında veya EQ'da (aynı vücut ağırlığına sahip diğer türlerle karşılaştırıldığında göreceli beyin ağırlığı) bir artış olduğunu fark etti. İlk Troodontid kafatasını keşfeden Russell, EQ'sunun diğer dinozorlarınkinden altı kat daha yüksek olduğuna ve çoğu dinozordan daha fazla bilişsel kapasiteye sahip olabileceğine dikkat çekti. Zeki bir dinozorun, evrim geçirme şansı olsaydı, kuş sesi gibi ses çıkaracağını öne sürdü. Akıllı dinozorun her iki elinde üç parmak ve büyük gözleri olurdu. Bazı insanlar tüm bu düşünce deneyinin fazla insan merkezli olduğunu düşünüyor. Sen bu konuda ne düşünüyorsun? Bu tür spekülasyonların bilimsel değeri var mıdır? Russell'ın düşünce deneyi başka bir soruyu daha gündeme getiriyor: Zekâ sahibi canlıların ortaya çıkışı kaçınılmaz mıdır?

Russell, D.A., Séguin, R. (1982) Reconstruction of the small Cretaceous theropod Stenonychosaurus inequalis and a hypothetical dinosauroid. *Syllogeus* **37**, 1–43.



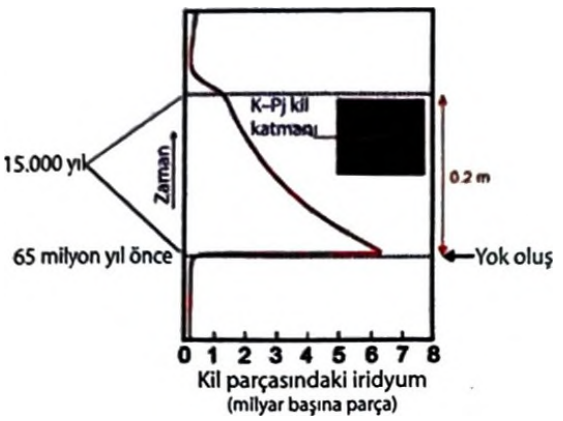
Şekil 15.3 Dale Russell'ın akıllı dinozoru, bir troodontid, Stenonychosaurus inequalis *modelinin yanında gösterilmiştir. Ek: Başın ve omuzların yakından görünümü* (Kaynak: Kanada Doğa Müzesi, Ottawa).

Göktaşı çarpması mıydı? K–Pj sınırında gerçekleşen bir asteroit çarpmasına yönelik çok sayıda kanıt var ve bu kanıtlar birbiriyle bağlantılı olarak çeşitli biçimler alıyor. Kretase sonunda asteroit çarpmasının kanıtı, tüm zamanların en büyük bilimsel dedektif hikayelerinden biridir ve bu nedenle bu bilgiyi tanımlamaya değer.

Jeolog Luis Alvarez (1911–1998) ve oğlu Walter, 1980'lerde, K–Pj sınırına ait kayaç kayıtlarında bir ağır element olan iridyumda artış olduğuna dair kanıtlar sunan bir çalışma yayınladılar (Şekil 15.4). Bu artış, arka plan konsantrasyonundan bile çok daha büyüktü. İridyum, asteroit materyaliyle ilişkilidir ve Dünyanın bu elementi başlangıçtan beri içermesi durumunda, farklılaşma esnasında derinlere gömülmüş ve bu iç kısımda birikmiş olmalıdır. Dünya yüzeyindeki konsantrasyonda var olan bir artış, elementin uzaydan geldiği şeklinde yorumlanır. Volkanik aktiviteden dolayı iridyumda bir artış meydana geldiği de düşünülebilir, bu da elementin yeraltından geldiği anlamına gelir, ancak bunun, olası bir çarpma için öne sürülen diğer kanıtlar göz önüne alındığında, en iyi açıklama olduğu düşünülmemektedir.

Diğer işaretler biri de sınırda şoklanmış kuvarsın varlığıdır (Şekil 15.5a). Kuvars, bir asteroit veya kuyruklu yıldızdan gelen şok dalgasıyla ilişkili yoğun basınçlara maruz kaldığında, materyal doğrusal özellikler olan 'düzlemsel deformasyon özellikleriyle' dolar. Bu özellikler K–Pj sınırındaki kuvarsda mevcuttur.

Bir çarpma sırasında kayaç erir ve atmosfere fırlatılır. Atmosferden geçerken, küreler (erimiş kayaç, tıpkı yağmur damlaları gibi, bir küre oluşturacaktır, çünkü bu şekil materyalin yüzey alanını en aza indirir) veya bazen halter benzeri şekiller oluşturmak için katılaşma eğilimindedir. Bu cisimler yere düşerek

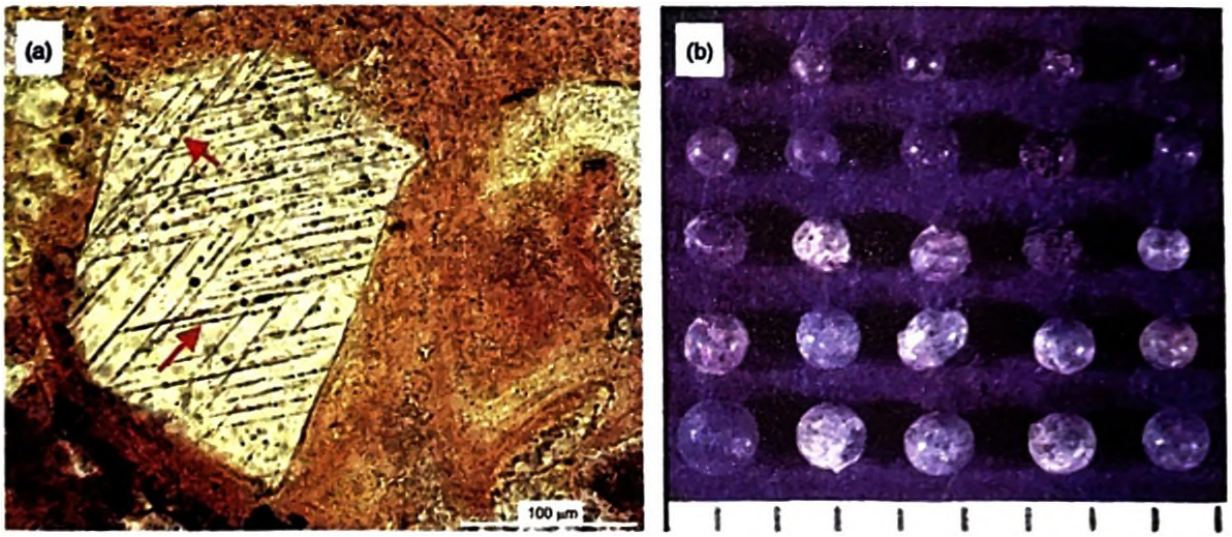


Şekil 15.4 Kayaç kayıtlarında Kretase–Paleojen sınırındaki bir iridyum çivisi, bir asteroitin gelişine işaret ediyor. Burada gösterilen veriler, kalkerlerde bulunan killerden alınmıştır. İç kısım, bir iridyum anomalisinin gözlemlendiği K–Pj sınırına karşılık gelen Drumheller, Alberta, Kanada'dan K–Pj kil tabakasıdır.

camsı tektit katmanları oluştururlar (Şekil 15.5b). Sınırda bunlardan çok sayıda bulunması, çarpma için bir başka kanıttır. Tektitlerin kireçtaşı ve sülfat kimyası vardır (volkanik kayaçların yok), bu da onların volkanik bir patlamadan değil, tortul kayaca çarpan bir cisimden oluşturulduklarının kanıtıdır.

Elimizde çarpma lehinde daha çok kanıt var. Sınırdaki kurum ve odun kömürünün varlığının, Dünya çapında çarpma kaynaklı ısınmanın tetiklediği küresel orman yangınlarından kaynaklandığı öne sürülmüştür.

Böyle bir çarpmanın çevresel etkileri yıkıcı olurdu. Kanıtlar, yaklaşık 10 km çapında bir kayanın Dünyayla çarpıştığını gösteriyor. Çarpma enerjisi, yaklaşık 100 milyon megaton patlayıcıya, TNT (çarpma olaylarıyla ilgilenen bilim insanları tarafından yaygın olarak kullanılan ilginç bir birim), eşdeğer olurdu. Çarpma sırasında, toz atmosfere karışacak, Güneş ışığını engelleyecek veya birkaç aydan birkaç yıla kadar ciddi şekilde azaltacak (normal seviyelerin yaklaşık %20'sine kadar), böylece fotosentezi kesintiye uğratacak ve kısa süreli



Şekil 15.5 Bir çarpma olayıyla ilişkili K–Pj sınırındaki jeolojik değişiklikler için kanıt. (a) Düzlemsel deformasyon özellikleri içeren şoklanmış kuvars parçası (ortada solda). Bunlar kristal içindeki doğrusal özelliklerdir; örnekler kırmızı oklarla vurgulanmıştır (Kaynak: Martin Schmieder). *(b) K–Pj sınırından küçük tektitler. Alt ölçek çubuğu milimetre cinsindendir* (Kaynak: Kanada Jeolojik Araştırması).

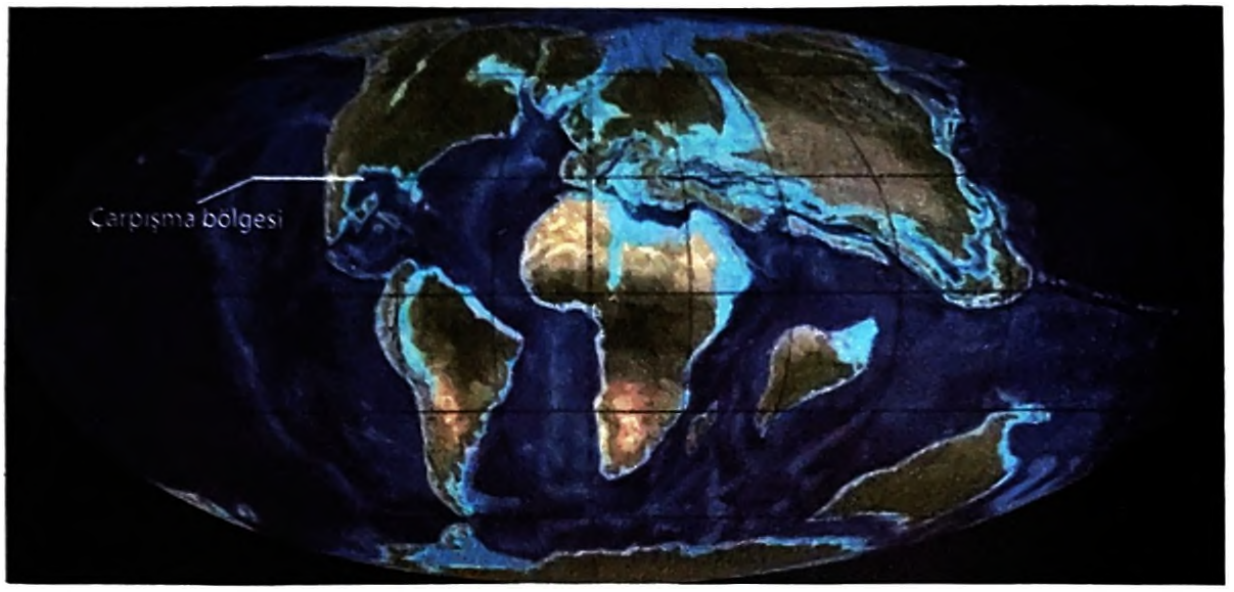
yoğun bir soğukluğa neden olacaktır. Bu sınırın özel durumunda, sülfat birikintilerinin buharlaşması, atmosferde yüksek sülfürik asit damlacıkları üretecek ve kendileri de oldukça yansıtıcı aerosoller oluşturarak soğumaya katkıda bulunacaktır. Modeller, toz bulutunun hidrolojik döngüyü bozabileceğini ve potansiyel olarak aylarca yağmuru önleyebileceğini öne sürüyor. Otçullar, taze yiyecek olmadan ölürlerdi, sonunda etoburlar gibi onlara bağımlı olan besin zincirinin diğer katmanlarını bozarlardı (Şekil 15.6). Özetle, çarpmanın bir 'çarpma kışı'na, yani soğuk, karanlık ve kuru koşullar dönemine neden olduğu olduğu düşünülmektedir. Üst atmosfere giren kimyasalların reaksiyonlarından ozon tabakasının tahrip edilmesi ve potansiyel olarak UV radyasyonunda geçici artışlara neden olmasıyla biyosfere daha fazla stres yüklenebilirdi. Dünya yüzeyine fırlatılan ısıtılmış malzemenin neden olduğu orman yangınları, bir başka felaket katmanı daha eklerdi.

Son olarak, bu olayı takip eden fosil kanıtları ilgi çekici ve bir çarpma kışı senaryosuyla tutarlıdır. Sınırda bir 'mantar artışı' gözlenir ve potansiyel olarak basitçe ölü ve azalan biyokütleden kaynaklanan çürüyen bir biyosfer olarak tanımlanabilecek bir şeyi düşündürür. Bunu takiben eğrelti otu sporlarında belirgin bir artış vardır. Eğreltiotu artışı, geniş alanların genellikle yeni açılan alanlardan yararlanan ve ormanların ve diğer bitki örtüsünün öldüğü yerlerde yetişen ilk bitki örtüsü olacak eğrelti otlarıyla kaplı olduğunu gösteriyor.

Çarpma hipotezi için daha fazla kanıt çarpma alanının tespit edildiği iddiasıyla sağlandı. Chicxulub krateri (180–300 km çapında; Şekil 15.7), Meksika'nın Yucatan Yarımadası'nda, Meksika Petrol şirketi Petróleos Mexicanos için çalışan bir jeofizikçi tarafından 1978'de keşfedildi. Verileri ticari gizlilik nedeniyle açıklamadılar, ancak 1991 yılında jeolog Alan Hildebrand tarafından 'yeniden keşfedildi'. Kayaç kaydındaki konumu K–Pj sınırıyla örtüşüyor ve kraterin çapı küresel ölçekte yok oluşa neden olacak 10 km'lik bir kayaçla tutarlı.



Şekil 15.6 Dinozorlar kışın etkisiyle yüzleşiyor (Kaynak: BBC).



Şekil 15.7 Meksika'daki Chicxulub çarpma kraterinin yeri, Kretase sonundaki yok oluştan sorumlu asteroitin önerilen çarpışma bölgesi, o zamanki kıtaların varsayılan modeliyle bir haritada gösteriliyor.

Dünyaya çarpan kayacın kendisinin doğrudan kanıtını bulmak zordur. Kayaçların çoğu, çarpma esnasında oluşan yoğun ısı ve basınçlar sırasında buharlaşmış olacaktır. Ancak, bir gramın 100 trilyonda biri olan olası bir parçanın, kuzeybatı Pasifik sınırında bir sondaj çekirdeğinde bulunduğu bildirildi.

Deniz seviyesi değişikliği miydi? Kretase'de deniz seviyesi yüksekti ve kara kütleleri birbirinden ayrıktı (kıtalar birbirine yakın olmasına rağmen). Bu ayrı kıtalar, sığ deniz organizmaları için çok sayıda kıta sahanlığı alanı olduğu anlamına geliyordu. Bununla birlikte, erken Paleojen'de deniz seviyesi daha düşüktü, kıtalar birbirinden daha uzaktı ve sığ deniz organizmaları için daha az kıta sahanlığı alanı mevcuttu. Bu nedenle deniz seviyesinin alçalması kıta sahanlığı alanının kaybına, örneğin Kuzey Amerika'nın Batı İç Deniz Yolu gibi iç denizlerin kaybına neden olurdu. Aynı zamanda, şüphelenildiği gibi, kara kütleleri kurak hale geldiyse, o zaman Dünya çapında yaşam için daha az yaşam alanı mevcut olabilir ve bu da yok oluşa neden olabilir.

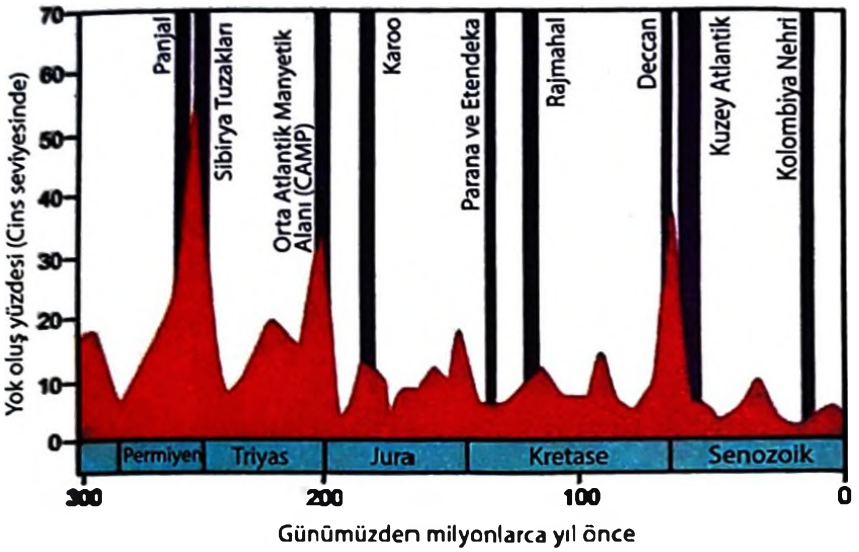
Volkanizma mıydı? Kretase'nin sonunda, mantodan yükselen dumanla (**taşkın bazaltları**) ilişkili büyük ölçekli volkanik aktiviteye dair kanıtlar vardır. Hindistan'daki Deccan Tuzakları (aşınmış kaya katmanları merdivenlere benziyor, çünkü İsveççede "trappa" kelimesi kullanılıyor) yaklaşık beş milyon yıl boyunca 500.000 milyon km^3'ten fazla bazaltik lav püskürttüğünü kaydediyor (Şekil 15.8). Bu taşkın bazaltları, uzun süreler boyunca büyük miktarlarda lav püskürmesine neden olur ve yaşam için derin sonuçlar doğurabilirdi. Volkanik patlamalardan kaynaklanan kükürt, atmosferde sülfürik asit aerosolleri oluşturarak kısa süreli soğumaya neden olabilir. Volkanik püskürme kaynaklanan CO_2 yayınımı daha uzun süreli küresel ısınmaya neden olurdu. Çevredeki bu



Şekil 15.8 Deccan tuzakları (kırmızı renkte) Kretase'nin sonuna doğru patladı ve günümüz Hindistan'ının geniş bir bölgesinde bulunabilir. Bunlar büyük ölçekli volkanik patlamaların kanıtıdır.

radikal değişikliklerin neden olduğu gıda mevcudiyetinin bozulması, kitlesel yok oluşlara neden olmuş olabilir. Volkanizmanın, asteroit çarpması tarafından kenara itilen biyosferde stres yaratması oldukça olasıdır. Bugünkü fikir birliği, asteroit çarpma hipotezinin güçlü bir desteğe sahip olduğu, ancak yok oluşa neden olabilecek diğer etkenlerin göz ardı edilemeyeceğidir.

Volkanizmanın diğer kitlesel yok oluşlara yol açtığı önerilmiştir. Sibirya'daki devasa sel bazaltları, Permiyen sonu yok oluşuyla ilişkilidir ve bu Sibirya Tuzaklarının, büyük iklim değişikliklerine katkıda bulunduğu öne sürülmüştür. Bazı (hepsi değil) kitlesel yok oluşlarla büyük volkanik olaylar arasında bir ilişki var gibi görünüyor (Şekil 15.9).



Şekil 15.9 Bazı (hepsi değil) yok oluşlar (kırmızı) ve büyük volkanik patlamalar (taşkın bazaltları; mavi dikey çubuklar dâhil) arasında bir benzerlik, volkanik kaynaklı yok oluşların bir göstergesi olarak öne sürülmüştür. Fanerozoik yok oluşlardaki volkanik aktivitenin kesin rolü ve kapsamı tartışmalıdır.

15.7 Fanerozoik'in Diğer Dört Büyük Yok Oluşu

15.7.1 Ordovisyen Sonu Kitlesel Yok Oluşu

Ordovisyen döneminin sonunda (yaklaşık 444 milyon yıl önce) bir dizi organizma kaderleriyle yüzleşti (Ordovisyen–Silüryen yok oluşu). Mercan, trilobit, brakiyopod (üst ve alt kabuğa sahip kabuklu deniz hayvanları) ve kafadan bacaklı (kalamar ve ahtapot dâhil) grupları öldü.

Yok oluşa yol açan nedenlerden biri soğuma olabilir. Kıtaların güney kutup bölgesinde toplandığı dönemde, bu durum hem kıtalarda hem de kıta sahanlığı alanlarında yaygın buzullaşmaları tetiklemiş olabilir.

Belki de bu yok oluşa ilişkin en ilgi çekici önerilerden biri bir gama ışını veya bir süpernova patlamasıdır (Şekil 15.10). Bu olayların tahmini etkilerinden biri, atmosferle iyonlaştırıcı radyasyon arasındaki etkileşimler sonucu üst atmosferde aerosollerin oluşmasıdır. Bu aerosoller Dünyayı soğutur ve Ordovisyen sonundaki soğumaya ilişkin kanıtın böyle bir olaydan kaynaklandığı öne sürülmüştür.

15.7.2 Geç Devoniyen Kitlesel Yok Oluşu

Geç Devoniyen yok oluşları (yaklaşık 372 milyon yıl önce) trilobitler, brakiyopodlar, mercanlar, kafadan bacaklılar ve balıkların temsilcilerini içeren bir dizi grubu yok etti. Değişikliklerin en az iki büyük yok oluş dönemine veya muhtemelen bir dizi daha küçük ölçekli yok oluşa atfedildiği düşünülüyor.



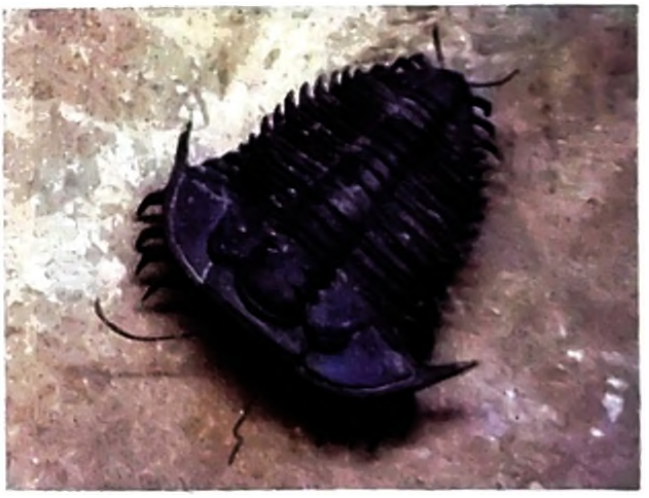
Şekil 15.10 Bir süpernova patlamasının kalıntıları. Bu, Dünyadan 168.000 ışık yılı uzakta, güvenli bir mesafede bulunan SN 1987A'dır. Acaba başka patlamalar yok oluşa neden olmuş mudur? (Kaynak: ESO).

Ordovisyen yok oluşu gibi, geç Devoniyen yok oluşu da buzullaşmanın başlangıcıyla ilişkilendirildi ve bir takım sebepler öne sürüldü. Önde gelen görüşlerden biri, fotosentezle atmosferdeki CO_2 azalmasını artıran, sera gazı konsantrasyonlarını azaltan ve Dünyayı soğutan ilk ormanların evrimidir. Ormanların yayılmasının bir yan etkisi, geniş kök sistemleriyle toprakların ve kayaçların parçalanması olurdu. Bu zamana kadar bitkiler, toprağa birkaç santimetreden fazla nüfuz etmeyen, yüzeyde yaşayan küçük bitkilerle sınırlıydı. Topraktan büyük miktarda yeni besin salınımı, organizmalar tarafından oksijen kullanılmasıyla nehirlerin ve okyanus ortamlarının anaerobik hale gelmesine neden olmuş olabilir ve bu durumun kendisi de yok oluşa yol açmış olabilir.

Soğumaya bir çarpma olayı da neden olmuş olabilir ve bu, Devoniyen sonu yok oluşları için önerilmiş olsa da, kanıtlar Kretase'nin sonu kadar ikna edici değildir.

15.7.3 Kitlesel Yok Oluşların En Büyüğü: Permiyen Sonu Yok Oluşu

Permiyen sonu yok oluşu (veya Permo–Triyas Yok Oluşu) (yaklaşık 252 milyon yıl önce) türlerin %90'ından fazlasının sonunu getirdi. Bu, Dünyada meydana gelen en büyük yok oluştur. Bu dönemde, Eeken Kambriyen'den beri önceki tüm çevresel zorluklardan sağ kurtulan trilobitler bile yok oldu (Şekil 15.11) ve mercan resifleri ile ormanlar da dâhil olmak üzere büyük ekosistemler ortadan kalktı.



Şekil 15.11 Trilobitler. Permiyen yok oluşuyla nesli tükenen gruplardan sadece bir tanesi. Bu örnek yaklaşık 3 cm uzunluğundadır.

Kretase sonu yok oluşu gibi, bu dönem sel bazaltlarının patlamasıyla aynı zamana denk geldi. Sibirya Tuzakları, günümüz Sibirya'sının iki mil-

yon km²'sini kaplar ve muhtemelen bir milyon yıl veya daha kısa bir sürede patlak veren, üretilen lav hacmi, dört milyon km³'e kadar çıkabilirdi. Taşkın bazaltlarının tek yok oluş mekanizması mı yoksa katkıda bulunan etkenlerden biri mi olduğu tartışmalıdır.

Metanojenler tarafından üretilen metan ve/veya atmosfere metan salacak olan metan gazı hidratlarının erimesi, küresel ısınmaya daha fazla katkıda bulunacaktı. Sel bazaltlarından çıkan kükürt dioksitin yağmur suyuyla karışarak asit yağmuru olarak yağan sülfürik asit ürettiği ve ormanların yok olmasına neden olduğu düşünülüyor. Bu dönemde ormanlara hâkim olan türdeki çam ağaçlarının (açık tohumlular) yok edildiğine ve yerlerini fırsatçı eğrelti otlarına bıraktığına dair yaygın kanıtlar vardır. Bu süre zarfında artan çökelme için jeolojik kanıtlar, yüzey bitkilerinin öldüklerini, toprakları açıkta bıraktığını ve daha yüksek erozyon oranlarına neden olduğunu göstermektedir.

Foraminiferler (veya kısaca foramlar; (Şekil 15.12) gibi) gibi kalkerli kabukları olan deniz organizmaları özellikle sert bir darbe aldı. Bunların %90'ından fazlasının nesli tükendi. Bu, muhtemelen volkanik gazlar tarafından okyanus asitlenmesine işaret ediyor. Permiyen sonu oksijen izotop kaydı, okyanus sıcaklıklarının, belki de kendisinin volkanik CO_2'nin neden olduğu yoğun bir küresel ısınma döneminin neden olduğu, 40 °C'ye yükseldiğini gösteriyor. Okyanusların ısınması durgunluğa neden olurdu; bu, çok az fosil içeren kayaç kayıtlarındaki siyah pirit bakımından zengin şistlerle kanıtlanmıştır; bu, okyanusların kokuşmuş, durgun ve anaerobik (anoksik) hale geldiğinin bir işaretidir. Bu süre zarfında çılgınca değişen karbon izotop değerleri, okyanuslardaki fotosentezin bir veya birden fazla çöküşüne ve Dünya sistemine karbon girişine (volkanik patlamalardaki CO_2 gibi) işaret eder.



Şekil 15.12 Kalsiyum karbonat kabuğunu gösteren bir foram. Bu örneğin çapı yaklaşık 0,5 mm'dir (Kaynak: wikicommons, Hannes Grobe).

$\delta^{15}N$'de bir azalma olarak görülen değişen nitrojen izotop değerleri, gelişmiş nitrojen fiksasyonuna işaret eder. Azot fiksasyonu düşük oksijen seviyeleri gerektirdiğinden, bu okyanusların oksijen açısından fakirleştiğini gösterir. Sınırın ötesindeki biyobelirteç çalışmaları, bileşiklerin, izorenieratanın ve izoprenoidlerin geliştirilmesini önermektedir. Bunlar, oksijensiz fotosentez yapan yeşil kükürt bakterileriyle (Bölüm 5) ilişkili bileşiklerdir. Fotosentez için kullanabilecekleri daha yüksek H_2S

seviyelerine sahip bir ortamda çoğalırlardı. Yine, bu kanıt durgun anaerobik suyla tutarlıdır. Genel olarak, yok olma kanıtları, yok olmanın deniz kurbanlarının sıcaklık, pH, düşük oksijen mevcudiyeti ve su CO_2 içeriğindeki hızlı değişikliklerde hayatta kalma yeteneği zayıf olan organizmalar olduğunu göstermektedir.

Hep birlikte, kanıtlar okyanuslarda ve karada sadece birkaç yüz bin yıl içinde gerçekleşmiş olabilecek bir felaketi açıkça gösteriyor. İstikrarlı ekosistemlerin bir kez daha kurulması beş milyon yıl aldı. İstikrarlı koşullardan yararlanan yeni ortaya çıkan gruplardan biri de ataları bu dönemde ortaya çıkan dinozorlardı.

15.7.4 Trias Sonu Yok Oluşu

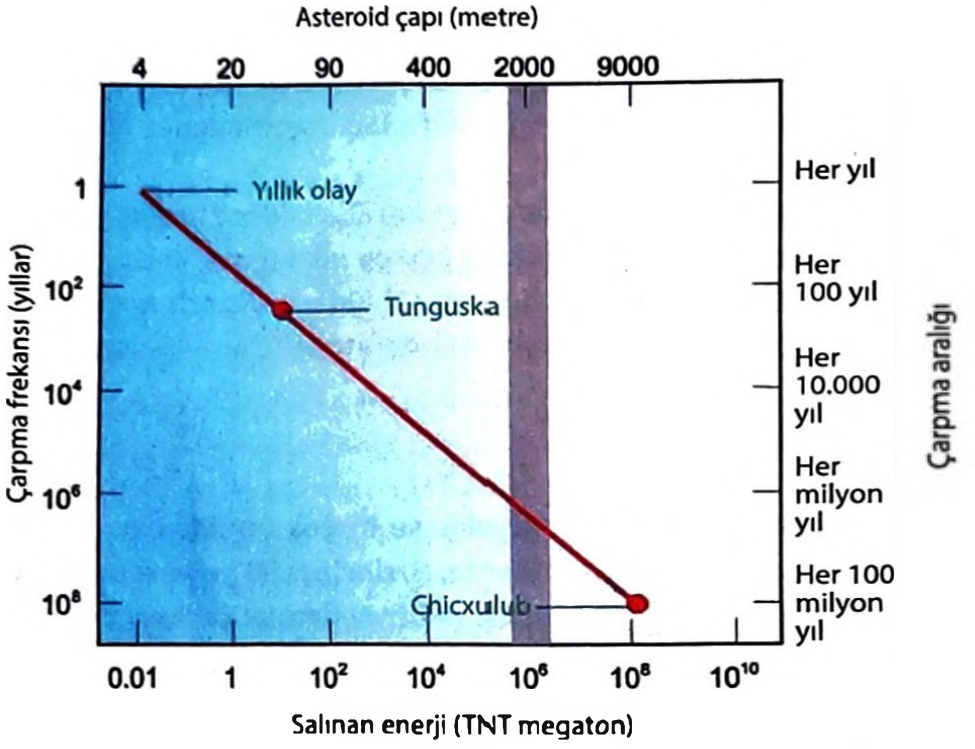
yaklaşık 201 milyon yıl önce istiridyeler ve birçok yumuşakça gibi çeşitli deniz organizmaları da dâhil olmak üzere, türlerin %50'ye varan kaybı, okyanus anoksisinin bu Triyas–Jura yok oluşunun bir nedeni olabileceği yönünde önerilere yol açmıştır. Görünen o ki, yok oluş hızlıydı ve muhtemelen 10.000 yıllık bir zaman diliminde meydana geldi. Bu, volkanizmanın rolünü destekleyecektir. Yok olma, Atlantik Okyanusunun yayılmasına eşlik eden taşkın bazaltlarının ekstrüzyonuyla aynı zamana denk geldi. Sürüngenlerin ve amfibiyenlerin karada neslinin tükenmesi, etkilerin okyanuslarda sınırlı olmadığını gösteriyor. Volkanizma, CO_2 salınımına neden olarak küresel ısınmayı tetiklemiş olabilir.

15.8 Çarpma Olayları ve Yok Oluş

Bir yok olma mekanizması olarak göktaşı ve kuyruklu yıldız çarpma olayları popülerdir. Zira bu olasılıkta büyüleyici bir şey var. Öte yandan onlara yönelik bu popüler bakıştan ayrı olarak, Dünya sistemindeki yaşamın neden olmadığı dalgalanmalar açısından çok açık örnek teşkil ettikleri ve geçmişte biyosferi dramatik bir şekilde etkiledikleri için yaşam tarihinde önemlidirler. Şimdi bunların etkilerini biraz daha keşfedelim.

Yok olma sınırlarındaki çarpmalara ilişkin kanıtlar her zaman güçlü değildir. Permiyen sonunda bir asteroitin çarptığına yönelik iddia bir zamanlar popülerdi, ancak çarpma sınırındaki kanıtlar ikna edici değildir. Çarpmanın en güçlü kanıtı K-Pg sınırındadır ve bir iridyum anomalisi, tektit, şoklanmış kuvars, is lekesi ve olayla bağlantılı potansiyel bir krater dâhil olmak üzere çeşitli kanıtlar şeklinde karşımıza çıkar.

Çarpma olaylarının yaşam için ciddi bir tehdit olduğuna dair çok az şüphe vardır. Biyosferde küresel ölçekte bozulmaya neden olabilecek bir nesnenin günümüzde Dünyayla çarpışma sıklığının yaklaşık her 100 milyon yılda bir olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 15.13). Ancak, yerel yıkıma neden olabilecek olaylar çok daha sık görülür. 1908'de Sibirya'da Tunguska'nın üzerinde meydana gelen ve 2000 km²'lik bir ormanı dümdüz yapan olay türü, her bin yılda bir veya



Şekil 15.13 Çarpma olaylarının sıklığı ve enerjisi. Enerji, patlayıcı TNT'nin yaygın olarak kullanılan eşdeğer megaton birimlerinde verilmiştir. Ayrıca, Tunguska olayı ve Chicxulub'daki Kretase sonu etkisi de gösterilmektedir. Gri çubuk, bir çarpma enerjisinin yerel ölçekte çarpmalara neden olmaktan küresel ölçekte bozulmaya (potansiyel olarak bir kitlesel yok oluşa) geçiş yaptığı bölgeyi temsil eder.

daha fazla sıklıkta meydana gelebilir. Buradaki patlama, 30 megaton TNT'ye eşdeğerdi, ancak hiçbir krater oluşmadı. Cisim atmosferde patlayıp hava dalgası olarak etki etti. Bu olay Dünyanın büyük ölçüde boş bir bölgesinde meydana gelse de, eğer insan nüfusunun bulunduğu bir alanın yakınında meydana gelirse, bir şehri yok edebilir ve birçok insanı öldürebilir.

Pek çok uzay bilimcisi ve uzay ajansı tehdidi ciddi olarak değerlendiriyor, çünkü neslin tükenmesine neden olan bir olayın olasılığı düşük olsa da, bu sadece bir istatistiksel bir oyundur. Her yüz milyon yıl, üç tanesinin hemen yarın gerçekleşip sonra çok uzun zaman boyunca hiçbir şey olmaması anlamına gelebilir. Güneş Sistemimizdeki asteroitleri haritalama ve böylece onları erken tespit edebilecek bir durumda olma çabası, Spaceguard gibi göktaşı tespit programlarında etkili olmuştur.

Bir göktaşını Dünyadan saptırmak önemsiz bir iş değildir ve şu şekilde çok sayıda plan önerilmiştir: Patlayıcılar kullanarak göktaşlarını Dünyadan uzaklaştırmak, radyasyonun yansımasını sağlamak için bir tarafı beyaza boyamak, küçük bir sapma eğilimi vermek, rotadan saptırmak veya yapıyı buharlaştırmak ve yön değiştirmesine neden olmak için bir tarafından lazerle vurmak (Şekil 15.14). Bu yöntemlerin tümü, tehdidi erken yakalamaya bağlıdır, erkenden

saptandığında çok küçük bir açısal sapma, büyük bir sapma açısı anlamına gelebilir. Erken yakalama da, göktaşlarının yerine dair iyi haritalara sahip olmaya ve onları güvenilir bir şekilde takip edebilmeye bağlıdır. Ayrıca, bu tür cisimlerin farklı çeşitlerinin yoğunluğu hakkında da pek bilgimiz yok, bu da onları saptırmak için gereken enerjinin ne kadar olduğunu belirsiz hale getiriyor.



Şekil 15.14 Asteroidin yapısının bir tarafındaki materyali buharlaştırmak üzere yoğun lazerlerle donatılmış küçük bir uzay aracı filosu kullanarak Dünyayla çarpışma doğrultusundaki bu asteroidi saptırmak üzere onu dürtmeye ve yörüngesini küçük bir açıyla değiştirmeye yönelik bir taslak (Kaynak: NASA).

Daha da zor olanı, daha da öngörülemeyen, haritalaması daha da zor olan kuyruklu yıldızların yönünü değiştirmektir. Asteroitlerden çok daha hızlı seyahat ederler. Kuyruklu yıldız hızları yörüngelerine bağlı olarak büyük ölçüde değişse ve bundan daha hızlı seyahat edebilseler de, tipik hızlar asteroitler için yaklaşık 15 $km.s^{-1}$ ve kuyruklu yıldızlar için yaklaşık 50 $km.s^{-1}$'dir. Daha hızlı hareket etmelerinin yanı sıra, daha az görünmelerine neden olan oldukça eliptik yörüngelere sahiptirler. Doğrultusu Dünyayla kesişen bir kuyruklu yıldız bize harekete geçmek için çok az zaman bırakabilir.

15.9 Yok Oluşlar ve Yaşam Hakkında Bazı Sorular

Kitlesel yok oluşlar, biyosferdeki değişikliklerin nasıl yönlendirildiği hakkında bazı önemli soruları gündeme getiriyor. Çevresel koşullar değiştikçe, çeşitliliğe sahip bir organizma popülasyonu üzerinde bir seçilim baskısı oluşturduğuna dair Darwinci ilkeyi biliyoruz. Seçilim baskısı, bazı varyasyonları ortadan kaldırır, diğerlerini yavru üretebilecekleri şekilde canlı bırakır ve bu böyle devam eder. Bununla birlikte, ani kitlesel yok oluşlar, özellikle bir asteroit çarpmasının neden olduğu dramatik durumlar, evrimin bu kademeli şekilde çalışması için neredeyse hiç zaman bırakmaz. Yok olma olayları arasındaki aralık o kadar büyük ve nedenler o kadar çeşitlilik gösteriyor ki, bir sonraki benzer yok oluş gerçekleştiğinde, son yok oluştan geriye kalan türlerin çok azı, eğer varsa, hayatta kalmak için uyum gösterebilecektir. Bazı yok oluşların, yavaş yavaş değişen çevrelerine en iyi uyum sağlayan organizmaların hayatta kalmasından ziyade, en şanslıların hayatta kalması durumu olup olmadığı sorulması gereken bir sorudur.



Şekil 15.15, Permiyen sonundaki yok oluşun domuz büyüklüğündeki kurtulan canlısı ve "afet taksonunun" üyesi Lystrosaurus (Kaynak: wikicommons, Dmitry Bogdanov).

Kitlesel yok oluşların incelenmesi, biyologların ilgisini çeken, özellikle bu olaylardan kurtulan türlerin özelliklerini neler olduğu gibi birçok soruyu gündeme getirmiştir. Hayatta kalanların özellikleri bakımından kesin bir kural yoktur, çünkü ne olup biteceği kesinlikle her bir yok oluşun doğasına bağlı olacaktır. Yine de bazı örüntüler yakalayabiliyoruz. Hayatta kalanlar genellikle geniş coğrafi dağılıma sahip organizmalardır. Birçoğu, büyük popülasyon boyutlarına sahip olan veya yiyecek arama, oyuk açma yeteneğine sahip olma ve çevresel koşullardaki hızlı değişikliklerle çevresel stresin hayatta kalmasına olanak veren özelliklere sahip organizmalar olma eğilimindedir. Ancak bu her zaman doğru değildir. Permiyen dönemindeki yok oluş o kadar şiddetliydi ki, trilobitler gibi küresel dağılıma sahip bazı grupların soyu tükendi. Felaket taksonları adı verilen gruplar, yok oluştan sonra kısa bir süre Dünyaya egemen olan yaklaşık 1 m uzunluğunda domuz büyüklüğünde bir otobur olan son Permiyen sonu canlısı *Lystrosaurus*'u içeriyordu. Hayatta kalması şans eseri olsa da, kazma alışkanlığı ve küçük boyutu nedeniyle sağlam kalabildiği öne sürülmüştür (Şekil 15.15).

15.10 Altıncı Kitlesel Yok Oluş?

Şu anda altıncı bir yok oluşun içinde miyiz? Yok oluş hızının insan faaliyetleriyle arttığına dair hiçbir şüphe yok gibi görünüyor. 2014 yılında yayımlanan bir rapor (Pimm vd., 2014 olarak İleri Okumalarda gösterilmiştir), şimdiki yok oluş oranının arka plandaki yok olma oranından yaklaşık 1000 kat daha yüksek olduğunu ileri sürmektedir.

Kimi olgular ve ileri sürülenler hakkında tartışabiliriz. Bu, yok oluş hakkında özelleşmiş bir kitap değil ve anlayabileceğiniz gibi bu alan, hararetle tartışılan ve çekişmeli bir alandır. Bununla birlikte, belirli veri kümeleri hakkında ayrıntılı tartışmalara girmek, yürüttüğü endüstriyel faaliyetleriyle birlikte yedi milyar insanın Dünyanın biyolojik çeşitliliği üzerinde derin ve olağanüstü hızlı etkilere sahip olduğuna dair genel geniş fikir birliği karşısında önem arz etmeyecektir.

İnsan kaynaklı bir kitlesel yok oluş, astrobiyolojiyle harmanlanmış önemli noktaları veya soruları gündeme getiriyor. Zekâ sahibi canlıların ortaya çıkışı ve bir uygarlığın gezegen yüzeyinde yayılması genellikle gezegeni paylaşan diğer türlerin çeşitliliğinin kaybı anlamına mı gelir? Mevcut dönemi sınıflandır-

mayı seçerseniz, kitlesel bir yok oluş her zaman zekânın yükselişine eşlik eder mi? Mevcut kriz aynı zamanda, geçmişteki yok oluşların bize insan kaynaklı değişikliklerin potansiyel etkileri hakkında bilgi verip vermeyeceğini sormaya teşvik ediyor. Örneğin Permiyen sonu yok oluşu sırasında olduğu gibi, artan CO_2 düzeylerinin neden olduğu yok oluşlar hakkında bir şeyler öğrenebilir miyiz? Zira bu, atmosfere CO_2 salmaya devam edersek kendi etkimizin ne olabileceğini anlamamıza yönelik bir pencere sağlayacaktır.

Çeşitlilik kaybı ve bunun medeniyetimize olabilecek zararlı geri dönüşü gibi acil sorunu ele almamız yönündeki apaçık ve acil ihtiyaçtan ayrı olarak, insanlığın yükselişi ve gezegendeki diğer organizmalar arasındaki bağlantı bizi, yok oluşlar ve bir gezegendeki yaşam arasındaki bağlantı ve örüntü hakkında daha geniş kapsamlı soruları ele almaya zorlamaktadır.

Tartışma Noktası: Altıncı Yok Oluş?

İnsanların endüstriyel faaliyetinin ve çevresel değişimin neden olduğu mevcut tür kaybı oranının, bazıları tarafından altıncı bir kitlesel yok oluşa yol açtığı iddia edilmektedir. Bu değerlendirmeye katılıyor musunuz? Bu konuyla ilgili olarak vanlan yargılar, kitlesel yok oluşların nasıl tanımlandığını, yok oluşun arka plan hızını tanımlamak için kullanılan verileri ve günümüzdeki yok oluş hızı hakkında toplanan verileri içeren pek çok şeye bağlıdır. Elimizde yolcu güvercin, dodo, Güney Afrika zebrası ve Tazmanya kaplanı da dâhil olmak üzere insanların neden olduğu yok oluşların kayıtları olsa da, bunlar bir anlamda anekdot kayıplandır. Son yıllarda hangi türlerin neslinin tükendiğine dair sistematik bir kaydımız yok ve bunların çoğu kaydedilmemiş olabilir. Astrobiyolojik bir bakış açısından, mevcut yok oluş oranını ölçmek, bir biyosferin bileşimini anlamak ve ölçmek için yöntemler ve ölçüler geliştirmede önemli bir alıştırmadır. Altıncı bir yok oluşun kanıtlarını tartışabilirsiniz.

Barnosky, A.D., Matzke, N., Tomiya, S. et al. (2011) Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, 51–57.

Kolbert, E. (2014) *The Sixth Extinction: An Unnatural History.* Henry Holt and Co., New York.

15.11 Sonuç

Gezegenin tarihi boyunca, yaşam kitlesel yok oluşlara maruz kalmıştır. Mikroorganizmaların yetersiz biçimde korunması ve mikrobiyal fosilleri tür düzeyinde tanımlamanın zorluğu nedeniyle Prekambriyen'deki yok oluş hakkında çok az şey biliyoruz. Fanerozoik'teki çok hücreli organizmaların beş büyük yok oluşu hakkında çok daha ayrıntılı bilgilere sahibiz. Bu yok oluşların çeşitli nedenleri vardır. Volkanizma, asteroit etkisi, biyolojik kaynaklı değişiklikler, süpernova patlamaları gibi astrofiziksel değişiklikler ve anoksi dâhil olmak üzere okyanus koşullarındaki değişikliklerin tümü bu olayların tetikleyicileri olarak

öne sürülmüştür. Yok oluş dönemleri, organizmalar için yeni alanlar açılmasına neden oldu, ancak gezegende daha fazla tür çeşitliliğine yönelik uzun vadeli eğilimi önemli ölçüde değiştirmedi. Tür kaybı açısından bu yok oluşların en büyüğü Permiyen sonu yok oluşuydu. Kretase sonu yok oluşu daha az yıkıcıydı, ancak dinozorların neslinin tükenmesindeki rolü ve bir asteroit çarpmasının rolüne ilişkin güçlü kanıtlar, onu yapılan çalışmalarda odak noktası haline getirdi. Tüm bu yok oluşlar, bir gezegende yaşam ortaya çıktığında, kaçınılmaz bir bozulmayla karşı karşıya kalacağını vurguluyor. Gezegensel koşullar onu rahatsız etmezse bile, asteroit ve kuyruklu yıldız çarpmaları da dâhil olmak üzere Dünya dışı olaylar neredeyse kesinlikle olacaktır. Diğer gezegenimsilerde yaşam varsa, onun da yok oluşa maruz kalacağını öne sürmek tutarlı bir tahmin gibi görünüyor.

İleri Okumalar

Kitaplar

Benton, M.J. (2008) *When Life Nearly Died: The Greatest Mass Extinction of All Time.* Thames and Hudson, London.

Kolbert, E. (2014) *The Sixth Extinction: An Unnatural History.* Henry Holt and Company, New York.

Yayınlar

Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V. (1980) Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* 208, 1095–1108.

Huey, R.B., Ward, P.D. (2005) Hypoxia, global warming, and terrestrial late Permian extinctions. *Science* 308, 398–401.

Jablonski, D. (2005) Mass extinctions and macroevolution. *Paleobiology* 31, 192–210.

Kring, D.A. (2003) Environmental consequences of impact cratering events as a function of ambient conditions on Earth. *Astrobiology* 3, 133–152.

Payne, J.L., Clapham, M.E. (2012) End-Permian mass extinction in the oceans: an ancient analog for the twenty-first century? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 40, 89–111.

Pimm, S.L., Jenkins, C.N., Abell, R., Brooks, T.M., Gittleman, J.L., Joppa, L.N., Raven, P.H., Roberts, C.M., Sexton, J.O. (2014) The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science* 344, 1246752.

Roberston, D.S., McKenna, M.C., Toon, O.B., Hope, S., Lillegraven, J.A. (2004) Survival in the first hours of the Cenozoic. *GSA Bulletin* 116, 760–768.

Ryskin, G. (2003) Methane-driven oceanic eruptions and mass extinctions. *Geology* 31, 741–744.

Scalo, J., Wheeler, J.C. (2002) Astrophysical and astrobiological implications of gamma-ray burst properties. *Astrophysical Journal* 566, 723–737.

Stigall, A.L. (2012) Speciation collapse and invasive species dynamics during the late Devonian Mass Extinction. *GSA Today* 22, 4–9.

Wang, S., Marshall, C. (2004) Improved confidence intervals for estimating the position of a mass extinction boundary. *Paleobiology* 30, 5–18.

16

GEZEGENLERİN YAŞANABİLİRLİĞİ

Öğrenme Çıktıları

- Yaşanabilirlik kavramını anlamak.
- Klasik yaşanabilir bölgeyi tanımlayan şeyleri ve sınırlarını anlamak.
- Galaktik yaşanabilir bölge kavramını anlamak.
- Ayın varlığı, karbonat-silikat döngüsü ve levha tektoniği dâhil olmak üzere bir gezegenin uzun vadeli yaşanabilirliğini etkileyebilecek bazı faktörleri tanımlamak.
- Bir gezegenin etkin sıcaklığını hesaplayabilmek.
- Sera etkisinin nasıl çalıştığını ve yaşanabilirlik üzerindeki sonuçlarını anlamak.
- Yaşanabilir koşulların varlığının yaşamın varlığı anlamına gelmediğini anlamak.

16.1 Yaşanabilirlik Nedir?

Astrobiyoloji metinleri ve makaleleri boyunca 'yaşanabilir' terimiyle karşılaşacaksınız. Bilim insanları yaşanabilir dünyalardan, yaşanabilir ortamlardan ve yaşanabilir bölgelerden bahseder. Yaşanabilir derken ne demek istiyoruz?

Bu kelimeyi tam anlamıyla tanımlamak kolay değil. Habitat kelimesi Latince *habitare* (yaşamak) fiilinden gelir ve 'o yaşar' olarak tercüme edilir. 'Yaşam'ı tanımlamanın zorluklarını (Bölüm 1) akılda tutarak, yaşanabilir bir çevreyi, 'bilinen en az bir organizmanın aktif olması için gerekli koşullara sahip bir yer' olarak tanımlayabiliriz. Aktif, aktivitenin habitat tarafından sürdürülen bir organizmanın bakımını, büyümesini veya üremesini içerebileceği metabolik olarak aktif anlamına gelebilir. Bazı araştırmacılar habitatı bir organizmanın en azından hayatta kalabileceği bir yer olarak tanımladı. Nihayetinde tüm organizmalar, çoğalabilecekleri veya popülasyonlarını devam ettirebildikleri en az bir habitata ihtiyaç duyar.

Yaşanabilirliği anlamanın önemli yönlerinden biri, niş kavramıdır. Ekolojist Eugene Odum (1913–2002) bir habitatın bir organizmanın 'adresi' (yani

fiziksel konumu) olarak kabul edilebileceği, oysa bir nişin onun 'uzmanlık alanını' tanımladığı ayrımını yaptı. Ekolojist George Hutchinson (1903–1991) nişi, bir organizmanın içinde yaşayabileceği koşulları tanımlayan n sayıda farklı değişkenden (çevresel ve biyolojik) oluşan soyut n-boyutlu hiper hacim olarak değerlendirdi. Örneğin, demir indirgemesi gerçekleştiren bir mikrobun nişi, bu organizmanın oksijensiz bir ortamda bu işlevi yerine getirmesi için gerekli olan çevresel ve biyotik faktörlerin çeşitliliği olacaktır. Katı bir ekolojik bakış açısından, bir niş bu nedenle fiziksel bir alan değil, işlevsel bir tanımdır. Bununla birlikte, gezegen bilimi literatüründe, niş teriminin yanlış bir şekilde habitatla birbirinin yerine kullanıldığını ve tamamen fiziksel bir alan olarak kastedildiği yaygın olarak görülür.

Ekolojik literatürde bu farklı terimlerin ne anlama gelmesi gerektiği konusunda birçok tarihsel söylem ve çok sayıda tartışma vardır. Genel olarak, bilinen en az bir organizmanın metabolik aktivitesini destekleme kapasitesi olarak anlaşılan ve bu şekilde tanımlanan yaşanabilirlik, bölümün geri kalanında bir yeri yaşanabilir kılmak için gerekli koşulları tartışmak için yeterli bir yer sağlar.

'Yaşanabilir' ve 'yaşanabilirlik' terimleri, zorunlu olarak, Dünya üzerindeki yaşama dair sahip olduğumuz bilgiyle tanımlanan ve sınırlandırılan değerlendirmelerdir. Ayrıca, evrendeki yaşamın sınırlarına ilişkin bilgimizin eksik olduğunu varsayarsak, muhtemelen yaşanmaz yerlerin boyutunu olduğundan fazla, yaşanabilir alanların boyutunu ise olduğundan küçük görebiliriz. Bölüm 3'te gördüğümüz gibi, insanlar, yaşamın var olabileceği varsayılan ortam türlerini ve dolayısıyla yaşanabilirlik için gerekli koşulları önemli ölçüde değiştirecek olan, sıvı amonyak kullanan bir yaşam gibi başka biyokimyasal düzenler hayal ettiler. Bununla birlikte, bu olasılıkları deneysel olarak kolayca değerlendiremediğimiz gibi bu alternatif kimyalarda yaşanabilirlik için hangi kriterlerin karşılanması gerektiğini de anlayamadığımız için, genellikle 'karbon-su bağlılığı' olarak adlandırılan şeyi –yaşanabilirliğe karşılık gelen sonuçlarıyla birlikte, yaşamın karbon temelli olduğunu ve sıvı suya ihtiyaç duyduğunu– varsayıyoruz. Yaşam için alternatif kimyalar yoksa, bunun bir bağlılık olmadığını ve karasal yaşamın evrensel bir normu yansıttığını bile görebiliriz.

Yaşanabilirlik, yaklaşık bir mikron büyüklüğünde bir mikroorganizmanın ölçeğinden on binlerce ışık yılı çapında bir galaksinin ölçeğine kadar farklı ölçeklerde değerlendirilebilir.

Bu kitap boyunca yaptığımız gibi, bir mikroorganizma ölçeğinde makul derecede mantıklı, işlevsel bir yaşanabilirlik tanımı bulmak çok zor değil. Bir ortamın herhangi bir zamanda belirli bir organizma adına yaşanabilir olması için bir dizi gereksinimi listelemek mümkündür (buna 'anlık' yaşanabilirlik diyebiliriz). Asgari olarak, temel elementlerle (CHNOPS; Bölüm 3), bir enerji kaynağıyla (Bölüm 5) ve büyümeye olanak sağlayan uygun fiziksel ve kimyasal koşullarla (Bölüm 7) birlikte bir çözücü olarak sıvı suya ihtiyacımız var. Belirli

organizmalar, enzimlerde kofaktörler olarak kullanılabilen demir veya metaller gibi başka gereksinimlere de ihtiyaç duyabilir.

Bir çevrenin veya gezegenin jeolojik zaman dilimlerinde yaşanabilir olması ('sürekli' gezegensel yaşanabilirlik diyebiliriz) için neyin gerekli olduğunu tanımlama görevi, daha önce tartışılan yaşamın gereksinimlerinin uzun zaman dilimlerinde sürdürülmesine izin veren koşulları tanımlamamızı gerektirdiğinden daha zorlu bir iş haline gelir.

16.2 Yaşanabilir Bölge

Gezegen ölçeğinde yaşanabilirliği değerlendirmek için belki de en yaygın ölçümlerden biri yaşanabilir bölge olmuştur. Yaşanabilir bölge, bir gezegenimsinin yüzeyinde sıvı suyun kararlı olduğu bir yıldızın etrafındaki bölge olarak tanımlanır. Yaşanabilir bölge ifadesi, 1959'da astrofizikçi Su-Shu Huang (1915–1977) tarafından icat edildi. Yaşanabilir bölgeler teorisi 1964'te Stephen Dole (1917–2000) tarafından *Habitable Planets for Man* adlı kitabında, yaşanabilir bölge fikrini ve gezegenlerin yaşanabilirliğinin diğer çeşitli belirleyicilerini detaylandırarak daha da geliştirildi. Ve gökadamızdaki yaşanabilir gezegenlerin sayısını yaklaşık 600 milyon olarak tahmin etmesine yol açtı.

Bir çırpıda bu tanımın bazı sınırlamalarını görebiliriz. Yaşamın sıvı sudan çok daha fazlasına ihtiyacı var. Bir gezegen sıvı suya sahip olabilir, ancak biyolojik olarak yeterli miktarda nitrojen gibi bazı hayati unsurlardan yoksun olabilir. Bu nedenle, yaşanabilir bölgedeki tüm gezegenlerin, hatta sıvı su barındıranların bile, kesinlikle yaşanabilir olduğu söylenemez.

Yaşanabilir bölge de sınırlıdır, çünkü gezegenimsilerin yüzeydeki sıvı suya ihtiyacı yoktur, ancak yine de yaşanabilir olabilecek yüzey altı sıvı suyu barındırabilirler. Örneğin, dış Güneş sisteminin buzul uyduları Europa ve Enceladus, Bölüm 18'de inceleyeceğimiz gibi, bu duruma bir örnektir. Bu nedenle, yaşanabilir bölgedeki tüm gezegenlerin yaşanabilir olması gerekmediği gibi, yaşanabilir tüm gezegenimsilerin de klasik yaşanabilir bölgeler içinde olmaya ihtiyaçları yoktur.

Bununla birlikte, yaşanabilir bölge kavramı faydalıdır çünkü en azından ilgilendiğimiz evrendeki arama uzayını sadece 'her yerde' olmaktan daha dar bir bölgeyle sınırlamamıza izin verir.

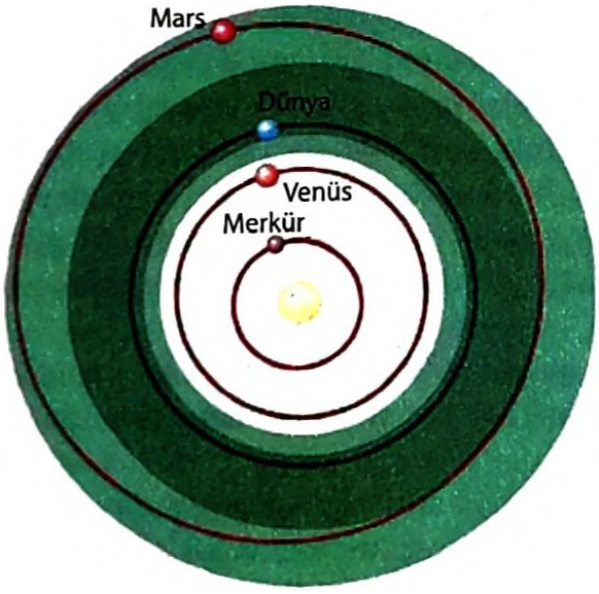
Yaşanabilir bölge, bir iç ve dış sınırla tanımlanır (Şekil 16.1). İç sınır, Güneş parlaklığının, şu anda Venüs'te görülene benzer şekilde, kaçak bir sera etkisi oluşturduğu yıldızdan olan uzaklık tarafından belirlenir. Bu mesafede, su rezervuarı kaynar, hidrojen ve oksijene foto-ayrışır, ilki uzayda kaybolur, ikincisi oksitlenmiş bileşikler oluşturmak için kayalarla yeniden birleşir. Kendi Güneş Sistemimizde, kaçak sera etkisi tarafından tanımlanan iç sınır, yaklaşık 0,85 AB'dur (Şekil 16.1'deki açık yeşil bölge). Bununla birlikte, bulut oluşumunun, suyun foto-ayrıştığı üst atmosferde birikmesine neden olması ve aşırı derecede

kontrolden çıkmış bir sera devreye girmeden çok önce daha az aşırı 'nemli' bir sera etkisine yol açması mümkündür, ancak yine de nihayetinde suyun, yaşam için ölümcül sonuçlarıyla kaybolmasıyla buharlaşmasına neden olan bir süreçtir. Bu mesafe şaşırtıcı derecede yakın 0,97 AB'dur (Şekil 16.1'deki koyu yeşil bölge), mevcut konumumuza oldukça yakındır. Bu nedenle, yaşanabilir bölgenin tam konumu, kullanılan varsayımlara bağlıdır.

Yaşanabilir bölgenin dış sınırı, sera etkisinin gezegenin yüzeyinde sıvı suyu sürdürmek için sıcaklıklar üretmede yetersiz olduğu veya atmosferdeki CO_2'nin yoğunlaşmaya başladığı ve yine sera ısınmasını önlediği mesafeye göre belirlenir. Bu durumların her ikisi de Güneş Sistemimizdeki yaşanabilir bölgenin dış sınırını sırasıyla 1,7 AB (Şekil 16.1'deki açık yeşil bölge) ve 1,4 AB (Şekil 16.1'deki koyu yeşil bölge) oluşturur. Bu sayılar, Mars hakkında gözlemlediklerimizle tutarlıdır. Bir zamanlar uzun süreli sıvı yüzey suyuna ev sahipliği yapmış olsa da (Bölüm 17), bugün gezegen bir çöldür ve gezegeni sıcak tutmak ve yeraltı suları hesaba katılmamasına rağmen sıvı yüzey suyunun varlığını sürdürmek için yetersiz bir sera etkisine veya atmosfer basıncına sahiptir. Mars, yaşanabilirliğin sınırındadır.

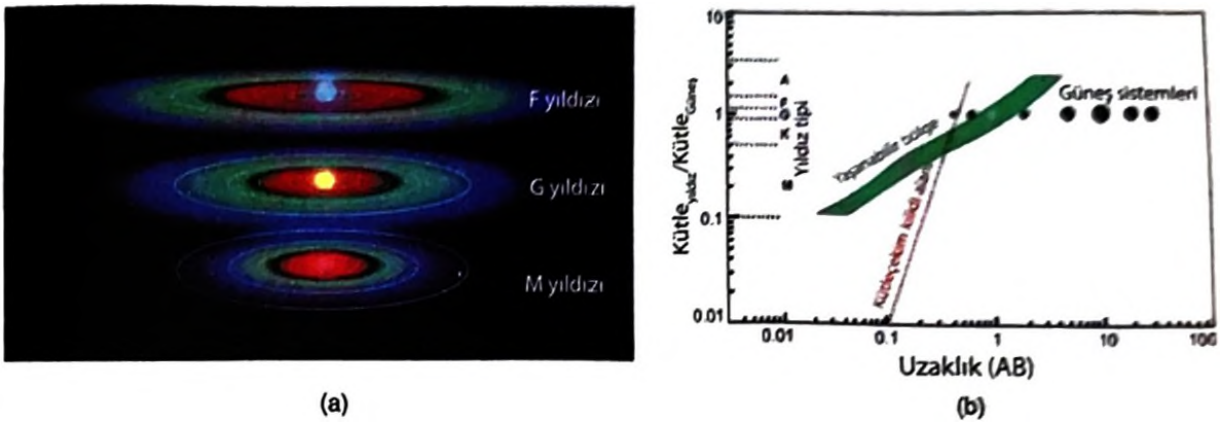
Çok sıcak bir iç sınır ile çok soğuk bir dış sınır arasında yer alması şaşırtıcı değildir, yaşanabilir bölge bazen Goldilocks bölgesi olarak adlandırılır.

Kendi Güneş Sistemimizde Merkür, yaşanabilir bölgenin iç sınırlarının oldukça dışında yer alır ve yaşamı destekleyemeyecek kadar sıcaktır. Gezegenin atmosferi zaten o kadar incedir ki (10-14 bar veya 1 nPa) sıvı su olması ihtimali yoktur. Venüs, yaşanabilir bölgenin iç kenarının hemen dışında yer alır. Kontrolden çıkan sera etkisi 467 °C'lik bir yüzey sıcaklığı oluşturur ve sıvı su yoktur. Bu nedenle gezegen yüzeyinin tamamen yaşanmaz olduğu düşünülmektedir. Venüs bulut güvertesinde yaşam olasılığı hakkında bazı ilginç duyumlar oldu. ~50 km yükseklikte, sıcaklık yaklaşık 40 °C'dir ve basınç, yaklaşık 1 atm (0,1 MPa)'dir, bu da biyolojik açıdan ılımandır. Bununla birlikte, bulutlar %80'den fazla konsantrasyonda H_2SO_4 içerir ve bu nedenle yaşam için gerekli olan karmaşık organik kimya için olası yerler değildir.



Şekil 16.1 Güneş Sistemimizdeki yaşanabilir bölge. Koyu yeşil bölge oldukça tutucu tahminler, açık yeşil bölge daha az tutucu tahminler kullanarak sıvı suyun bir gezegen yüzeyinde kararlı olacağı bölgeyi gösterir. Bu sınırlar metinde açıklanmıştır (Kaynak: Charles Cockell).

Yaşanabilir bölgenin mesafesi ve genişliği, bir gezegenin etrafın-



Şekil 16.2 Farklı yıldızların etrafında yaşanabilir bölgeler. (a) Genel ilkeye göre, yıldız ne kadar sıcaksa (bir F yıldızı bir G yıldızından daha sıcaktır, bu da bir M yıldızından daha sıcaktır), yaşanabilir bölge o kadar uzaktadır. (b) Farklı yıldızlardan belirli mesafelerde yaşanabilir bölgeyi gösteren daha ayrıntılı bir çizim. Güneş Sistemimiz gösterilmektedir. Kasting vd., (1993) Icarus *101, 108-128'den yeniden çizilmiştir.*

da döndüğü yıldızın türünden etkilenecektir (Şekil 16.2). Güneşten daha sıcak olan yıldızlar (örneğin F yıldızları) daha uzakta yaşanabilir bölgelere sahip olacaktır. Güneşten daha soğuk olan yıldızlar, örneğin M yıldızları, Merkür'ün eşdeğer yörüngesi (0,4 AB) içinde olacak kadar yakın yaşanabilir bölgelere sahip olacaktır. Örneğin, 4,24 ışık yılı uzaklıktaki bir M yıldızı olan Proxima Centauri yıldızı, Dünyaya benzer sıcaklıklara sahip olmak için bir gezegenin yaklaşık 0,032 AU uzaklıkta olmasını gerektirir.

16.2.1 Yıldız Türleri

Yıldız türlerinin, yaşanabilirlik üzerinde yalnızca yaşanabilir bölgenin mesafesini değiştirmenin ötesine geçen ikincil etkileri vardır.

M yıldızı yaşanabilir bölgelerinin özellikle belirli sorunları vardır. Yaşanabilir bölgenin, gezegenleri gelgitle kilitlendikleri bölgeye getirecek kadar yakın olması gibi bir komplikasyonları var (Şekil 16.2b) –gezegenin dönüşü, aynı yüz her zaman yıldıza bakacak şekilde yıldızla senkronizedir. Karanlık tarafta atmosfer donacağından dolayı bunun yaşam için önemli bir gösterici olduğu düşünülüyordu. Bununla birlikte, modeller, yeterince güçlü atmosferik sirkülasyonla, ısının yıldıza bakan taraftan karanlık tarafa taşınabileceğini ve atmosferin donmasını önlediğini göstermiştir. Düşük kütleli gezegenlerdeki dönme eksikliği, atmosferi yıldız rüzgârı (Güneşten gelen **güneş rüzgârıyla** aynı fenomen) veya **koronal kütle püskürmeleri** tarafından erozyona maruz bırakabilen zayıf manyetik alanlara katkıda bulunabilir.

M yıldızları, bu yıldızların yörüngesinde dönen gezegenlerin, arka planın bir ila üç katı büyüklüğünde aralıklı yüksek UV radyasyon dozlarına maruz kalabilecekleri şekilde, UV radyasyonunun parlamalarına eğilimlidir. Bununla birlikte, Bölüm 10'da tartıştığımız gibi, örneğin kayaların içinde korunan ya-

şamın, bu periyodik aşırı UV radyasyonu altında hayatta kalabileceği ve hatta büyüyebileceği yollar vardır.

M yıldızlarının bir avantajı da uzun ömürlü olmalarıdır. M yıldızlarının yaşamları trilyonlarca yılı aşabilir (Bölüm 8), bu da yörüngelerinde dönen gezegenlere yaşamın, hatta zekânın evrimi için bolca zaman tanır. Evrendeki tüm yıldızların %75'ini oluşturdukları için sayıları fazladır. M yıldızlarından biraz daha büyük olan K yıldızlarının da uzun ömürleri (yaklaşık 20 milyar yıl) vardır ve tüm yıldızların %15'lik kısmını oluştururlar, bu da düşük kütleli yıldızların tamamen istatistiksel olarak düşünüldüğünde yaşanabilir gezegenlere ev sahipliği yapmak için iyi adaylar olduğunu gösterir.

Güneşten daha büyük kütleli yıldızlar daha fazla UV radyasyonu üretir, ancak yine Bölüm 10'da tartıştığımız gibi, bu tür bir radyasyon, kayalar gibi çeşitli doğal substratlar tarafından taranabilir. Daha sorunlu özellikleri, nispeten kısa ömürleridir. O'dan F'ye kadar olan yıldız türleri, iki milyar yıl veya daha az değerlerle ölçülen ömürlere sahiptir. Dünyanın oluşumundan çok hücreli yaşamın evrimine geçmesinin yaklaşık dört milyar yıl ve zekânın ortaya çıkmasının yaklaşık 600 milyon yıl sürdüğü düşünülürse, bu yıldızlar yaşama ev sahipliği yapsa bile, evrimlerinin, gezegensel koşullar Dünyaya kıyasla hızlandırılmış evrimsel geçişlere izin vermedikçe kesilmesi mümkündür.

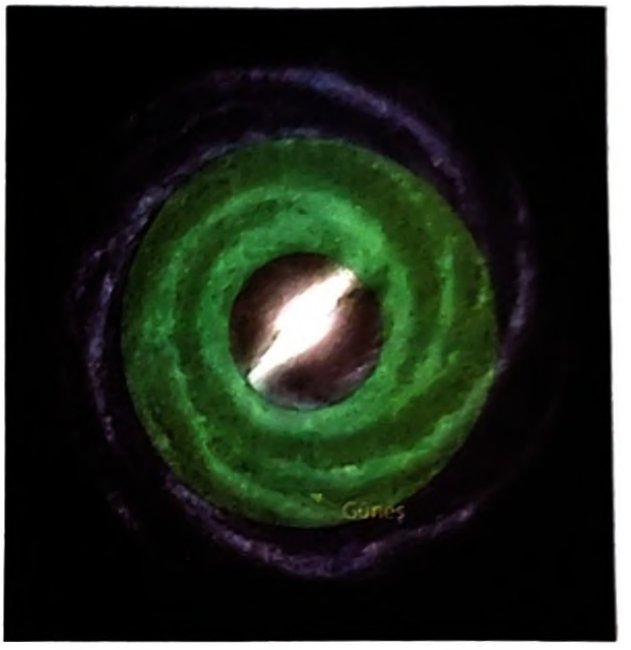
16.2.2 Sürekli Yaşanabilir Bölge

Bir yıldızın etrafındaki yaşanabilir bölge, sürekli yaşanabilir bölge konseptinde artırılır. Bu, bir gezegenin yaşamı boyunca sıvı suyu sürdürebileceği bir yıldızın etrafındaki bölgedir. Bir yıldızın parlaklığı yaşlanmayla beraber arttıkça, yaşanabilir bölgenin kenarları dışa doğru hareket edecektir. Bu nedenle, sürekli yaşanabilir bölge, yaşanabilir bölgeden daha dar bir genişlikte olacaktır ve kesin boyutları yıldıza bağlı olacaktır. Bu sürekli yaşanabilir bölge, gezegen yüzeyindeki sıvı suyun, yaşamın milyarlarca yıllık evrim geçirmesine yetecek kadar uzun olacağı bölgeyi tanımladığı için önemli bir kavramdır.

16.2.3 Galaktik Yaşanabilir Bölge

Yaşanabilir bölge fikri, galaktik yaşanabilir bölge konseptinde potansiyel olarak galaktik bir ölçekte uygulanabilir. Bir galaksinin merkezine çok yakın olan yıldızların yoğun yıldız kümeleri bölgeleri içinde olması muhtemeldir ve yakın süpernova patlamalarına, yoğun kütleçekimsel bozulmalara ve jeolojik zaman çizelgeleri üzerinde herhangi bir olası biyosfer üzerinde potansiyel olarak yıkıcı etkileri olan diğer astrofiziksel şiddete maruz kalabilirler. Kendi galaktik merkezimizde, her biri ortalama olarak başka bir yıldızdan sadece yaklaşık 1000 AB uzaklıkta olan, üç ışık yılı boyunca bir hacimde paketlenmiş 20 milyon yıldız var. Çarpışmalar yaklaşık her milyon yılda bir meydana gelir ve merkezden X-ışınları ve gama ışınları akar. Daha da uç nokta, yaşam taşıyan

gezegenlerin ve yıldızlarının var olamayacağı bir bölge olan merkezdeki süper kütleli kara deliktir. Bir galakside uzaktaki yıldızlar, daha düşük metalikliğe sahip olma eğilimindedir (daha az ağır elemente sahiptirler) ve bu nedenle, yaşam inşa etmek için yararlı olan çok çeşitli elementleri barındırmaya pek elverişli olmayabilirler (Şekil 16.3). Bu iki uç arasındaki bölge (galaktik merkezden yaklaşık 15.000 ila 38.000 ışık yılı arası), yeterli miktarda elemente sahip yıldızları barındırmak için ideal olabilir, ancak aynı zamanda uzun kesintisiz zaman dilimlerinde biyosferlerin ortaya çıkmasına izin verecek kadar sessiz mahallelerde de olabilir.



Şekil 16.3 Samanyolu'nun bir şemasında yeşil renkle gösterilen galaktik yaşanabilir bölge. Güneşin bölgeye göre konumu gösterilmiştir (Kaynak: NASA).

Buna bir örnek, kendi Güneş Sistemimizdir. Güneş Sistemi, Samanyolu'nun Orion Kolunun, spiral şekilli bir toz ve gaz konsantrasyonunun iç kenarındadır. Galaksimiz yaklaşık 100.000 ışık yılı genişliğinde ve Güneş, merkezden yaklaşık 26.000 ışık yılı uzaklıktadır (Bölüm 8). Bu bölgenin çeşitli özellikleri onu yaşam için uygun kılmaktadır. Yıldız yoğunluklarının yüksek radyasyona ve kütleçekim bozukluğuna neden olabileceği küresel bir kümede değildir. Aktif bir gama ışını kaynağına yakın değildir ve yıldız yoğunluklarının yüksek iyonlaştırıcı radyasyon veya süpernova gibi astrofiziksel olarak yıkıcı olayların olasılığını arttırdığı galaktik merkeze yakın değildir.

16.2.4 Doğru Gökada?

Galaktik tipimiz bile önemli olabilir. Küresele yakın elipsoidal yıldız toplulukları olan eliptik gökadalar, çok az toz ve gaza sahiptir, bu da yıldız oluşumunun genellikle uzun zamandan beri durduğunu düşündürür. Başak Üstkümesindeki gökadaların yaklaşık %15'ini oluştururlar. Üzerinde antik ekosistemleri olan gezegenlerin yeri olabilseler de, bu galaksiler aynı zamanda kendi Güneşimizden (bir Popülasyon I yıldızı) çok daha yaşlı olan antik Nüfus II yıldızlarından oluşma eğilimindedir. Düşük metalikliğe sahip olma eğilimindedirler. Düzensiz gökadalar, tersine, sarmal gökadalardan (gözlemlenebilir gökadaların yaklaşık %60'ını oluşturan) çok daha fazla gaz ve toza sahiptir ve bu onları yıldız oluşumu için iyi yerler yapsa da, daha yüksek bir olasılıkla yaşamı yok eden

astrofiziksel şiddetin olduğu yerler olabilir. Yıldız patlaması gökadaları ve Aktif Galaktik Çekirdekler (AGN), potansiyel olarak yaşamı tehdit eden aktivite ve radyasyona maruz kalma düzeylerinin yüksek olduğu yerler olabilir. Büyük ölçekli galaktik yapının yaşam beklentilerini nasıl etkilediği hakkında çok az şey biliyoruz.

16.3 Suya ve Yaşama Uygun Bir Gezegende Sıcaklık Koşullarının Korunması

Bir ortamın herhangi bir organizmanın metabolik aktivitesini, büyümesini ve/veya üremesini destekleyebilmesi için herhangi bir zaman noktasındaki ana gereksinimleri belirleyebiliriz. Ancak, bir gezegenin giga yıllık zaman ölçeklerinde yaşamı destekleyebilmesi için, bu gereksinimlerin sürekli olarak karşılanması mümkün olmalıdır. Sıcaklık, gördüğümüz gibi, klasik yaşanabilir bölgeyi tanımlayan sıvı suyun bulunabileceği bir aralıkta tutulmalıdır. Bir gezegen yüzeyindeki sıcaklıklar, sıvı su için uygun değerlerde nasıl korunur?

16.3.1 Etkin Sıcaklık ve Sera Etkisi

Gezegensel bir ortamın sıcaklığı, suyun ve yaşamın varlığı için kritik öneme sahiptir. Şu anda, yaşamın yeniden üretilebilmesi için yaklaşık −15 ila 122 °C (Bölüm 7) sınırları içinde var olması gerektiğini düşünüyoruz. Bu aralığın sıvı su aralığından daha küçük olduğunu unutmayın. Tuzlar, sıvı suyu −20 °C'nin çok altındaki sıcaklıklara kadar düşürebilir ve yüksek basınç altında derin yüzey altı ortamları, sıvı suyu 122 °C'nin oldukça üzerinde barındırabilir. Ancak verilen aralık, laboratuvarda gösterilen üreme içindir. Ölçülü olabilir ve daha fazla araştırma bu aralığı genişletebilir, ancak diğer dünyaların yaşanabilirliğini incelemek için bir temel sağlar. Yaşam için yaşanabilirliğini değerlendirmek için bir gezegenin yüzey sıcaklığını nasıl hesaplarız?

16.3.1.1 Bir Gezegenin Etkin Sıcaklığının Hesaplanması

Bir gezegenimsi, ev sahibi yıldızından radyasyonu emer ve kara cisim radyasyon kaynağı olduğu için enerjiyi iletir, bu da ona hesaplayabileceğimiz genel bir etkin sıcaklık verir. Birçok kayalık gezegenimsi için bu etkin sıcaklık oldukça basit bir hesaplamadır çünkü enerjinin emilmesini ve yeniden yayılmasını zorlaştıracak bir atmosfer yoktur.

Dünyaya benzer bir gezegenimsi tarafından emilen enerji, gezegenin (yıldıza olan uzaklığının yarıçap, r ve mesafe, a'la gösterilir) yıldız tarafından yayılan enerjinin bir kısmını emdiği varsayılarak hesaplanabilir.

İlk olarak, bir yıldızın birim zamanda yaydığı enerji veya parlaklığı olan L'nin Stefan–Boltzmann yasasından geldiğini biliyoruz (bu, Bölüm 8'de anlatıldı):

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \tag{16.1}$$

Bu denklemde R yarıçap, T sıcaklık ve σ Stefan–Boltzmann sabitidir.

Bu enerji, gezegene $4\pi a^2$ uzaklıkta bir alan tarafından verilen bir küre içinde uzaya yayılır.

Bu nedenle, gezegende birim alan başına alınan güç, S, şu şekilde hesaplanabilir:

$$S = (4\pi R^2/4\pi a^2)\sigma T^4 \quad (16.2)$$

$$= (R/a)^2\sigma T^4 \quad (16.3)$$

Dünya örneğinde, S güneş sabiti olarak bilinir ve standart değeri genellikle 1367 W m^{-2} olarak alınır.

Gezegen, πr^2 kesitli bir disktir, burada r gezegenin yarıçapıdır, dolayısıyla gezegenin yakaladığı enerji ($P_{iç}$) bu alanın S'le çarpılmış halidir:

$$P_{iç} = S\pi r^2(1-A) \quad (16.4)$$

Ayrıca, başka bir terimden $(1-A)$ gizlice bahsettiğimizi fark edeceksiniz. Bu, gerçekte emilen enerjinin oranıdır ve radyasyonun bir kısmının gezegenin yüzeyi veya bulutları tarafından emilmeden uzaya geri yansıtılacağını hesaba katar; burada albedo, A, yansıtılan kısımdır. Dünya için albedo değeri yaklaşık 0,37'dir, ancak bulut örtüsüne, atmosferdeki toz varlığına ve yüzey örtüsüne bağlı olarak değişir (buz, koyu volkanik kayaçlardan daha yüksek bir albedo değerine sahiptir). Hissedilebilir bir atmosferi olmayan Ay ve Merkür'ün albedo değerleri sırasıyla 0,113 ve 0,138'dir.

Peki, gezegenden çıkan kara cisim enerjisi ne olacak? Yayılan toplam kara cisim enerjisi (bu, albedo terimindeki yalnızca yüzey tarafından yansıtılan enerjiyi içermez) yine Stefan–Boltzmann yasasıyla hesaplanır. Toplam enerji (bir yıldızın parlaklık ölçümüne benzer şekilde), gezegenin yüzey alanıyla çarpılan birim alan başına enerjidir:

$$P_{dış} = 4\pi r^2\sigma T_e^4 \quad (16.5)$$

bu durumda T_e, gezegenin kara cisim sıcaklığıdır.

Gelen ve giden enerjinin gezegenin etkin sıcaklığından sonra dengede olduğunu varsayarsak, T_e şu denklemle hesaplanır:

$$T_e = (S(1-A)4\sigma)^{1/4} \quad (16.6)$$

burada S güneş sabiti, A albedo ve σ Stefan–Boltzmann sabitidir.

16.3.1.2 Sera Etkisi

Bu son denklem bize gezegenin etkin sıcaklığını verir. Ancak bir karışıklık var. Gezegenin yüzeyine gelen radyasyon, gezegenden çok daha sıcak bir kara cisim olan yıldızdan gelir. Bölüm 8'de gördüğümüz gibi, bir kara cismin tepe dalga boyunu, bu tepe dalga boyunun (λ_{max}) şu şekilde hesaplandığını belirten Wien yasasından hesaplayabiliriz:

$$\lambda_{max} = 2{,}898 \times 10^{-3}/T\ (K).$$

Gezegen yıldızdan daha soğuk bir kara cisim olduğundan, gezegen tarafından yeniden yayılan radyasyon, emilen radyasyondan daha uzun dalga boylarında olacaktır (pik dalga boyu optikten kızıl-altına kaydırılır; Bölüm 8'deki Şekil 8.11'i gözden geçirin). Bir atmosferin yokluğunda, bu gerçek, akademik ilgiyi üzerine çeken konulardan biri olacaktır. Bununla birlikte, H_2O, CO_2, CH_4 ve NH_3 gibi gazlar, kısa dalga boylarında şeffaf ve daha uzun dalga boylarında opak olma eğilimindedir; bu, bir gezegenin yüzeyine kısa dalga boylu radyasyona izin verdikleri, ancak daha uzun dalga boylarının kaçmasını engelleme eğiliminde oldukları anlamına gelir. Sonuç olarak, enerji hapsolur ve **sera etkisinde** gezegenin yüzeyini ısıtır (dolayısıyla bunlara **sera gazları** denir). Soğurma bantları, diğer gazların etkisiyle gazları tutmada daha etkili hale getirilebilir. Örneğin, CO_2'nin soğurma bantları, N_2 ve O_2'nin varlığıyla genişler ve sera etkisini arttırır.

Bugün Dünyada H_2O ve CO_2, CH_4, N_2O ve O_3'ün daha küçük katkılarıyla birlikte, sera etkisinin neredeyse tamamını oluşturan en önemli iki sera gazıdır. CH_4, günümüz atmosferindeki konsantrasyonu düşük olmasına rağmen, kızıl-altı radyasyonu (7,5–12,0 μm dalga boyu) daha güçlü soğurmasından dolayı CO_2'den sera gazı olarak yaklaşık 20 kat daha etkilidir. Toplamda, sera etkisi Dünya için yaklaşık 30 K'dir, ancak bu, ortalama sıcaklığımızın donma noktasının üzerinde kalması anlamına geldiğinden tüm farkı yaratır.

Ay veya Merkür gibi atmosferi olmayan cisimlerin sera etkisi yoktur. Diğer bazı gezegenler, sıcaklıkların çok yüksek olduğu ve sıvı suyun gezegen yüzeyinde kalamayacağı Dünyadan çok daha aşırı sera koşullarına sahiptir. Bu **kaçak sera etkisinin** bir örneği, %96,5 CO_2'lik 92 barlık yoğun bir atmosfere sahip olan Venüs'te bulunabilir. 257 K'lık bir atmosfer olmadan sahip olacağı etkin sıcaklıktan, yaşam için bilinen üst sıcaklık sınırının 300 K'dan fazla üzerinde, yaklaşık 740 K'lık bir sera kaynaklı sıcaklığa kadar yaklaşık 510 K'lık bir sera etkisine sahiptir. Venüs'te yaşam yoktur. Sera etkisi önemlidir.

Durumun erken Venüs'te çok farklı olma olasılığını göz ardı edemeyiz. Dünyanın Hadean döneminde, Güneş yaklaşık %30 daha az parlaktı. Bu süre zarfında, yaşanabilir bölgenin iç sınırı Güneşe daha yakın olacağından, Venüs erken okyanuslara ev sahipliği yapmış olabilir. Sera etkisinin, gezegenin oluşumundan belki birkaç yüz milyon yıl sonra, tam olarak ne zaman başlayacağını bilmiyoruz.

Bölüm 10'da öğrendiğimiz gibi, Güneşin gezegenin erken tarihinde bugünkünden daha az parlak olduğu zaman, Dünyanın okyanuslar ve sıvı su için yeterince sıcak kaldığı hakkında bir tartışma noktası olmaya devam ediyor. Bu süre zarfında mevcut olan sera mekanizmaları ve gazlar, **soluk genç Güneş paradoksunu** çözmeye çalışan astrobiyologların ilgisini çekmiştir.

Dünya üzerindeki sera etkisi bizim için modern bir endişe çünkü insanların atmosfere CO_2 salarak sıcaklığı yükselttiği düşünülüyor.

Bu tartışmadan ortaya çıkan bir soru, Dünyanın yüzeyinde milyarlarca yıl boyunca sıvı su bulundurmuş olması özelliğinin sadece bir şans meselesi olup

olmadığıdır –gelen radyasyon, sıvı suya izin vermek üzere giden radyasyonu güzel bir şekilde dengeler. Şimdi tartışacağımız gibi, gerçekte durumun öyle olmadığı ortaya çıkıyor.

Tartışma Noktası: Atmosferik yaşanabilirlik ve hava kökenli biyosferler

Şimdiye kadar gezegenlerin yüzeyinde ve alt yüzeyinde yaşanabilir ortamlar aradığımızı varsaydık. Bununla birlikte, yüzey sert olduğunda bile gezegenlerin atmosferleri aktif biyosferleri barındırabilir mi? Zorlu ama büyüleyici bir makalede, Sagan ve Saltpeter Jüpiter'in atmosferindeki ekolojiler hakkında spekülasyonlar iler isürdüler. 'Süzülenlerin' ve 'avcıların' var olduğunu öne sürdüler. 'Süzülenler,' gazlarını sıcak tutmak için Güneş ışığı ve atmosferdeki moleküller ile metabolize olan sıcak hava balonları gibi dev gaz torbalarıydı. 'Avcılar', kalamar benzeri yaratıklardı, kendilerini 'süzülenlere' itmek ve onları tüketmek için gaz jetleri kullanıyorlardı. Diğer bilim insanları, bugün bile, bazı bölgelerde sıcaklık ve basınçların yaşam için uygun olabileceği Venüs'ün bulut kısmında yaşam olasılığını tartışmaktadırlar. Bu fikirlerin makul olduğunu düşünüyor musunuz? Bir atmosferde yaşam kendini nasıl sürdürebilir? Bakteri boyutundaki parçacıkların, bazıları rüzgâr akımlarında bir atmosferden dışarı sürüklenirken, gezegensel bir atmosferde yaşayabilir bir popülasyonu sürdürmek için yeterince hızlı çoğaltıp üretemeyeceğini hayal edebilir veya hesaplayabilir misiniz? Dünya atmosferinde mikroorganizmalar olduğunu biliyoruz, ancak Dünyanın yüzeyi yaşanmaz hale gelirse atmosferik bir biyota sürdürülebilir mi?

DeLeon-Rodriguez, N., Lathem, T.L., Rodriguez, L.M., Barazesh, J.M., Anderson, B.E., Beyersdorf, A.J., Ziemba, L.D., Bergin, M., Nenes, A., Konstantinidisa, K.T. (2013) Microbiome of the upper troposphere: Species composition and prevalence, effects of tropical storms, and atmospheric implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **110**, 2575–2580.

Sagan, C., Saltpeter, E.E. (1976) Particles, environments and possible ecologies in the Jovian atmosphere. *Astrophysical Journal Supplement Series* **32**, 737–755.

Schulze-Makuch, D., Grinspoon, D.H., Abbas, O., Irwin, L.N., Bullock, M. (2004) A sulfur-based UV adaptation strategy for putative phototrophic life in the Venusian atmosphere. *Astrobiology* **4**, 11–18.

16.3.2 Karbonat–Silikat Döngüsü

Gezegensel sıcaklık üzerindeki önemli kontrol noktalarından biri, karbonat-silikat döngüsüdür (Şekil 16.4).

Atmosferdeki CO_2 yağmur suyuyla karışınca zayıf bir asit olan karbonik asit (H_2CO_3) oluşturur. Bu çözelti (genel olarak Şekil 16.4'te $CaSiO_3$ olarak gösterilen) silikat kayaları nazikçe aşındırır, böylece onları aşındırır ve Mg^{+2} ve Ca^{+2} gibi katyonların nehirlere ve akarsulara salınmasına neden olur.

Nehirler, göller ve okyanuslar gibi su kütlelerinde, bu katyonların bazıları okyanusun dibine çöken karbonatları (Şekil 16.4'e $CaCO_3$ olarak gösterilmiştir)

hem biyolojik hem de biyolojik olmayan süreçlerle oluşturmak için bikarbonat iyonlarına (HCO_3^-) bağlanır, diğer su kütleleri CO_2'yi atmosferden ayırır ve onu kayaç kayıtlarına gömer. CO_2'nin net kaybı kalıcı değildir. Yeryüzünde, levha tektoniği sonunda karbonatların yitimine neden olacak, onları metamorfizmada silikatlarla ısıtacak, CO_2'yi volkanik eksalasyonlar ve patlamalarla atmosfere geri salacak.

Bu döngü içinde bir geri bildirim süreci vardır (Şekil 16.4b). Atmosferdeki CO_2 yükselirse, sera etkisi sonucu sıcaklıklar yükselir. Daha yüksek sıcaklıklar kimyasal reaksiyonların hızını arttırır.

Sıcaklık ve kimyasal reaksiyon hızları arasındaki bağlantı, ilk olarak İsveçli fizikçi Svante Arrhenius (1859–1927) tarafından geliştirilen Arrhenius ilişkisiyle hesaplanmaktadır. Arrhenius ilişkisi, bir kimyasal reaksiyonun hız sabiti olan k ile mutlak sıcaklık T arasındaki ilişkiyi veren basit bir denklemdir. Bu ilişki şöyledir:

$$k = Ae^{-Ea/(RT)}$$

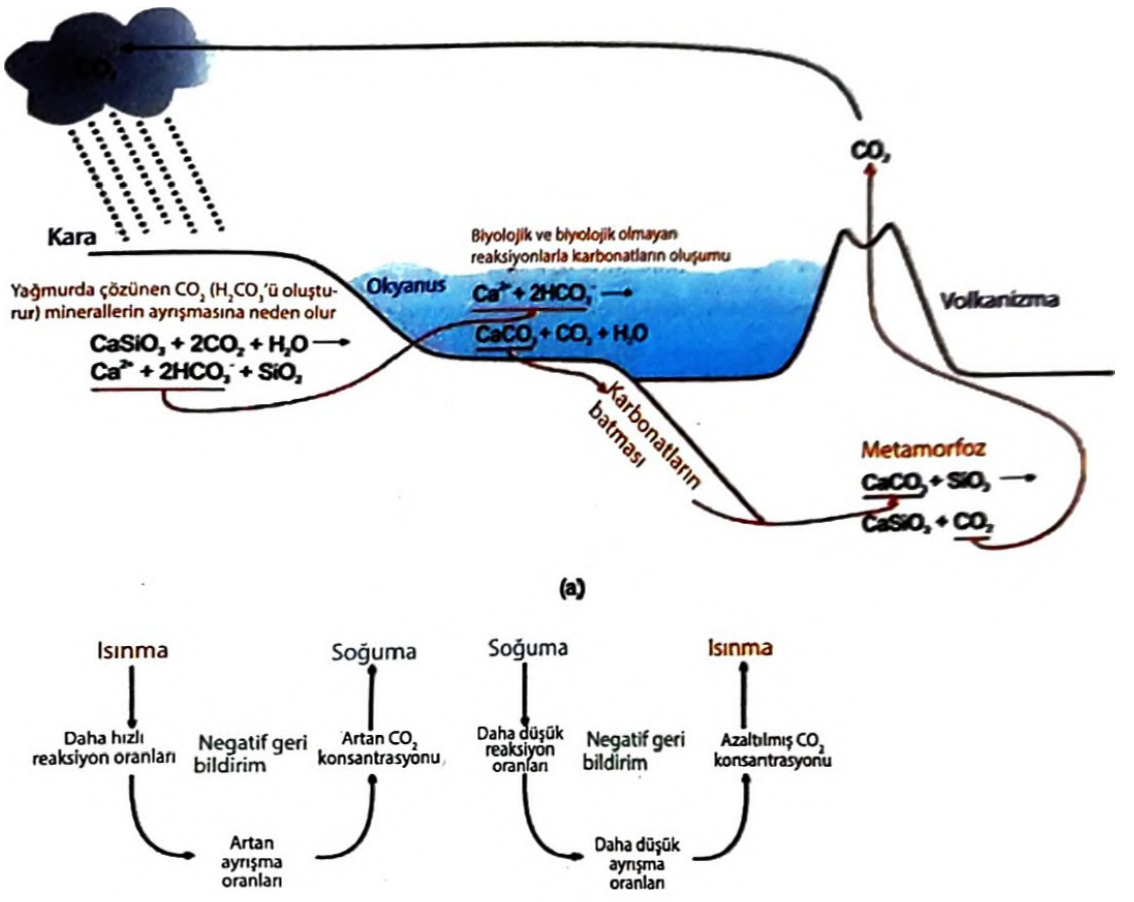
burada R, Evrensel Gaz Sabiti ve E_a, reaksiyonun aktivasyon enerjisidir. Genel olarak, sıcaklıktaki her 10°'lik artış için kimyasal reaksiyon hızları yaklaşık iki katına çıkar. Bu nedenle, sıcaklık arttıkça kayaç bozunma reaksiyonları artar.

Ayrışma reaksiyon hızları arttıkça, bu reaksiyonlarda daha fazla CO_2 tüketilir, bu da atmosferik konsantrasyonunu azaltır (volkanik üretiminin değişmediği varsayılırsa) ve böylece CO_2 sera ısınmasını azaltır ve küresel sıcaklığı düşürür. CO_2 konsantrasyonlarındaki bir artış ayrıca çözeltilerin asitliğini artıracak ve ayrışma oranlarını daha da artıracaktır.

Tersine, atmosferik CO_2 konsantrasyonunda veya sıcaklıklarında bir azalma ters etkiye neden olur –ayrışma reaksiyonlarının hızı azalır, CO_2 tüketimini azaltır ve böylece atmosferde birikmesine izin verir. Net etki, karbonat-silikat döngüsünün, sıcaklıkları yaşanabilir bir aralıkta tutan muazzam bir termostat olarak görülebilmesidir (Şekil 16.4).

Bunun gibi geri bildirim süreçleri iklim döngülerinde yaygındır. Bölüm 14'te, Dünyanın Kartopu durumuna giriş ve çıkışında geri bildirim süreçlerinin nasıl dâhil olduğunu tartıştık.

Karbonat-silikat termostatik düzenlemesindeki bu uzun vadeli değişiklikler, onlara daha kısa vadeli diğer zorlamaları dayattı, örneğin Sırp jeofizikçi Milutin Milankoviç'in (1879–1958) adını taşıyan Milankovich döngüleri. Dünyanın ekseninin bir topaç gibi dönmesi (presesyon), eğim ve yörünge dışmerkezliğindeki değişiklikler, iklime sırasıyla 20.000, 40.000 ve 100.000 yıllık döngüler getirir. İklim ve sıcaklık sistemine, muhtemelen okyanus sirkülasyonundaki değişikliklerin neden olduğu daha kısa vadeli değişiklikler bile, 10–1000 yıl civarında dâhil edilir. Bununla birlikte, karbonat-silikat döngüsü, sıvı su için uygun sıcaklık koşullarının uzun vadeli korunmasını açıklar.



Şekil 16.4 Karbonat-silikat döngüsü. (a) Dünya yüzeyindeki sıcaklıkların sera gazı CO_2'nin geri bildirim kontrolü yoluyla düzenlendiği temel mekanizmalardan biri. (b) Karbonat silikat döngüsü, negatif bir geri bildirim süreciyle çalışır (Kaynak: Charles Cockell).

16.4 Levha Tektoniği

Karbonat–silikat döngüsünün yaşanabilirliğe katkısının bir sonucu olarak, yaşanabilir koşulların korunması için levha tektoniği gerekli olabilir. Gömülü karbonun atmosfere CO_2 olarak yeniden salınması için geri dönüş yolunu sağlar, böylece karbonat–silikat döngüsünü tamamlar.

Uzun vadeli yaşanabilirlikte önemli bir faktör, mevcut enerji ve besinlerin korunmasıdır. Bir organizma besinleri veya yerel enerji kaynağını tükettiğinde artık aktif olamaz. Bu nedenle, gezegenler yalnızca uzun süreler boyunca mikrobiyal aktivite için uygun fiziksel koşullar sağlayan koşullara sahip olmamalı, aynı zamanda genel olarak 'biyojeokimyasal yıkım' olarak adlandırılabilecek şeyi önleyecek mekanizmalar da olmalıdır - yaşam için gerekli kaynakları geri dönüştürmek mümkün olmalıdır. Levha tektoniği, karbonun geri dönüşüne ek olarak, kükürt ve demirin farklı redoks durumları gibi elementleri geri dönüştürmek için hareket eder, yaşam tarafından kullanılan elementlerin güçlü bir dolaşımını sürdürür ve yaşamın bir enerji kaynağı olarak kullandığı yaygın ve sürekli değişen jeokimyasal dengesizlikler yaratır.

Daha da önemlisi, hareketin gerçekleşmesi için levhaların yağlanması gerekir ve su, levhaları hareket etmeye ve dalmaya yetecek kadar deforme hale getirmek için en iyi maddedir. Bu nedenle, yaşanabilirlik için temel bir gereklilik olan suyun varlığı, levha tektoniğiyle bağlantılıdır. Su başka önemli roller oynar. Kayaçların ayrışması sulu mineraller üretir. Bunlar levha sınırlarına daldıklarında erir ve granit ve riyolit gibi silika açısından zengin mineraller oluşturma eğilimindedirler. Yüksek silika kayaçlar (granit gibi), okyanus kabuğunun yapıldığı bazaltlardan daha az yoğundur ve bu nedenle kıtaları oluşturarak yukarı doğru yüzerler. Kıtaları katılaşmış, silika bakımından zengin, kabarık köpükler olarak düşünebilirsiniz. Bu kıtalar, akıllı kara yaşamının ortaya çıkması için ortamı sağladı. Su, yalnızca yaşam için bir çözücü olarak gerekli olmakla kalmayıp, levha tektoniği yoluyla kıta oluşumuyla ayrılmaz bir şekilde bağlantılı olabilir.

Levha tektoniğiyle ilgili hikâye sadece yüzeye yakın süreçlerle sınırlı değildir. Ayrıca, manto konveksiyonunun gerçekleşmesi için iç kısımda doğru sıcaklık koşullarının korunmasında temel bir rol oynayabilir. Levha tektoniğinde manto içine alınan su, mantonun viskozitesini azaltarak dolaşımını artırır. Bu sirkülasyon sırayla, manyetik alandan sorumlu manyetik dinamoyu üreten dış sıvı çekirdekle ısı alışverişini etkileyebilir. Manyetik alan (manyetosfer) atmosferi güneş rüzgârından korur (ağırlıklı olarak enerjileri 1,5 ile 10 keV arasında olan elektron ve protonlardan oluşur). Güneş rüzgârındaki parçacıklar yüklendiğinden, manyetik alan çizgilerini geçemezler ve Dünyanın etrafına yönlendirilirler veya Dünyanın 1000 ila 60.000 km üzerinde uzanan radyasyon kuşakları olan Van Allen Kuşakları içinde tutulurlar. Böylece manyetosfer, yaşamı destekleyen bir atmosferin sürdürülmesi için bariz sonuçlarla atmosferin saçılmasını önler.

Bu nedenle, levha tektoniği, sıvı su ve manyetik alanın hepsi tek bir sistemle yakından bağlantılı görünüyor. Çok küçük olan ve oluştuktan sonra hızla soğuyan gezegenler, levha tektoniğini sürdüremeyecek ve manyetik dinamolarını hızla kaybedeceklerdir. Mars böyle bir örnektir. Bu nedenle, gezegen boyutu, levha tektoniğinde ve dolayısıyla gezegenlerin yaşanabilirliğinde önemli bir faktördür. Venüs durumunda, gezegen daha büyük olmasına rağmen, Güneşe çok yakındır. Kaçak sera etkisi okyanusların kaybına neden oldu. Su eksikliği, kabuğu katı yapar ve levha tektoniğine izin vermek için Dünyanın kabuğu kadar sünek değildir. Su eksikliği, kıtaları oluşturmak için silika bakımından zengin kayaların üretimini engeller. Venüs'te, yaşanabilir bölgedeki konumun su mevcudiyetini ve dolayısıyla uzun vadeli yaşanabilirlik üzerindeki etkileriyle birlikte levha tektoniği rejimini nasıl etkilediğini görüyoruz. Dünya merkezli yaşanabilirlik değerlendirmelerinde dikkatli olunması gerekse de, levha tektoniğinde, çok uzun jeolojik zaman periyotları boyunca levha tektoniğinin bir gezegenin yüzeyinde yaşanabilir koşullar yaratmada rol oynadığını öne süren dikkate değer sayıda birbirine bağlı faktör vardır.

Tartışma Noktası: Yaşanabilirlik için gerekli faktörler

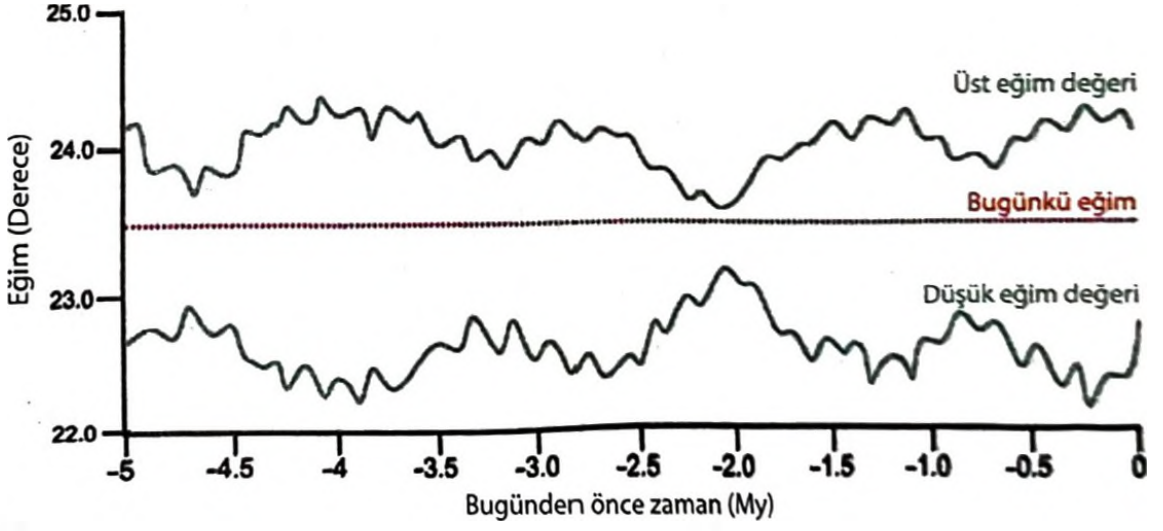
Bir gezegenin yaşanabilir olması için hangi faktörler gereklidir? Bu uzun vadeli bir tartışma oldu ve net bir cevap yok. Bununla birlikte, cevaplar, diğer gezegen konumlarını yaşamı destekleyici olarak değerlendirmek ve eve daha yakın olarak, Dünyanın geçmiş tarihinde prokaryotik yaşamdan çok hücreli yaşama kadar farklı yaşam türlerinin başarısını hangi faktörlerin etkilediğini anlamak için gereklidir. Mikron ölçeğinde yaşanabilirlik için gerekli koşulların ve bu koşulları jeolojik zaman ölçeklerinde desteklemek için gerekli olabilecek koşulların bir listesini yapın. Bu koşulları önemlerine göre sıralamaya çalışın, uzun süreler boyunca yaşanabilir koşulların sürdürülmesindeki rollerine dair kesin kanıtlara sahip olduğumuz ve olmadığımız durumları tanımlayın. Bu bölümde tartışılmamış olabilecek faktörleri belirleyin.

Javaux, E.J. and Dehant, V. (2010) Habitability: from stars to cells. *Astronomy and Astrophysics Reviews* **18**, 383–416.

Lammer, H., Bredehoft, J.H., Coustenis, A., Khodachenko, M.L., Kaltenegger, L., Grasset, O., Prieur, D., Raulin, F., Ehrenfreund, P., Yamauchi, M., Wahlund, J.E., Griessmeier, J.M., Stangl, G., Cockell, C.S., Kulikov, Y.N., Grenfell, J.L., Rauer, H. (2009) What makes a planet habitable? *Astronomy and Astrophysics Review* **17**, 181–249.

16.5 Bir Uyduya İhtiyacımız Var Mı?

Ayın yaşanabilirlikte temel bir rol oynadığına dair çok sayıda spekülasyon var. İlk modeller, Dünyanın eğimini stabilize etmede bir rol oynadığını öne sürdü (Şekil 16.5), ancak uzun zaman dilimleri boyunca (yüz milyonlarca yıl), bir Ay olmadan, Dünyanın eğikliğinin kaotik bir şekilde değişeceğini ve bu da 50°'ye çıkan bir eğime yol açacağını öne sürdü. Daha yeni modeller, bunun yerine, ay-



Şekil 16.5 Son beş milyon yıl için eğikliğin üst ve alt değerini gösteren, Dünyanın eğikliğinin Ay kaynaklı stabilizasyonu. Eğikliğin sadece yaklaşık 22,0° ila 24,5° arasında değiştiğine dikkat edin. Kırmızı çizgi bugünün değeridir. [Kaynak: Berger'den (1976) uyarlanmıştır].

sız bir Dünyanın, daha büyük eğiklik değişiklikleri sergilemesine rağmen, yüz milyonlarca yıl boyunca 20°–25° aralığında eğiklik değişimlerini sürdüreceğini öne sürüyor. Ne olursa olsun, Ay, eğikliği bir dereceye kadar dengeleyerek, karasal iklimdeki değişiklikleri etkileyebilir. Bu nedenle, argüman, bir Ay olmadan, Dünyanın ikliminin jeolojik zaman dilimlerinde kararsız olacağı yönündedir.

Modeller kesinlikle Ayın gezegenin eğimi üzerinde ve sonuç olarak iklim durumu üzerinde dengeleyici bir etkisi olduğunu öne sürüyor. Bununla birlikte, biyolojik yorumlamada muhtemelen dikkatli olunmalıdır. Aynı şekilde, Ay olmasaydı, değişen eğikliğin, jeolojik olarak sık görülen iklim değişikliğiyle başa çıkabilen çok genelci organizmaları seçeceği de aynı şekilde iddia edilebilir. Bu, çarpma olaylarının neden olduğu donma veya ısınma olayları gibi ani ve yıkıcı iklim değişikliğiyle daha iyi başa çıkabilen organizma gruplarının ortaya çıkmasına neden olabilir. Bir Ayın varlığının yok olmaya meyilli özel organizmaların evrimine yol açtığını da tahmin edebiliriz.

Ay hakkındaki tartışmalar, yaşanabilirliğin insan merkezli değerlendirmelerinde dikkatli olunması gerektiği şeklindeki daha genel noktayı vurgular. Organizmaların bir gezegende yaşayabilmeleri için ihtiyaç duydukları şeyler vardır (bir enerji kaynağı gibi –bu olmadan büyüyemez veya çoğalamazlar). Bu gereksinimler reddedilemez. Bununla birlikte, yaşanabilir koşulların özelliklerini, uzun vadeli kararlılıklarını ve evrimin gidişatını değiştirebilecek, ancak kendi başlarına bir gezegenin yaşanabilir olup olmadığı konusunda kategorik bir fark yaratmayabilecek başka faktörler de vardır. Bir Ayın varlığı böyle bir faktör olabilir.

16.6 Yüzeysel Sıvı Su, Yaşanabilirlik ve Zekâ

Levha tektoniği, manyetik alan ve kıtaların oluşumu gibi tartıştığımız uzun vadeli yaşanabilirlik faktörlerinin çoğu, yüzeylerinde sıvı su bulunan gezegen cisimlerine uygulanır. Bununla birlikte, gelgitle çarpıtılmış buzlu aylardaki yüzey altı okyanuslarında veya hatta sera etkisinin sıvı suyu korumak için yeterli olmadığı, ancak sıvı suyu korumak için radyoaktif ısıtmanın yeterli olduğu gezegenlerde yaşanabilir koşullar mevcut olabilir.

Astrobiyolojik bir bakış açısından bu iki tür dünya arasındaki ayrım pekâlâ kategorik olabilir. Yüzeylerinde sıvı su bulunan dünyalar söz konusu olduğunda, su, ışığın mevcudiyetiyle uzamsal olarak eş-sonlu olarak meydana gelebilir ve böylece fotosenteze izin verir. Çok hücreliliğin ve zekânın ortaya çıkışının fotosentezden gelen oksijenin varlığıyla bağlantılı olduğunu varsayarsak (Bölüm 14), o zaman bu dünyalar zekâya yol açan gezegensel yaşanabilirlik koşullarını üretmeye muktedir tek tür olabilir. Buna karşılık, yalnızca içlerinde su bulunan dünyalar, bir dizi metabolizma için yaşanabilir koşullara sahip olabilir, ancak fotosentez için koşullara sahip olmayabilir. Bu nedenle, gezegen, alt yüzeyindeki belirli anaerobik metabolizmalar için sürekli gezegensel yaşanabilirliği

koruyabilse de, yüzey fototroflar için yaşanmaz hale gelir. Bu, atmosferik oksijendeki büyük ölçekli artış ve dolayısıyla çok hücreli yaşam ve zekâ için gerekli olan yaşanabilirlik koşullarını kısaltır.

16.7 Issız Habitatlar: Habitatların Her Zaman Yaşam İçermesi Gerekmez

Normalde, bir gezegenin yaşanabilir olduğundan bahsettiğimizde, üstü kapalı olarak onun yaşama ev sahipliği yaptığı varsayımında bulunuruz. Bu, Dünyadaki yaşamın doğasında kök salmış bir paradigmadır. Günümüz Dünyasında, fotosentez, her ikisi de hidrolojik döngü ve atmosferde küresel olarak dağıtılan büyük miktarlarda organik karbon ve oksijen üretir. Bu iki fotosentez ürünü, oksijenli solunum için kolaylıkla birleştirilebilir, böylece, örneğin yeni lav akıntılarının birikmesi sonucu veya eriyen buzdan bir çöküntüde suyun gölleşmesiyle oluşan yeni bir habitat, aktif organizmalar tarafından hızla kolonize hale gelir. Bolluğu Dünyanın oksitlenmiş atmosferinin ve kabuğunun bir sonucu olan sülfat ve nitrat gibi oksitlenmiş bileşikler, fotosentetik olarak üretilen organik maddenin anaerobik oksidasyonu için elektron alıcıları da sağlar. Bu koşullar, neredeyse tüm habitatların kolonize olduğu anlamına gelir. Başka bir deyişle, karasal biyoloji çalışmalarında her zaman yaşanabilirlik ile yaşamın varlığı arasındaki bağlantıya dair bir varsayım, neredeyse bir paradigma olmuştur.

Bu paradigma, diğer gezegenlerde çok daha açık bir şekilde geçersiz olabilir. Örneğin, yaşam barındırmayan gezegenler, belirli organizmaların tüm gereksinimlerini küçük miktarlarda karşılayan bazı bölgelere sahip olabilir, ancak yaşamın ortaya çıkmamış olması veya yakında içinde yaşam barındıran bir gezegenden bu yaşam formlarının gezegenler arasında aktarılmasının söz konusu olmadığında (bu sürecin dahi mümkün olduğunu varsayarsak; bu Bölüm 17'de daha ayrıntılı olarak tartışılacaktır) ortaya yaşanabilir ve canlılığın bulunmadığı alanlar çıkabilir. Bu alanlar, tamamen organiklerden yoksun habitatları veya abiyotik organiklere sahip, ancak yaşamı olmayan habitatları içerebilir. Zayıf hidrolojik döngüye sahip seyrek yerleşimli gezegenlerde, habitatlar arasındaki bağlantı eksikliği, aktif yaşamın olmadığı habitatlara neden olabilir. Bu yerleri ıssız habitatlar olarak adlandırabiliriz ve böyle bir habitatı 'bilinen en az bir organizmanın aktivitesini destekleyebilen, ancak böyle bir organizma içermeyen bir ortam' olarak tanımlayabiliriz.

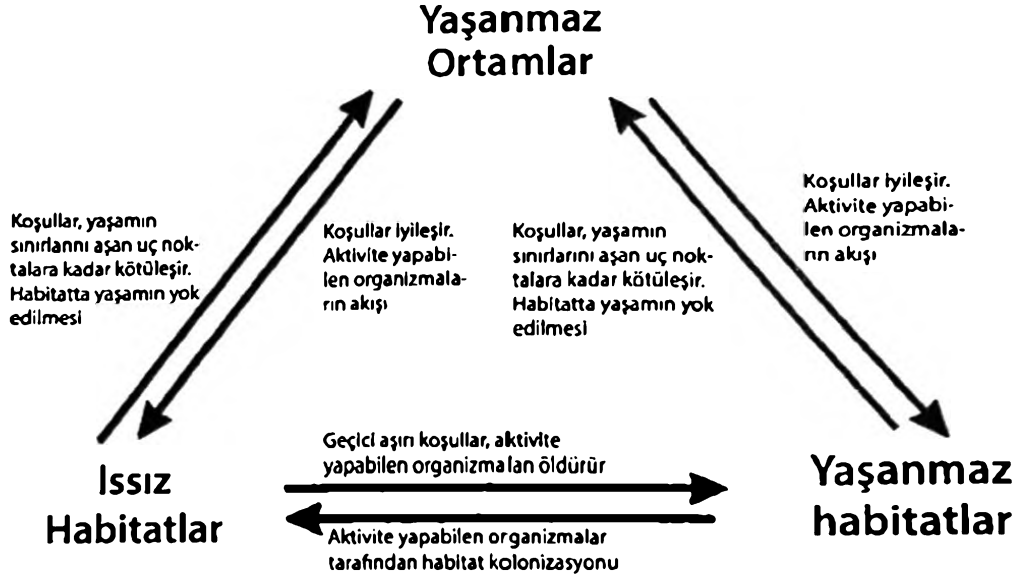
Bir ortamın ıssız bir habitat olduğu çeşitli yollarla gösterilebilir. Çevrenin, o ortama aşılanmış (potansiyel olarak geri dönüşümsüz olarak) bir organizmanın aktivitesini destekleyeceği veya fiziksel materyali ortamdan çıkararak ve bir laboratuvarda aynı çevre koşullarında belirli organizmaların aktivitesini destekleyeceği gösterilerek doğrudan kanıtlanabilir. Çevrenin en az bir bilinen organizmanın aktivitesini desteklemek için gerekli koşullara sahip olduğunu

gösteren kapsamlı bir jeokimyasal ve çevresel analizle dolaylı olarak gösterilebilir.

Biyolojik bir bakış açısından, bilinen evrendeki tüm ortamlar bu nedenle üç türden birine bölünebilir (Şekil 16.6).

Aşırı koşullarıyla birlikte biyolojik olarak zararlı yıldızlararası uzayın kapsamı göz önüne alındığında, Şekil 16.6'da gösterilen üç ortamdan, **yaşanmaz ortamlar** ('bilinen hiçbir organizmanın aktif olamayacağı bir ortam') evrendeki en yaygın ortam türüdür. Diğer iki çevre türünün her ikisi de habitat türleridir –yerleşik ve ıssız habitatlar. İlkinde, çevrede aktif veya faaliyet gösterebilecek yaşam vardır, ikincisinde yoktur. Evrendeki bazı konumlarda, özellikle gezegen kabuklarında ve üzerinde, bu üç ortam yerel koşullar değiştikçe birbirinin yerine geçebilir (Şekil 16.6). Şekil 16'daki oklar, bir gezegen gövdesindeki veya üzerindeki sabit bir noktaya uygulanır ve ortamların dinamik doğasını temsil eder.

Issız habitatların önemi; biyolojinin gezegenlerin jeolojisi ve jeokimyası üzerinde ne gibi etkileri olduğunu araştırmak için bize kontrol ortamları sağlayacak olmalarıdır. Örneğin, erken Dünyayı ve yaşam için izotopik kanıtlarını araştırdığımızda, hangi belirteçlerin kesin olarak yaşamdan kaynaklandığını anlamak için cansız kontrol ortamlarına sahip değiliz. Eğer ıssız habitatlar başka bir yerde, örneğin Mars'ta bulunursa, o zaman bize yaşamın kafa karıştırıcı etkisi olmadan bir gezegenin jeokimyası hakkında fikir verebilirler.



Şekil 16.6 Evrendeki ortamlar üç türe ayrılabilir. Bir gezegen yüzeyinin üzerinde ve hemen altında birçok yerde, bunlar birbirinin yerine geçebilir. Yaşanamayan bir ortamın, yerleşik bir habitata geçiş yapması durumunda, yaşanabilir koşulların ortaya çıkması, organizmaların gelişiyle eşzamanlı olarak meydana gelmesi veya ortamın ıssız bir habitat olması nedeniyle geçiş yapması gerektiğini unutmayın (Kaynak: Charles Cockell).

16.8 Yeryüzünden Daha Yaşanabilir Dünyalar Var Mı?

Yeryüzünü yaşanabilirlik için bir ölçüt olarak kabul ediyoruz, ancak evrende biyolojik koşulların daha da iyi olabileceği gezegenler var mı? Bölüm 14'te, daha küçük bir gezegende, atmosferik oksijen konsantrasyonlarındaki artışın Dünyadakinden daha erken gerçekleşip gerçekleşemeyeceği hakkında bir tartışma başlattık. İyileştirilmiş koşulları hayal edebileceğimiz başka yollar da var, örneğin daha güçlü bir hidrolojik döngü, yaşam için daha fazla besini kullanılabilir hale getirebilir.

Yine de dikkatli olmalıyız. Özellikle 'daha yaşanabilir' ifadesi, yararlı olacak kadar özellikli olmayabilir. Sürdürülen daha büyük bir biyokütleyi mi, yoksa daha geniş bir tür çeşitliliğini mi yoksa başka bir şeyi mi kastediyoruz? Dünya ile bir biyosfere ev sahipliği yapan başka bir gezegen arasında bir karşılaştırma yapmak için, biyosferin tam olarak hangi yönlerini karşılaştırdığımız konusunda net olmamız gerekirdi. Bir gezegenin ya yaşam için yaşanabilir olduğunu ya da olmadığını makul bir şekilde tartışabiliriz. Bu ikili bir kararsa, takip eden soru 'bazı gezegenler daha yaşanabilir mi?' değil, örneğin 'gezegenin yaşanabilir koşulları, birim yüzey alanı başına daha büyük bir biyokütleyi sürdürebilecek şekilde mi?' daha özelleşmiş bir sorudur.

16.9 İnsancıl İlke

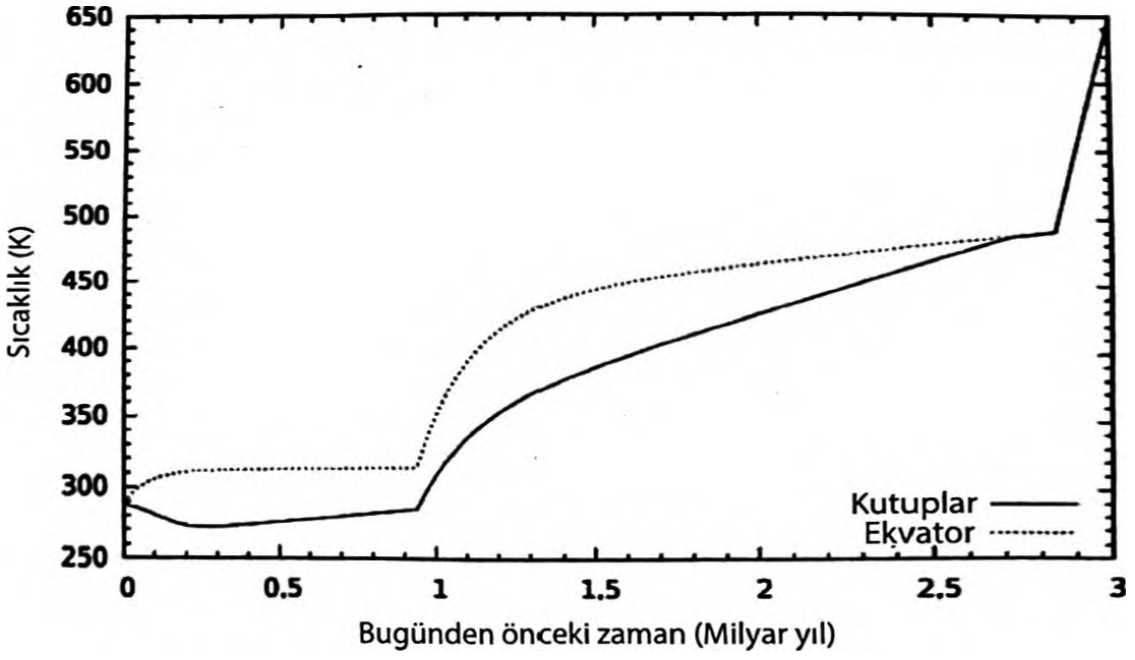
Yaşanabilirlik için önerilen gereksinimler ve bunun uzun süreler boyunca sürdürülmesi için koşullar, kozmoloji ve astrobiyolojideki önemli bir ilkenin –insancıl ilke– kapsamına girer.

Argüman basitçe, evrenin özelliklerinin, ilk etapta burada gözlemleyebilmemiz için yaşamla uyumlu olması gerektiğini belirtir. Örneğin, evrenin fizik yasaları, gezegenlerin var olabilmesi ve yaşamı destekleyebilmesi için öyle olmalıdır, yoksa bu gerçeği gözlemleyemeyiz. Örneğin, kararlı atom çekirdeklerinin bağlanmasına izin veren fiziksel sabitlerdeki küçük değişiklikler bile, aşina olduğumuz maddenin var olamayacağı bir evrene yol açacaktır. Bu garip bir şanslı tesadüf mü yoksa evreni yaşam için iyi 'ayarlanmış' kılan daha derin bir yapı mı var? Bu soru son derece felsefi olabilir ve test edilebilirliği veya yanlışlanabilirliği olmadığı için ciddi şekilde eleştirilmiştir. Bununla birlikte, Dünya gezegeninin son derece nadir olup olmadığı, yaşanabilirlik için potansiyel olarak birçok gereksinimin karşılandığı bir yer olup olmadığı veya yaşanabilirlik gereksinimlerinin evrendeki birçok gezegen için yeterince rahat olup olmadığı gibi daha ampirik bir soruyla ilgilidir. Evreni barındıracak yaşam, hatta zekâ. Yaşamın kökeni ve ortaya çıkışıyla ilgili olarak fiziksel yasalar ve fiziksel Evrenin ortaya çıkan doğası ne kadar katıdır?

16.10 Yeryüzünün Kaderi

Karbonat-silikat döngüsü aracılığıyla sıcaklık üzerinde termostatik bir kontrole sahip olmasına rağmen, bu sistem kaçınılmaz olanı süresiz olarak engelleyemez. Sonunda, Güneş Kızıl Dev statüsüne yolculuğuna başlarken (Bölüm 8) parlaklığındaki artış, Dünyanın, bundan yaklaşık bir milyar yıl sonra okyanusların buharlaşmaya başladığı nemli bir sera etkisine girmesine neden olacaktır (Şekil 16.7). Bu, Güneşin parlaklığı bugünkünden %10 daha fazla olduğunda meydana gelebilir. Kaçak sera etkisinin daha az aşırı bir versiyonu olan bu durum sırasında, su buharı stratosferde toplanacak ve hidrojenin uzaya kaçması ve oksijenin atmosferde kalmasıyla fotolitik olarak bölünecektir. Mikrobiyal yaşam, bugünden itibaren 2,8 milyar yıla kadar lokalize habitatlarda devam edebilir. Bu durumun ötesinde, gezegen, kaçak bir sera etkisine girdiği ve okyanuslar tamamen kaynadığı için Venüs benzeri olacak. Dünyadaki yaşamın son kalıntıları da ölecek.

Biyosfer, kaba bir şekilde, ortaya çıkışını tersine çevirecektir. Sıcaklıklar toleranslarını aştığından, önce hayvanların ölmesi beklenir. Bitkiler hayvanları takip edecek. Son ekosistemler mikrobiyal olacaktır, belki de yüksek sıcaklıkta, tuzlu habitatlarda bulunan ve yüksek rakımlı ortamlarda, mağaralarda veya sıvı suyun devam ettiği diğer yerel ortamlarda bulunan organizmalardan oluşacaktır. Eğer hala var ise, gezegenimizdeki zekânın kaderini düşünmek iste-



Şekil 16.7 Artan Güneş parlaklığı ile zaman içinde küresel ortalama sıcaklıklardaki değişim. Kesikli çizgi ekvatoral sıcaklığı ve düz çizgi kutupsal sıcaklığı temsil eder. Yaklaşık 1 milyar yıl sonra, sıcaklık 330 K'e ulaştığında nemli bir sera başlar ve stratosferin su buharı içeriğinin hızla artmasına izin verir. Sıcaklıklar yaklaşık 420 K'e ulaştığında, yaşam muhtemelen artık hayatta kalamaz. Yaklaşık 2,8 milyar yıldan sonra kaçak bir sera rejimi başlar [Kaynak: O'Malley-James vd. (2013)].

yebilirsiniz. Bir türün, kısa süre içinde kontrolden çıkmış bir sera etkisi tarafından yutulmaya mahkûm olan bir gezegenden kalıcı olarak kaçması için teknoloji var olabilir mi?

16.11 Sonuç

Yaşanabilirlik, geniş ve genellikle yanlış tanımlanmış bir terimdir, ancak genellikle astrobiyologlar tarafından organizmaların bakımını, büyümesini ve üremesini destekleyebilecek yerleri tanımlamak için kullanılır. Bir yerin belirli organizmalar açısından yaşanabilir olması için herhangi bir zamanda gerekli olan küçük ölçekte koşulları tanımlayabiliriz. Bir enerji kaynağı, CHNOPS elementleri, sıvı su ve uygun fiziksel ve kimyasal koşullar için gerekliliği içerir. Yaşanabilirlik, zorunlu olarak, Dünya üzerindeki yaşam hakkında bildiklerimizle sınırlandırılan bir kavramdır ve her zaman belirli organizmalara atıfta bulunularak tanımlanmalıdır. Belirli bir organizma türü için yaşanabilir bir ortam, bir başkası için yaşanmaz olabilir. Belirlenmesi daha zor olan, jeolojik zaman çizelgelerinin üzerinde yaşanabilir koşulların sürdürülmesine izin veren faktörlerdir. Levha tektoniği ve karbonat-silikat döngüsü, Dünyada yüzeyde uzun vadeli yaşanabilir koşullara katkıda bulunduğu düşünülen sadece iki süreçtir. Bu kavramları daha evrensel bir ölçeğe genişletmek istediğimizde, yaşanabilir koşulların devam edebileceği ortam türlerini sınırlamamız gerekir. Yaşanabilir bölge gibi kavramlar bunu yapmanın faydalı yolları olduğunu kanıtlıyor, ancak dikkatli kullanılmaları gerekiyor. Buzlu aylarda olduğu gibi, klasik yaşanabilir bölgenin dışında yaşanabilir cisimler bulabiliriz. Yaşanabilir bölge içinde olmak, mutlaka yaşanabilirlik anlamına gelmez. Yaşanabilir koşullar, yerleşik bir gezegende bile yaşamın varlığı anlamına gelmez.

İleri Okumalar

Kitaplar

Langmuir, C.H., Broecker, W. (2012) *How to Build a HabitableWorld*. Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton.

Kasting, J. (2010) *How to Find a Habitable Planet*. Princeton Üniversitesi Yayınları, Princeton.

Ward, P.D., Brownlee, D. (2004) *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*. Copernicus. Springer, New York.

Yayınlar

Berner, R.A., Lasaga, A.C., Garrels, R.M. (1983) The carbonate–silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon-dioxide over the past 100 million years. *American Journal of Science* 283, 641–683.

Campbell, I.H., Taylor, S.R. (1983) No water, no granites – no oceans, no continents. *Geophysical Research Letters* 10, 1061–1064.

Cockell, C.S., Balme, M., Bridges, J.C., Davila, A., Schwenzer, S.P. (2012) Uninhabited habitats on Mars. *Icarus* 217, 184–193.

Hall, L.S., Krausman, P.R., Morrison, M.L. (1997) The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin* 25, 173–182.

Heller, R., Armstrong, J. (2014) Superhabitable worlds. *Astrobiology* 14, 50–66.

Hoehler, T.M. (2007) An energy balance concept for habitability. *Astrobiology* 7, 824–838.

Jakosky, B.M., Shock, E.L. (1998) The biological potential of Mars, the early Earth and Europa. *Journal of Geophysical Research* 103: 19359–19364.

Kasting, J.F., Catling, D. (2003) Evolution of a habitable planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 41, 429–463.

Kasting, J.F., Whitmire, D.P., Reynolds, R.T. (1993) Habitable zones around main sequence stars. *Icarus* 101, 108–128.

Knoll, A.H. (2011) The multiple origins of complex multicellularity. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 39, 217–239.

Lineweaver, C.H., Fenner, Y., Gibson, B.K. (2004) The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way. *Science* 303, 59–62.

Nisbet, E., Zahnle, K., Gerasimov, M.V., Helbert, J., Jaumann, R., Hofmann, B.A., Benzerera, K., Westall, F. (2007) Creating habitable zones, at all scales, from planets to mud-micro-habitats, on Earth and on Mars. *Space Science Reviews* 129, 79–121.

O'Malley-James, J.T., Greaves, J.S., Raven, J.S., Cockell, C.S. (2013) Swansong biospheres: refuges for life and novel microbial biospheres on terrestrial planets near the end of their habitable lifetimes. *International Journal of Astrobiology* 12, 99–112.

Sleep, N.H., Zoback, M.D. (2007) Did earthquakes keep the early Earth habitable? Astrobiology 7, 1023–1032.

Stoker, C.R., Zent, A., Catling, D.C., Douglas, S., Marshall, J.R., Archer, D., Clark, B., Kouvanes, S.P., Lemmon, M.T., Quinn, R., Renno, N., Smith, P.H., Young, S.M.M. (2010) Habitability of the Phoenix landing site. *Journal of Geophysical Research* 115, E00E20.

17

MARS'IN ASTROBİYOLOJİSİ

Öğrenme Çıktıları

- Mars tarihinin bazı önemli jeolojik aşamalarının anlaşılması.
- Mars'taki suyun tarihinin anlaşılması.
- Bir atmosferdeki gazların hızının karekök ortalamasının nasıl hesaplanacağını, gazların Mars gibi bir gezegen atmosferinden kaçışını belirleyen faktörleri ve Mars'ın atmosferini kaybetmesine neden olan bazı faktörlerin öğrenilmesi.
- Biyolojik olarak temel elementlerin Mars'taki dağılımı hakkında bildiklerimizin anlaşılması.
- Viking misyonları ve meteorların incelenmesi de dâhil olmak üzere, Mars'ta yaşam olup olmadığını belirlemeye yönelik geçmişteki girişimlerin anlaşılması.
- Gezegensel ada biyocoğrafyasının astrobiyoloji için neden önemli olduğunun bilinmesi.

17.1 Mars ve Astrobiyoloji

Bu bölümde, Dünya dışındaki başka bir gezegene ilk kez ayrıntılı olarak bakacağız. Mars'ı araştırdıkça, önceki bölümlerde araştırdığımız bir bazı düşüncelerin ya açık bir şekilde bir araya geldiğini ya da bir dizi olgu ve düşünce içinde gömülü olarak karşımıza çıktığını göreceksiniz. Bu, sonunda astrobiyolojinin neden gezegen bilimleri, yer bilimleri, astronomi gibi birçok alanı ve yaşanabilirlik söz konusu olduğunda da biyolojiyi kavramayı gerektirdiğini anlayacağımız bir bölümdür. Bu bölümü okurken Mars'la ilgili ifadelerin, olguların ve teorilerin altında yatan kavramları bilinçli olarak düşünün ve gerekirse önceki bölümlere bakın. Ayrıca böyle bir kitapta her şeyi kapsamlı bir şekilde açıklamanın çok zor olduğunu fark edeceksiniz. Bu ders kitabında sağlanan kavram ve fikirlerle ilgili bilginizi derinleştirmek için başka kaynaklar bulma, bilimsel makaleleri okuma ve internette daha fazla bilgi arama fırsatını değerlendirmelisiniz.

Birçok yörünge ve yüzey görevi sayesinde Mars hakkında giderek daha fazla bilgiye sahibiz. Bu görevler, meteoritlerden elde edilen kanıtlarla birlikte, bize

güne sistemindeki astrobiyolojik açıdan en ilginç gezegenlerden biri hakkında kapsamlı bir kavrayış sağlamıştır.

Adını kırmızı yüzeyi nedeniyle Romalıların Savaş Tanrısından alan ve yarıçapı (3397 km) Dünyanın yaklaşık yarısı kadar olan Mars, her zaman bilim insanlarının ilgisini çekmiş ve hayal gücünü uyandırmıştır. Demir oksitlerin neden olduğu rengi, genellikle Kızıl Gezegen olarak anılmasına neden olmuştur. Komşu dünyamız olarak, Percival Lowell (1855-1916) ve Mars kanalları hakkındaki kitaplarından –bunlar zeki Marslılar tarafından kuşatılmış ve kurak haldeki şehirlerine su götürmek için oyulmuş kanallardır– Mars tepelerinin yörünge fotoğraflarındaki düşük çözünürlüklü görüntülerinden başka bir şey olmadığı ortaya çıkan Mars'taki anıtlara, yüzlere ve piramitlere varıncaya dek garip iddiaları ortaya atan çeşitli ve takıntılı karakterleri ve fikirlere kendine çekmiştir. Mars uygarlıklarına olan ilginin tarihi eğlencelidir ve iyimserliğin verilerden daha önemli olmasına izin verildiğinde neler olacağına ilişkin ciddi bir ders sunar. Okumaya değer olsa da, bahsettiğimiz bu tarihten burada daha fazla bahsetmeyeceğiz.

Mars'a ilişkin çalışmalara değinmenin birçok yolu vardır. Bu gezegenin jeolojisi, jeokimyası ve potansiyel yaşanabilirliği hakkında bilinen her şeyi kapsayabileceğimizi düşünemeyiz. Bu kitap astrobiyoloji hakkında bir ders kitabı olduğu için, yaşanabilirlik bakımından Mars'la ilgili önemli olan faktörlere odaklanmaktan çekinmiyorum.

17.2 Mars Tarihi: Çok Kısa Bir Özet

Mars, jeolojik olarak büyük ölçekte farklıdır. Güney yarım küre çok eskiden kraterli hale gelmiş araziyle kaplıyken kuzey yarım küre düzdür, daha yeni (çarpma olaylarının daha az etkilediği) arazi daha alçakta bulunur. Bu ayırt edici jeolojiye kabuksal ikilik denir ve kökenleri bilinmemektedir. Buna ilişkin hipotezler, kuzey yarımkürenin çökmüş haldeki daha düşük seviyesinin ortaya çıkmasına neden olan tek veya çoklu büyük çarpmaların rolünü ele alır. Alternatif olarak, ayrılma, erken dönemdeki levha tektonik rejiminde homojen olmayan manto yapısının taşınmasının sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

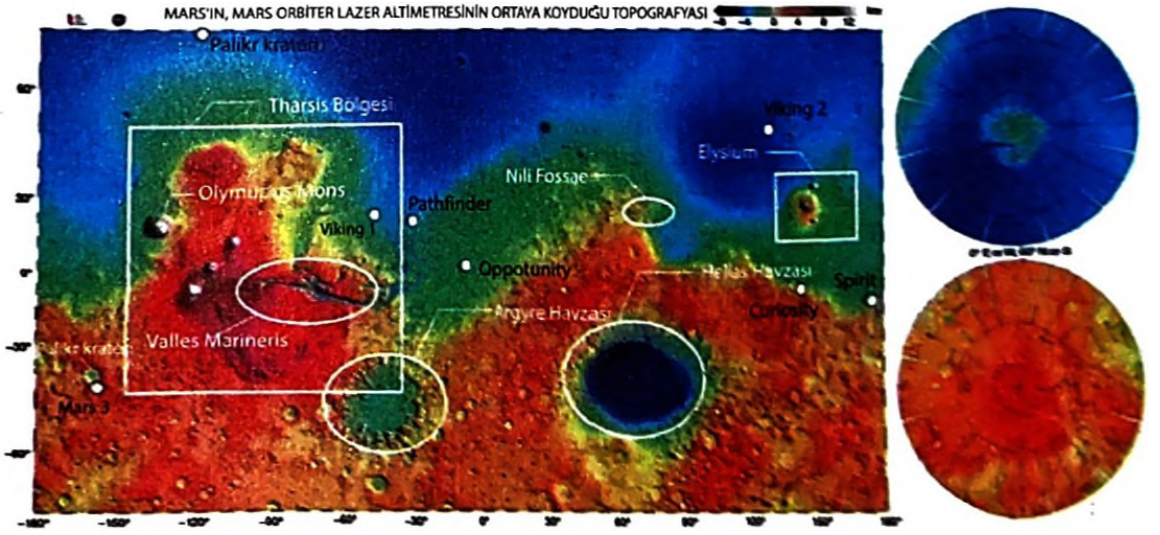
Mars yüzeyi, güney yarımkürede çok eski dönemdeki çarpmaların oluşturduğu derin Hellas ve Argyre Havzaları ve kuzeyde Everest Dağının iki buçuk katı yüksekliğinde devasa bir kalkan yanardağ olan Olympus Mons'un bulunduğu dev Tharsis çıkıntısıyla noktalanmıştır. Volkanik çıkıntının ayrılmasıyla oluşan bir yarık, 4000 km uzunluğunda ve yaklaşık 200 km genişliğinde olan ve 7 km derinliğe kadar uzanan bir kanyon sistemi halindeki Valles Marineris'tir. Fikir vermesi bakımından, Dünyadaki Büyük Kanyon ~500 km uzunluğunda ve ~2 km derinliğindedir.

Elysium, başka bir ayırt edici volkanik bölgedir. Dünya gibi, Mars'ın tarihi de kendine özgü jeolojik çağlara bölünmüştür. Bu çağlar, birazdan inceleyece-

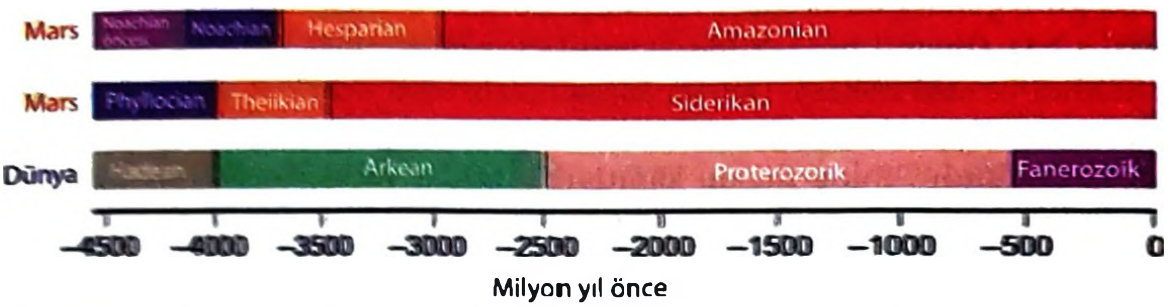
ğimiz gibi, genel olarak Mars'taki büyük ölçekli çevresel değişiklikleri yansıtır (Şekil 17.1). Önemli bir şekilde, Dünyada yaşamın ortaya çıkışıyla örtüşen çağ, Noachian-öncesi dönemi (4,1 Ga öncesi) takip eden Noachian (4,1–3,7 Ga önce), Mars'ta sürekli olarak sıvı su kütlelerinin bulunduğuna ilişkin kanıtların olduğu bir zamandır. Buna ilişkin kanıtları birazdan inceleyeceğiz. Bu dönem, su bakımından zengin ortamlarda killerin oluşumuyla ilişkili bir dönemdir. Sıklıkla Noachian-öncesi ve Noachian dönemleri birlikte Noachian dönemi olarak ele alınır ve ben de bu bölümde bu sözcüğü 3,7 Ga öncesindeki zamana atıfta bulunmak için kullanacağım.

Noachian'dan sonra, su dağılmaya ve donmaya başlar ve kükürt gazlarıyla karışan az miktardaki su, Mars'ı asidik koşullar ve demir sülfat gibi sülfat tuzlarının oluşumuyla karakterize olan Hesperian (3,7-3,0 Ga önce) çağına götürür. Bu süre zarfında, Tharsis ve Elysium'da faaliyet gösteren çok sayıda volkanik aktivite vardı. Sonunda, kalan su da donmuş ya da buharlaşmıştır ve Mars, üç milyar yıl boyunca yüzeyine hâkim olan ve bugün bildiğimiz çöl yapısını şekillendiren volkanizmanın da azaldığı Amazonian döneminde (3,0 Ga öncesinden günümüze) kuru, çorak bir Dünyaya geçiş yapar. Çevre koşullarındaki belirgin değişiklikler başka jeolojik zaman ölçeği önerilerine yol açmıştır (Şekil 17.2). Bu öneri, gezegen ölçeğindeki, ağırlıklı olarak kil (phyllosilikat) oluşturan bir çağdan (Fillosityen) çok asidik özellikteki kükürt çağına (Theiikian) ve sonra modern çöl dünyasına (Siderikan) geçişi yansıtan jeokimyadaki değişikliklere dayanmaktadır.

Bu nedenle, Mars'ın genel tarihini, en azından su mevcudiyeti ve dolayısıyla gezegenin biyolojik potansiyeline ilişkin koşulların bozulmasının tarihi olarak görebiliriz.



Şekil 17.1 Mars'ın, Mars Global Surveyor'da bulunan Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) yardımıyla elde edilen topografik haritası (kutuplar sağda gösterilmiştir). Kabuksal ikilik, hem topografyada hem de kraterleşme derecesinde açıkça görülmektedir. Metinde tartışılan belli başlı özelliklerden bazıları (beyaz) ve uzay aracının iniş yerleri (siyah; Ana görüntü için kaynak: NASA) işaretlenmiştir.



Şekil 17.2 Mars'ın Dünyayla karşılaştırmalı iki jeolojik zaman ölçeği

17.3 Mars'ın Bozulması

Önemli ve bariz bir soru, ilk dönemlerinde Dünyaya oldukça benzeyen bir gezegenin (büyük miktarlarda sıvı suya ev sahipliği yaptı) nasıl bu kadar çorak hale geldiğidir.

Bu sorunun cevabı kesinlikle basit değil, ancak cevaba katkıda bulunacak önemli bir faktör, Mars'ın boyutunun küçük olmasıdır. Mars, daha küçük yarıçapı nedeniyle Dünyadan daha hızlı soğur. Sonuç olarak, manyetik alanı oluşturan ve Dünyadaki, atmosferimizin güneş rüzgârı tarafından püskürtülmesinden koruyan dinamo çalışmaz. Mars'ın güney yarım küresinde bulunan kayalardaki manyetik şeritler (Şekil 17.3), bu erken tarihin manyetik alanını koruyan kayaların yüzeyden sızdığı erken bir tektonik rejimin kanıtı olarak öne sürülmüştür.

Atmosferin saçılması, atmosferin kaybolmasını tamamen açıklayamaz. Diğer iki süreç de –hidrodinamik kaçış ve darbe erozyonu– çok önemli katkılar sağlamıştır.

Hidrodinamik kaçış en iyi şekilde gazların davranışı göz önüne alınarak anlaşılır. Kaçış hızı veya bir nesnenin bir gezegenin çekiminden kaçması için gereken minimum hız şu şekilde hesaplanır:

$$v_{esc} = \sqrt{2GM/R} \qquad (17.1)$$

burada G Kütleçekim sabitiyken, M kütle ve R de yarıçaptır.

Bu denklem, Mars için 5,03 km s^{-1}'lik bir kaçış hızı verir (Dünyanınki ise 11,19 km s^{-1}'dir).

Kaçış hızı, gazların kaçma etkinliğini belirler. Bunu anlamak için, bir gazdaki molekül hızlarının dağılımının bir Maxwell-Boltzmann dağılımına uyduğunu (Şekil 17.4) ve bir gazın sıcaklığı arttıkça daha yüksek hıza sahip daha fazla sayıda gaz parçacığı olacağını bilmek gerekir. Hız dağılımı, ortalama hızdan çok daha yüksek hızlara sahip gaz molekülleri "kuyruğu" olduğu anlamına gelir.

Genel bir kural olarak, eğer bir gazın ortalama hızı kaçış hızının altıda biri kadarsa bu, gezegen atmosferinden uzaya kaçmak için yeterince hızlı hareket eden bir molekül kuyruğunun varlığı anlamına gelir. Bu nedenle, geçmişte

Mars'ın atmosferinin üst kısmının ısınması, Mars'taki daha düşük kaçış hızı nedeniyle, diğer her şey eşit olduğunda, daha yüksek kütleli bir gezegene kıyasla uçucu maddeleri uzaklaştırma şansı daha yüksek olacaktır.

Ayrıca, hidrojen gibi (suyun ışıkla parçalanmasından veya **fotolizinden** üretilen) daha hafif gazlar, O_2 gibi daha ağır moleküllerden daha etkili bir şekilde kaçacaktır. Bu durum, Şekil 17.4'te şematik olarak gösterilmiştir.

Bu ilişki nicel olarak ifade edilebilir. Bir gazdaki moleküllerin ortalama hızın karekök ortalaması olarak tanımlanan bir gaz parçacığının (v_{rms}) kök ortalama hızı –gazların hızını ifade etmenin yaygın bir yolu– moleküler kütlesiyle ters orantılıdır ve aşağıdaki gibi verilir:

$$v_{rms} = \sqrt{3kT/m} \qquad (17.2)$$

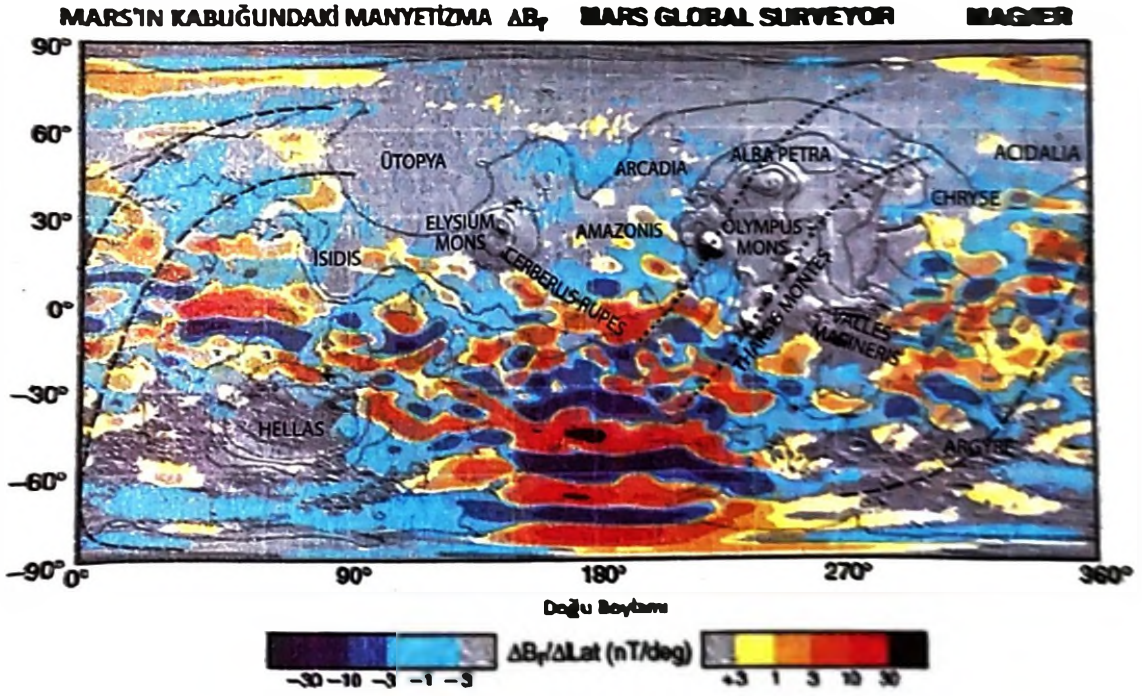
burada k Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve m gazın bir molekülünün kütlesidir.

Denklem alternatif olarak şu şekilde yazılabilir:

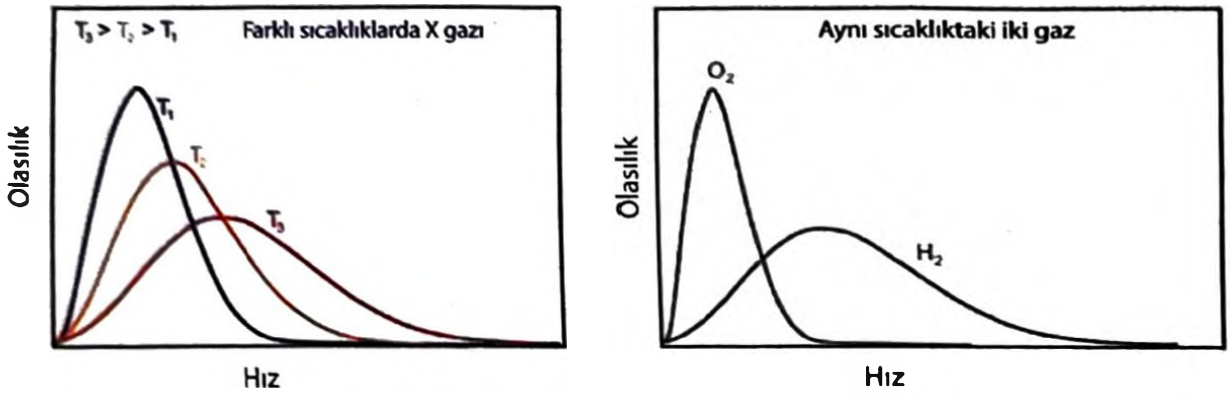
$$v_{rms} = \sqrt{3RT/M_m} \qquad (17.3)$$

burada R, Evrensel gaz sabiti ve M_m, gazın bir molünün kütlesidir.

Hidrojen gibi hafif gazlar daha kolay kaçacak olsa da, uzaya kaçarken daha ağır atomlarla çarpıştıkça diğer gazları da beraberinde "sürükleme" eğilimi gösterir ve bu da atmosferik kütlenin büyük ölçekte tükenmesine yol açar. Bu sürece **hidrodinamik kaçış** denir.



Şekil 17.3 Mars'ın çok eski dönemden kalma kraterli yüzeyinde bulunan kayalardaki manyetik şeritler, Mars'ın erken dönem yüzeyinde dışarı doğru itilen kayalarda değişen erken manyetik alanın olası kaydına dair umut verici kanıtlar sunar. Veriler, Mars Global Surveyor tarafından toplanmıştır. NanoTesla/derece cinsinden birimler görüntünün altında verilmiştir (Kaynak: Mars Global Surveyor, NASA/JPL).



Şekil 17.4 Bir olasılık dağılımına göre gösterilen gaz atomları veya moleküllerindeki hızların Maxwell-Boltzmann dağılımının bir şeması (her eğrinin altındaki alan değişmezliğe eşittir). Solda, sıcaklığın belirli bir gaz üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, hız dağılımı yüksek hızlara doğru o kadar meyleder. Sağda moleküler kütlenin farklı gazlar için hız dağılımını nasıl etkilediği gösterilmektedir. Gaz ne kadar hafif olursa, belirli bir sıcaklıkta ortalama hız o kadar yüksek olur. Hidrojenin moleküler kütlesi, 32 olan oksijene kıyasla 2'dir (Kaynak: Charles Cockell).

Hidrodinamik kaçışın kanıtı, Mars atmosferindeki döteryum/hidrojen oranının ölçülmesiyle bulunabilir. Bu oran, karasal deniz suyunda bulunandan yaklaşık beş kat daha yüksektir ve daha hafif hidrojenin kendisinden ağır döteryuma kıyasla daha çok kaçtığını gösterir. Daha hafif izotopları tükenmiş olan nitrojen ve argon gibi diğer elementler de bu düşünceye daha fazla destek sağlar.

Ek olarak, erken yoğun bombardıman dönemi de (Bölüm 10) yardım sağlayabilir. Dev ölçekteki çarpmalar atmosferik gazları ısıtmış ve daha büyük bir gezegene kıyasla atmosferden kaçmalarına yardımcı olmuştur. Bu çarpma erozyonunun atmosfer kaybının yaklaşık %90'ına yol açmış olabileceği ve geri kalan kaybın daha önce açıklanan diğer işlemlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca, Mars'ın hiçbir zaman tam olarak işleyen bir tektonik rejime sahip olmadığı da açıktır. Karbonat olarak hapsedilen ve yeraltına gömülen karbondioksit asla atmosfere geri verilmedi - karbonat-silikat döngüsü (Bölüm 16) gelişmedi, bu da muhtemelen atmosferik kayıplara katkıda bulundu.

Tüm bu faktörler, atmosferin incelmesi, suyun donması ve nihayetinde atmosfer basıncının üç noktalı değerlere ulaşması ve yüzeyde sıvı su olasılığını ortadan kaldırması anlamına geliyordu. Bugün, yüzey ortalama atmosferik basıncı neredeyse tam olarak üçlü nokta üzerindedir (6 mb; Bölüm 2), yani buz, ısıtıldığında, sabit sıvı su kütleleri oluşturmak yerine süblimleşir. Mars'ın en derin kısmı olan Hellas Havzası'nda bile basınç sadece 11.6mb'ye ulaşırken, en yüksek nokta olan Olympus Mons zirvesinde basınç 0.3mb'dir.

Bu atmosferik özellikler, sera ısınması potansiyelini ciddi şekilde sınırlayarak yüzey sıcaklıkları üzerinde çok ciddi bir etkiye sahiptir. Bugün Mars'ın

ortalama sıcaklığı -55 °C'dir. Kutuplardaki hava sıcaklığı -153 °C'ye kadar düşebilir. Ancak ekvatorda 20 °C'ye kadar yükselebilirler. Viking aracının karaya çıktığı sahalarda toprak sıcaklıklarının geçici olarak 27 °C'ye ulaştığı bulunmuştur.

Mars'ın oluşumundan bu yana meydana gelen geniş ölçekteki jeolojik değişiklikler, üzerinde daha sık yörüngesel değişiklikler gerçekleşti. 16. Bölümde Ayın varlığının Dünyanın eğimini dengelediğini görmüştük. Fakat Mars için durum böyle değildir. Mars'ın eğimi, her 100.000 yılda bir döngüsel kaymalara tabidir ve her milyon ve 10 milyon yılda bir, dönme ve yörünge dinamiklerinin neden olduğu daha uzun vadeli değişikliklere tabidir. Bu eğim 5 ila yaklaşık 50° arasında değişmektedir ve yaklaşık altı milyon yıl önce yüksek bir eğim değerine sahiptir. Yüksek eğimin söz konusu olduğu dönemler, kutuplar Güneşe döndüğünde kutuplara ısı iletme eğiliminde olacağından, böylece buzulları daha etkili bir şekilde buharlaştıracağından ve potansiyel olarak atmosferik basıncı ve su içeriğini artıracağından, eğimdeki bu salınımlar, Mars'ta suyun geçmişteki değişen hallerini anlamak bakımından önemlidir.

17.4 Mars Görevleri

Mars hakkında bildiklerimizin çoğu, 1960'lardan bu yana yapılmış olan çok sayıda uçuş sayesinde elde edildi. Bu uçuş görevleri, oradaki suyun tarihi ve yaşanabilirlikle ilgili olarak jeokimyasal çevre hakkındaki kavrayışımızı da sırayla artırdılar. Uzay görevlerine ek olarak, Mars meteorlarından da çok şey öğrendik (ve bunun nasıl mümkün olduğunu bölümün ilerleyen bölümlerinde göreceğiz). Burada bu görevleri kısaca gözden geçireceğiz.

Mars'ın ilk keşfi, Mariner uzay aracı sayesinde olmuştu. Mariners 4, 6 ve 7 tarafından üç uçuş görevi ve bir yörünge görevi (Mariner 9) söz konusu oldu. Bu görevler, Aydakinden farklı olarak, çarpma kraterleriyle kaplı çorak bir manzaranın söz konusu olduğunu ortaya çıkarmıştı. Gezegen ölçeğindeki bir fırtına Mariner 9'un Mars'ın yüzeyini görüntülemesini engelledi fakat bilim insanlarına yerel olarak başlayıp tüm gezegeni kaplayan ve aylarca süren bu muazzam fırtınaların ilk görüntüsünü sağladı. Bu görevler aynı zamanda ilk kez büyük Tharsis yanardağlarını da ortaya çıkardı (Şekil 17.5).

1976'da Viking Orbiters ve iniş araçları, Mars'ın eski dönemki yüzeyi hakkındaki bilgimizi daha da geliştirdi. Bunlar vadi ağlarını, gözyaşı damlası şeklindeki adaları ve su varlığına dair diğer belirtileri ortaya çıkardılar. İki arazi aracı, Mars topraklarında yaşam belirtileri aramak üzere başka bir dünyaya gönderilen ilk biyoloji deneylerini taşıdı. Bunların sonuçlarını bu bölümün ilerleyen kısımlarında daha ayrıntılı olarak tartışacağız.

1997'den 2006'ya kadar, Mars Global Surveyor, Amerika Birleşik Devletleri'nin Mars keşfine dönüşüne damgasını vurdu. Mars'ın ayrıntılı görüntülerini sağlamak, manyetik durumunu, yüzey bileşimi ve atmosferik sıcaklıkları ölç-

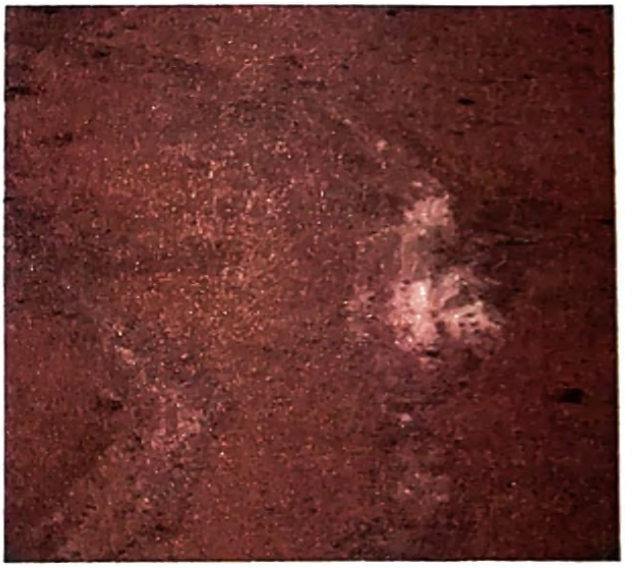
mek üzere aygıtlarla donatıldı. Mars Orbiter Lazer Altimetresi (MOLA), Mars'ın çarpıcı topografik haritalarını ortaya koydu (Şekil 17.1) ve daha sonra Phoenix ve Curiosity'nin (Mars Bilim Laboratuvarı) iniş alanlarına karar vermede kullanılacak birçok görüntü aldı.

Mars Pathfinder, statik bir arazi aracının, araç tarafından çevrede görülen kayaları analiz edebilen küçük bir robotik geziciyle (Sojourner) birleştirildiği bir teknoloji sergileme göreviydi. 1997'de Chryse Planitia adlı bir bölgedeki Ares Vallis'e indi. İniş alanının yakınındaki kayaların kimyasal analizini yapabilen X-ışını spektrometreleri ve kameraları vardı. Bu görev, hava yastığı inişi de dâhil olmak üzere iniş teknolojilerini sergileyerek gelecekteki gezicilerin yolunu açtı. Sojouner'ı 2002'de Mars'ın yüzeyini haritalamaya başlayan yeni robotik yörünge aracı Mars Odyssey izledi. Bu araç yüzey sıcaklıklarını ölçmek için aletlerle ve yüzey minerallerini analiz etmek için bir gama ışını spektrometresiyle donatıldı.

Sojourner gezgininin başarısının ve Mars Global Surveyor'dan geri gönderilen verilerin ortaya koyduğu bilimsel soruların ardından, birbirinin aynı iki gezgin araç olan ve Mars Exploration Rovers (MER) adını alan "Spirit" ve "Opportunity" Mars'ın jeolojisini keşfetmek üzere 2004'te için iki farklı bölgeye gönderildi. Bu görevi başarmak üzere, kayaların ve toprakların ince ölçekteki dokularını ve kimyasal bileşimini analiz etmek için tasarlanmış aletlerle donatılmışlardı. Bu aletler, X-ray spektrometrisi (APXS) ve kaya yüzeyinin hemen altında incelemelere olanak veren bir kaya aşındırma aletiydi (RAT). Opprtunity ise asidik sıvıların kayalardan sızarak demir oksit mineralini bırakması



Şekil 17.5 Mariner 9'un 1971'de çektiği Mars fotoğrafı. Tharsis volkanlarının zirveleri küresel toz fırtınası arasında görülüyor (Kaynak: NASA).



Şekil 17.6 Mars yüzeyinde Spirit aracı tarafından belgelenen silik silika tortuları. Yarıklar 20 cm genişliğinde. Bunlar su-kaya etkileşimin kanıtları sayılmaktadır (Kaynak: NASA)

sonucu oluşan hematit (hematit, Fe_2O_3 formülüne sahiptir) bakımından zengin çökeltileri araştırmak üzere Meridiani Planum'a gönderildi. Spirit ise, Gusev Krateri'ne gönderildi ve onun yakındaki "Home Plate" adı verilen bölgeyi keşfetti. %90 saf silika tortuları şeklindeki hidrotermal aktiviteye dair kanıtlar sayesinde (ki bu e buranın eski bir hidrotermal sistem olduğunu düşündürür) bu alanın volkanik olduğu bulunmuştur (Şekil 17.6). Bu bulguların her ikisi de, bir zamanlar yaşanabilir nitelikte olabilecek sıvı su ortamlar bulunduğunu ortaya koymaktadır. Gezici araçlar 90 sol nominal görevi sonrasında da kullanılabilir durumdaydılar ve Dünyaya varışlarından on yıl sonra da hala kullanılıyorlardı.

MER gezici araçlarının yanı sıra, Avrupa Uzay Ajansının, yeraltını (MARSIS; Sub-Surface Sounding Radar Altimeter) ve yüzeydeki mineralleri (OMEGA; Görünür ve Kızıl-altı Mineralojik Haritalama Spektrometresi) haritalamak üzere aaraç gereç taşıyan Mars Ekspres Orbiter Misyonu da devredeydi. Ayrıca jeologların kullanacağı muhteşem görüntüleri toplayan yüksek çözünürlüklü bir kamerası vardı (HRSC). Gemide ayrıca, Mars'a başarılı bir şekilde inen, ancak tam olarak açılmayan Beagle 2 iniş aracı da vardı. Bu araç karbon aramak da dâhil olmak üzere yüzey jeolojisini araştıracak ve astrobiyoloji deneyleri yapacaktı.



Şekil 17.7 Mars'ın kuzey yarım küresindeki (18,4°K 282,4°B'de) Jezero kraterinin (49km çapında) kenarının renklendirilmiş görüntüsü. Nili Fossae bölgesinde varsayılan bir antik su kanalının sonuna yakın alanda (sol taraftan gelen) delta benzeri yapıları göstermektedir. Fillosilikat içeren malzemeler yeşil, olivin içeren malzemeler sarı, düşük kalsiyumlu piroksen içeren malzemeler mavi ve morla gösterilirken kahverengi yüzeyler belirgin spektral özelliklere sahip değildir. Görüntü, yaklaşık 10 km genişliğinde bir alanı göstermektedir (Kaynak: NASA/JPL/JHUAPL/MSSS/Brown Üniversitesi).

Spirit and Opportunity'den birkaç yıl sonra, başka bir yörünge aracı (Mars Reconnaissance Orbiter), yüzeyi yüksek çözünürlükte görüntüleyebilecek aletlerle donatılmış olarak Mars'a gönderildi. Bunlar arasında ~1m boyutundaki görüntüleri çözebilen HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), Mars yüzeyinin üç boyutlu görüntülerini sağlayan bir kamera olan CTX ve görünür ışıktan kızıl-altına uzanan dalga boylarında yüzeyi görüntüleyerek Mars'ın ince ölçekli mineralojisini ortaya koyan CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) bulunuyordu. CRISM özellikle, yalnızca sıvı su varlığında oluşabilen killer (fillosilikatlar), sülfatlar (örn. gypsum) ve karbonatlar gibi su tutan minarellerin büyük birikintilerini buldu. Kil minerallerinin tanımlanması, Mars'ta nötr pH'lı ve sürekli sıvı su içeren ortamların varlığı anlamına geliyordu. Bu, kil ve karbonatlar gibi minerallerin varlığı, Jezero Krateri'ndeki kanal ve delta birikintileri gibi bol su göstergesi olan jeomorfolojik özelliklerle bir arada düşünüldüğünde özellikle önem arz ediyordu(Şekil 17.7).

2008 yılında, NASA Phoenix iniş aracı, buzu birikintilerini incelemek üzere Mars'ın kuzey kutup bölgesine gönderildi. Vastitas Borealis'te 68.218°K 234.251°D'ye indi (Şekil 17.8). Belki de arazi aracının en şaşırtıcı keşiflerinden biri, arazi kameraları tarafından görüntülenen ve roket egzozunun yüzeydeki tozu püskürttüğü bölgelerde de gözlemlenen yüzeye yakın yerdeki buzdu. Phoenix aracında, Mars topraklarında perkloratların (perklorat iyonu içeren bileşikler; ClO_4^-) varlığını gösteren bir kimya laboratuvarı bulunuyordu. Bu beklenmedik bir bulguydu. Perkloratların varlığı, Viking gibi daha önceki görev uçuşlarında organik bileşiklerin tespit edilmemesine ilişkin bir açıklama sağlayabilir. Perkloratlar, Viking aracının Mars'taki toprakların kütle spektrometrisi analizi sürecindeki piroliz (ısıtma aşaması) aşamasında olduğu gibi, yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldığında oksitlenmiş organik moleküllere sahip olacaktır.

Kimya laboratuvarından elde edilen sonuçlar, yüzey toprağının orta derecede alkali olduğunu (pH 8 ile 9 arasında) ortaya koymuştu. Magnezyum, potasyum, sodyum ve klorür iyonları tespit edildi ve tuzluluk düşüktü, bu da yaşam açısından çok uygun bir ortam olduğunu göstermektedir.



Şekil 17.8 Phoenix iniş aracının çevresinin panoramik görünümü (Kaynak: NASA).

Mars yüzeyini keşfedecek en son gezici araç, Curiosity'di. 150 km çapındaki Gale Krateri'ne inen bu ve Mars'ın geçmişteki yaşanabilirlik özelliğini değerlendirecek cihazlara sahip olan bu araç Mars'a gönderilen şimdiye kadarki en gelişmiş araçtı. Bu cihazlar arasında, toprağı organik maddeler bakımından araştırmak ve gazları analiz etmek üzere SAM (Sample Analysis at Mars) ve X-ışını Kırınım ve X-ışını Floresansıyla mineral bileşimini incelemek üzere CheMin'i (Chemistry and Mineralogy) vardı. Gezici araç, bir zamanlar yaşanabilir olabilecek yumuşak ortamlar keşfetti ve yüzey mineralojisi hakkında yeni ayrıntılı bilgiler verdi.

17.5 Mars ve Yaşam

Mars'ın yaşanabilirliğini değerlendirmek uzun süredir bilim insanlarının hedefinde olmuştur ancak son zamanlarda gezegenden gelen veriler ve zorlu koşullardaki yaşam hakkında artan bilgiler ışığında üzerinde daha çok durulan bir odak haline gelmiştir. Bu çaba, Mars'ın tarihini aydınlatmak ve Dünyanın jeolojik ve biyolojik tarihini anlamak için karşılaştırmalı bir veri noktası sağlaması bakımından önemlidir. Kayalık gezegenlerde olası yaşanabilir bölgeleri araştırmak suretiyle, Bölüm 19'da tartışılacak olan, Güneş dışında bulunan Dünya boyutundaki gezegenlerin yaşanabilirliğini değerlendirecek bilgiler edinebiliriz.

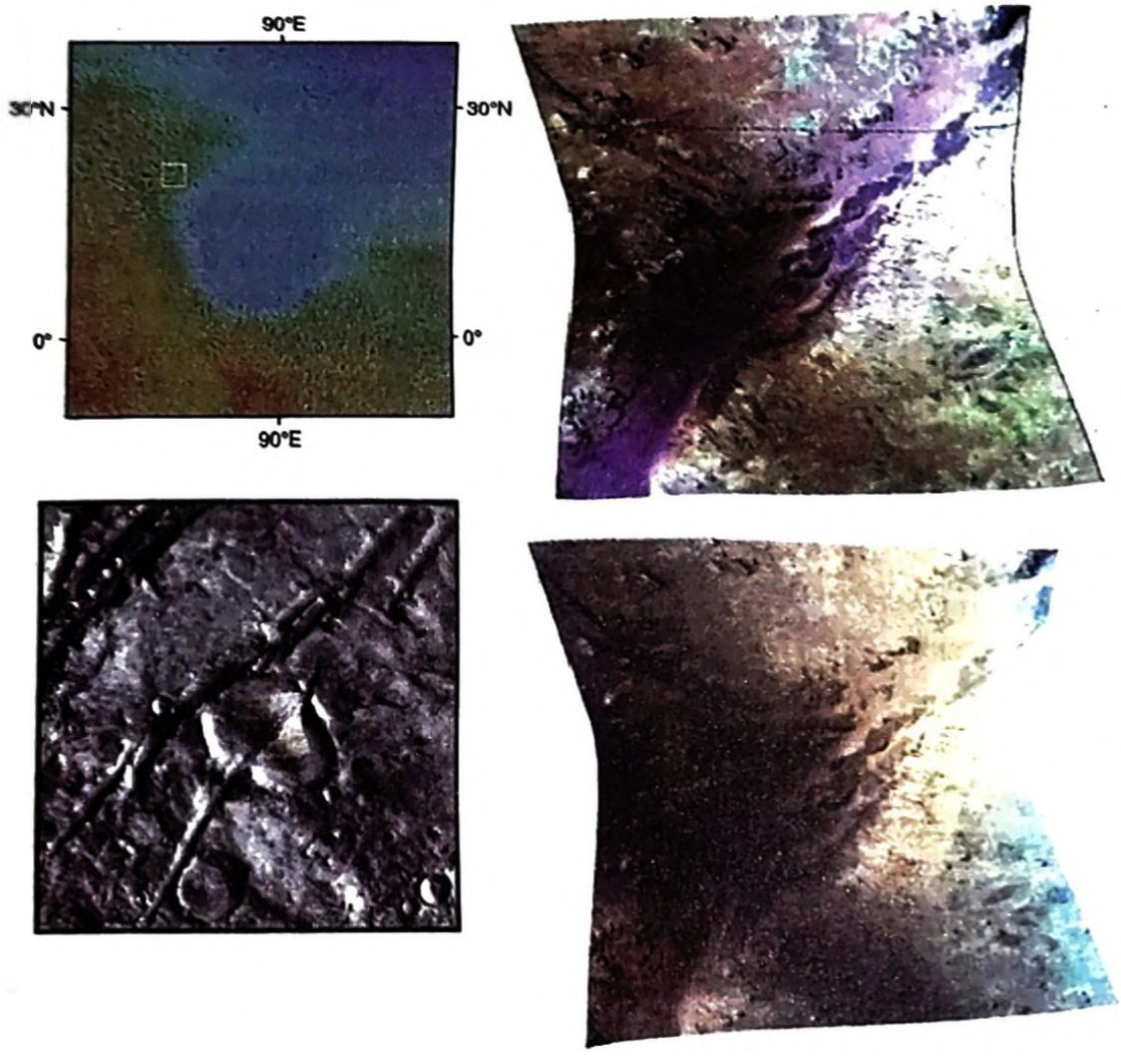
17.5.1 Sıvı Su ve Mars

Sıvı formdaki su, yaşam için temel çözücüdür. (Bölüm 3) ve Mars'taki tarihi, gezegenin yaşanabilirliği konusundaki anlayışımızın temelini oluşturur. Genel olarak Mars'ta zaman içinde sıvı suyun azaldığı söylenebilir. Gezegenin en eski dönemlerinde, sıvı su varlığına dair çok sayıda kanıt vardır.

Mars'ta suyun varlığından uzun süredir, hatta ilk Mariner ve Viking misyonları sırasında yörüngeden ve gözyaşı damlası şeklindeki adalardan gözlenen kıvrımlı kanalların yüzeyde bir sıvı akışını düşündürdüğü zamanlarda bile şüpheleniliyordu. Bu şüpheleri doğrulamak için mineral haritalaması yapmak gerekir. Mars'ın çok eski dönemlerinde sıvı suyun varlığına bir kanıt, su volkanik kayaçlarla (fillosilikatlarla) reaksiyona girdiğinde ortaya çıkan kil bileşiklerinin gözlemlenmiş olmasıdır. Fillosilikatlar birçok Noachian bölgesinde bulunur. Bazı bölgelerde, killerle birleşik halde magnezyum karbonat bulunması da sıvı suyun varlığının kanıtıdır. Karbonatlar, küresel olarak her yerde bulunan Mars tozunun bir parçasını oluştursalar da (içeriğinin kütlece yaklaşık %5'i veya daha azı), karbonat ana kayaları, içinde birikecekleri sıvı suya yönelik güçlü kanıtlar sunar. Fillosilikatlar, çarpma kraterleri tarafından açığa çıkarılan antik Noachian kabuğuyla ilişkili olarak da gözlenir (bu nedenle bu eon için önerilen alternatif isim: Phyllocian). Örneğin, Mars'ın Nili Fossae bölgesi (Şekil 17.9) olağanüstü bir mineral yelpazesi sergiler ve farklı birimlerden oluşur. Bu

bölgeyle ilgili bilgiler Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) CRISM ve HiRISE aletleri kullanılarak elde edilmiştir.

Nili Fossae'deki bir birim, büyüklüğü metre ile kilometre arasında değişen farklılaşmış ve farklılaşmamış kaya bloklarından yapılı demir ve magnezyum açısından zengin killere sahiptir ve Mars'ın daha sonraki çarpma olaylarında parçalanan eski kabuğunu temsil ettiği düşünülmektedir. Bu Fe/Mg-smektit



Şekil 17.9 Mars'ta Nili Fossae'deki jeolojik çeşitlilik. 21.9°K, 78.2°D yakınında Nili Fossae bölgesindeki bir kırığın parçasının görüntüsü; Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM). Sol üstte, bir Mars Orbiter Lazer Altimetresi (kırmızı yükseltileri, mavi açak kısımları göstermektedir) üzerine bindirilmiş Isidis havzası görüntüsü (küçük kare) gösterilmektedir. En dar noktasında (sağ üstte) 11 km olarak gösterilen kırık, topografyayı göstermek için Viking yörünge aracının elde ettiği dijital görüntüsü (sol alt) üzerine bindirilmiştir. Sağ üstte kızıl-altı kanallardaki bölgenin renklendirilmiş hali görüşmeltedir. Parlak yeşil fillosilikatlar, sarı-kahverengi olivinler, mor ise piroksenlerdir. CRISM verileri, High-Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE; sağ alt) üzerine bindirilir ve fillosilikatların kum tepelerindeki küçük aşınmış kayalarda ve olivinlerde olduğunu gösterir. (Kaynak: NASA/JPL/JHUAPL/Brown Üniversitesi).

killeri, Mars'ta en bol bulunan killerdir ve suyun volkanik kayaçlarla etkileşimi sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

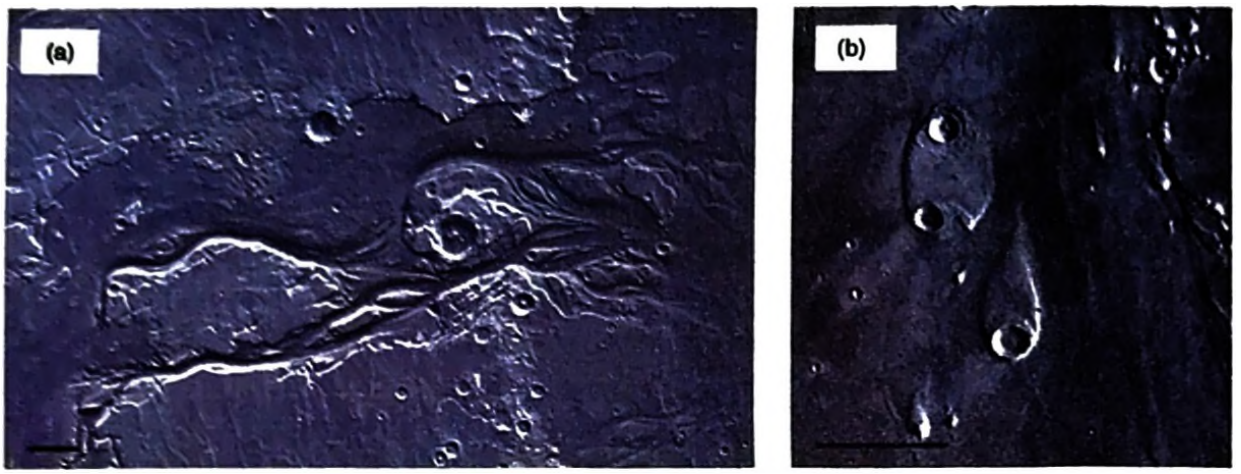
Asteroit ve kuyruklu yıldızların çarpmasıyla oluşan kraterler, Mars'ın yeraltı yüzeyinin bileşimi ve çok eski dönemindeki jeokimyasal özellikleri hakkında bilgi sağlar. Kraterin ortasındaki malzeme geri teptiğinde oluşan merkezi tepe noktaları, su sirkülasyonu sırasında hidratlı fazların ve hidrotermal alterasyon ürünlerinin belirtilerini gösterir. Ekvatordaki Leighton Kraterinin merkez kımının yükselişi, Mars'ın yeraltı yüzeyinin 6 km derinliğindeki materyali yukarı çıkarmıştır ve karbonat içermektedir.

Mars'ta eskiden su bulunduğuna ilişkin diğer kanıtlar, suyla oyulmuş uzun kıvrımlı kanallarının oluşturduğu vadi ağlarını, olası bir kuzey okyanusun kalıntılarını ve antik göllerdeki, özellikle çarpma etkisiyle krater oluşumu sırasında oluşan tortulları içerir.

Dünya gibi Mars'ın ilk dönemleri de bizi soluk genç güneş paradoksuyla karşı karşıya getiriyor. Güneş daha az parlakken sıvı su yüzeyde nasıl kaldı? Bunun için CO_2 buz bulutlarının neden olduğu bir sera etkisinden veya volkanik SO_2'nin yüksek konsantrasyonlara ya da epizodik üretimine kadar çeşitli öneriler geliştirilmiştir. Ayrıca, suyun çoğunun, doğrudan yüzeye maruz kalmaktan ziyade buz tabakalarının altında olabileceği öne sürülmüştür, bu da ılık, nemli bir Mars'tan ziyade soğuk ve nemli bir Mars fikirlerini çağrıştırır.

Noachian Hesperian'a geçiş yaparken, su kütleleri daha azdı, ancak yine de bu süre zarfında yeraltı suyu aktivitesinin olduğuna dair kanıtlar vardır. Örneğin, Burns Formasyonundaki katmanlı bölgeler olan Meridiani Planum'un sığ su sistemlerinde oluşan kumtaşları olduğu düşünülmekte ve yoğun jeokimyasal ve jeolojik tartışmalara konu olmaktadır. Sülfat tuzlarının yaygın olarak bulunması ve hematit yığınlarının varlığına dair gözlemler, zeminde sızan, yüzeyi değiştiren, geride demir oksitleri ve sülfat tuzlarını bırakan su modelini destekler. Hesperiyen dönem sırasında, hidrolojik döngü genellikle yüzeye yakın çevrede düşük su-kaya oranı etkileşimleriyle karakterize olmuştu. Volkanik SO_2, sülfürik asit (H_2SO_4) üretmek üzere suyla reaksiyona gireceğinden, bu, bölgesel asitliğe yol açacaktı. Bunun bir yan etkisi, demir sülfat ve jarosit gibi asidik ortamlarla ilişkili bir dizi sülfat tuzunun üretilmesiydi. Bu, bu dönem için önerilen alternatif adı da açıklar (Şekil 17.2); Yunanca kükürtten (*theion*) türetilen Theiikian.

Yıkıcı çıkış kanalları, Noachian'dan bu yana yeraltı ve yüzey sularının varlığı bakımından özellikle ikna edici kanıtlar sağlar. Bu özellikler, kaotik yapıdaki arazinin bir kırığından veya bölgesinden başlar ve aerodinamik adalar ve yatakları boyunca kraterlerin etrafındaki tortular ile on binlerce kilometre uzunluğundaki geniş çöküntülerden oluşur (Şekil 17.10).



Şekil 17.10 Mars'taki yıkımsal çıkış kanalları. (a) Gezegendeki en büyük çıkış kanalı olan Kasei Vallis (25° K, 300° D), batıdaki sığ bir kuzey-güney kanyonundan çıkar. Ölçek çubuğu 100 km'yi göstermektedir. (b) Chryse Planitia'daki Ares Vallis çıkış kanalının ağzına yakın aerodinamik adalar. Bu görüntü, Mars tarihinin başlarında bu bölgeden geçen selin aşındırıcı gücünün oluşturduğu 400 m (üst ada) ve 600 m (alt ada) yüksekliğindeki gözyaşı damlası şeklindeki iki uçurumu göstermektedir. Alt krater 10 km çapındadır (Kaynak: NASA).

Oluşabilecekleri mekanizmalar, çarpma olayları, depremler veya volkanik magma etkisiyle eriyen donmuş permafrosttan yeraltı suyunun salınmasını içerir. Bu kanallardan bazıları 3 Ga öncesine kadar uzanıyor. Bununla birlikte, Athabasca Valles'la ilişkili olanlar gibi bazıları sadece birkaç milyon yıl önce faaliyet göstermiş olabilir. Eğer oluşumlarının mekanizması su ise, o zaman çıkış kanalları, yeraltında erken Hesperiyen'den jeolojik olarak çok yakın geçmişe kadar süren yıkım dönemlerinde sıvı haldeki suyun varlığını akla getirecektir.

Noachian'dan sonra kısa süreli olarak su ve kayalar arasındaki etkileşime ilişkin kanıt, Mars meteorlarında da bulunur. Örneğin, minerallerin ve camın killere dönüştürüldüğü Nakhlite meteoritlerindeki doku değişimleri, yaklaşık 600 Milyon yıl önce Amazon'da sulu etkileşimlerin varlığına dair kayıt oluşturur.

Noachian'dan sonra ve Hesperian boyunca, Mars'ın soğudukça azalan ısı akışının, yüzeydeki çevrelerde ve giderek artan derinliklerde suyun çoğunun donmasına neden olduğu varsayılmaktadır.

Mars bugün büyük bir donmuş su kütlesine ev sahipliği yapıyor. Mars'ın yüzeyine yakın (onlarca santimetre derinliğe kadar), ekvatorda ağırlıkça %2'den kutup bölgelerinde yüzey volkanik regolitiyle karışmış haldeki saf buza kadar değişen buz birikintilerini barındırır. Bu buz birikintileri, Mars Odyssey uzay aracındaki Gama Işını Spektrometresiyle tespit edildi.

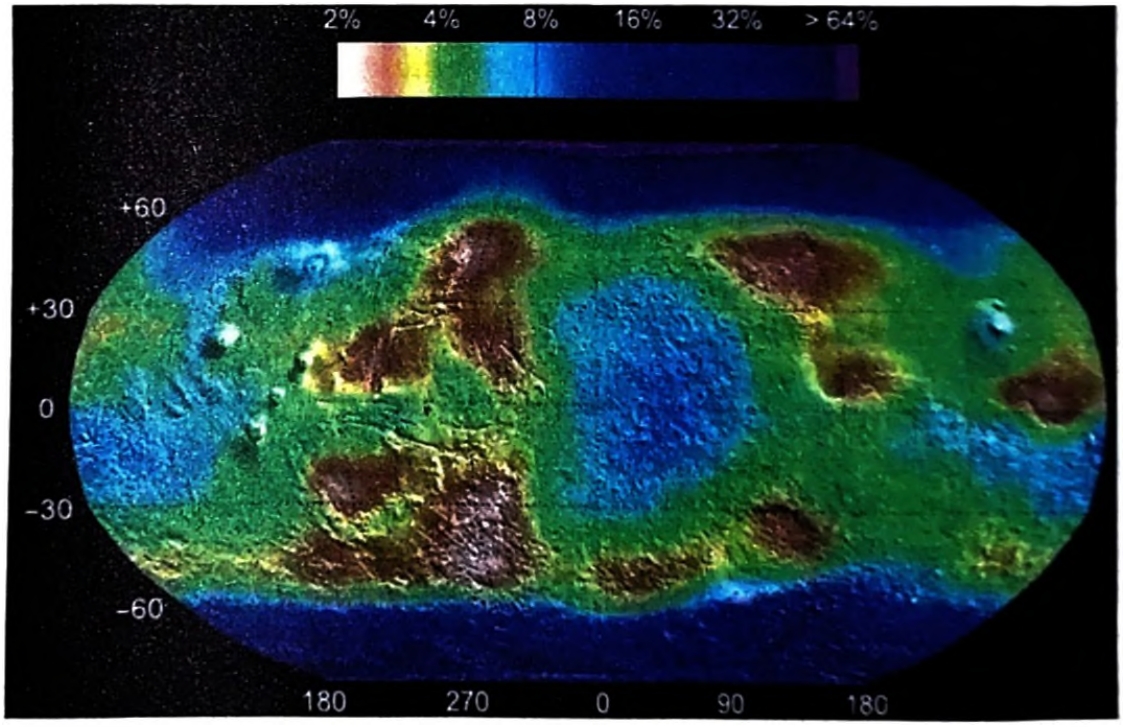
Gama Işını Spektrometrisi dâhiyane bir yöntemdir. Elementler, Güneşten ve yıldızlararası uzaydan gelen kozmik ışınlarla bombardımana tutulduklarında, nötronları serbest bırakma eğilimi gösterirler ve bu nötronlar diğer çekirdeklerle çarpıştığında daha yüksek enerji durumuna yükselirler. Gama ışınları yayarak daha düşük bir enerji durumuna geri dönerler. Bu gama ışınlarının

enerjisi yörüngede ölçülebilir ve ortaya çıkan enerji spektrumu, bir gezegen kabuğundaki yaklaşık 20 farklı elementin konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılabilir.

Hidrojen atomları (örneğin sudaki hidrojenler), benzer kütleye sahip oldukları için nötronlardan gelen enerjiyi soğurmada özellikle iyidir. Bu nedenle, gama ışını spektroskopisi, suyun neden olduğu soğurmayı tespit etmek ve böylece Mars'ın en üst metresi veya altındaki buz konsantrasyonunu ölçmek için kullanılabilir (Şekil 17.11). Gama Işını Spektrometre ölçümleri, Phoenix iniş alanındaki yüzeye yakın buzun doğrudan tespitiyle doğrulanmıştır.

Bazı modelleme tahminleri, kriyosfer derinliğini (donmuş su derinliği) ekvatorda ~2,5 km, kutuplarda ~6.5 km olarak belirlemiştir. Bununla birlikte, diğer modellerde Mars'ın jeotermal gradyanının aşağı yönlü revizyonları, derinliğin iki ila üç kat daha fazla olabileceğini düşündürmektedir. Tuz çözeltileri (perkloratların veya NaCl'nin varlığı gibi), donma noktasını düşürerek bu derinlikleri azaltır. Mars kriyosferinin ~35 m'ye eşdeğer bir küresel su tabakası içerdiği tahmin edilmektedir.

Mars'ın yeraltı derinliklerindeki su hakkında ne söylenebilir? Mars Express uzay aracındaki, Mars Advanced Radar for Subsurface ve Ionospheric Sounding (MARSIS) cihazı kullanılarak Mars'taki derin yeraltı yüzeyinin doğrudan gözlemleri yapıldığında teorik penetrasyon derinliği ~5 km olarak saptandı. Cihaz, Mars'ta 1.8 km'ye kadar olan kuzey kutup birikintilerinin yer altı alanı



Şekil 17.11 Gama Işını Spektroskopisiyle Mars yüzeyinde tespit edilen ve Mars'ın yakın yüzeyindeki suyun alt sınırı olarak yorumlanan hidrojen (kütle oranı resmin üst kısmındaki renk yelpazesinde gösterilmiştir. Kaynak: NASA/JPL-Caltech/ Los Alamos Ulusal Laboratuvarı).

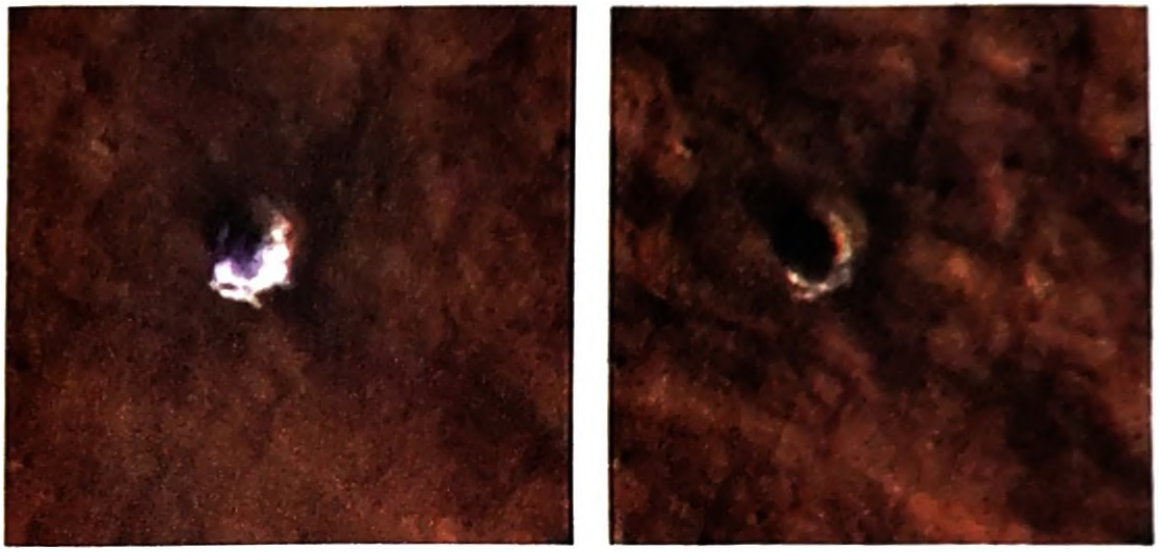
bilgi sağladı ve tortuların esas olarak saf su buzundan oluştuğunu doğruladı. Mars'ın ekvator bölgelerindeki dik yamaçlardan 20 km'ye kadar uzanan geniş, loblu yapılar olan loblu enkaz çıkıntılarında (LDA) yer altı yapılarını incelemek amacıyla Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) üzerindeki Shallow Radar (SHARAD) cihazı kullanıldı. Bu gözlemler, Mars'ta gömülü buzulların olduğunu gösteriyor. SHARAD cihazından elde edilen veriler, yalnızca Mars'ın Hellas Havzası bölgesindeki LDA'larda ~20 cm kalınlığında küresel bir su tabakasına eşdeğer olan ~28 000 km^3'e kadar buzu tutulabileceğini göstermektedir. Bu gömülü buzullar, birkaç milyon yıllık zaman diliminde Mars'ta iklim değişiklikleri olduğuna kanıt sağlar. Bununla birlikte, radar cihazlarının hiçbiri yüzey altı *sıvı* su kütlelerini tespit etmedi.

Genel olarak, Mars'taki buz, mevcut iklim koşulları altında tahmin edilen kararlı derinliği takip eder ve bu da Mars'ın yeraltı buz koşullarının, topografya ve materyal tipindeki ve önceki çağlardan gelen buzlu tortu farklılıklarını yansıtan yerel heterojenlikler yardımıyla yörüngesel iklim döngülerini takip ettiği fikriyle tutarlı olduğu anlamına gelir.

Kutuplardaki tahmini hacmi 1,2-1,7 × 10^6 km^3 olan devasa buz birikintileri ve az önce tartışılan gömülü buzdan farklı olarak, Mars'ın diğer buzul ve buzul öncesi özellikleri hakkında geniş bir literatür vardır. Yeraltı buzuna yönelik kanıtlar, (zemin donup çözüldüğünde oluşan) çokgen yapılar, paralel sıralanmış taş şeritler (aynı zamanda toprağın donması ve çözülmesinden de oluşur), oluklar ve buz süblimleşmesiyle ilgili göstergeler gibi zemindeki ayırt edici düzenli özellikleri kapsar. Yeraltına enjekte edilen sıvı haldeki suyla üretilen ve daha sonra donup genişleyerek yükselici tümsekler halini alan pingolar da bir açıklama olarak önerilmiştir. Oluşum mekanizmaları toplu sıvı su hareketini içerdiğinden özellikle ilgi çekicidirler. Yörüngeden yakın zamanda kazılmış küçük kraterlere ilişkin, su kaynaklı buz varlığını ortaya çıkarmıştır. Buzun birkaç ay sonra süblimleştiği gözlemlenmiştir (Şekil 17.12).

Bugün Mars yüzeyindeki sıvı su, kısmen yüzeyin büyük bir kısmının üçlü noktada olması nedeniyle ve kısmen de düşük nemin, sıvı su oluştuğunda kaynamasa bile hızla buharlaşacağı anlamına gelmesi nedeniyle kararsız hale geliyor. Bununla birlikte, günümüzde yüzeye yakın yerlerde sıvı su bulunduğuna dair kanıt olduğu ileri sürülmüştür. Biriken materyallerin neden olduğu bir çıkıntıya inen kıvrımlı bir kanala sahip sarp bir yamaçta yer alan karakteristik oyuklara sahip olan yataklar günümüzdeki sıvı suyunun kanıtı olarak önerilmiştir. Bununla birlikte bu kanallar, CO_2'nin süblimleşmesinin neden olduğu regolitin akışkanlaşması gibi CO_2'nin neden olduğu süreçler tarafından da oluşturulabilir.

Günümüzde suyun varlığına ilişkin başka kanıtlar da ileri sürülmüştür. Mars'ta gözlenen ve mevsimsel olarak değişen koyu eğim çizgileri, günümüz yüzeye yakın olarak bulunan tuzlu sular olabilir (Şekil 17.13). Bunlara Tekrarlayan Eğim Doğrusu (RSL) denir.



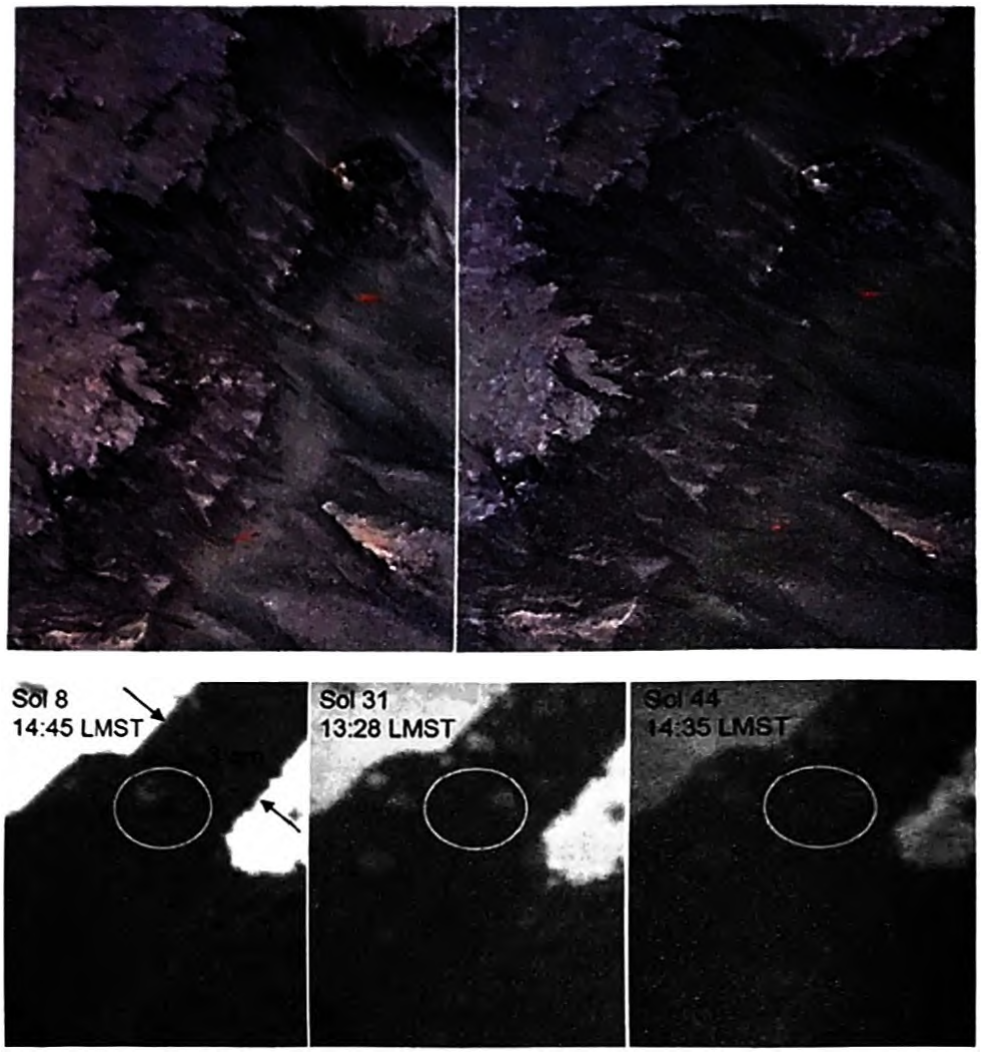
Şekil 17.12 Mars'tayakın zaman önce oluşan küçük kraterler, birkaç ay sonra süblimleştiği gözlemlenen yüzey altı buzun varlığını ortaya koymaktadır. Bu, Mars'ta 18 Ekim 2008'de ve yine 14 Ocak 2009'da Mars Reconnaissance Orbiter'ın HiRISE kamerası tarafından fotoğraflanan, 6 m genişliğinde, 1,33 m derinliğindeki yeni bir kraterdir (Kaynak: NASA).

İlginç bir şekilde, Phoenix iniş aracının bacak kısımlarında gözlemlenen olası tuz çözeltisi damlacıklarının, Mars'ta topraktaki perkloratlardan ve sülfatlardan oluşan tuzlu suların varlığının kanıtı olabilceği öne sürülmüştür (Şekil 17.13).

Günümüzde Mars'ta, derin yeraltı (litostatik) basınçlarıyla birlikte radyoaktif minerallerden kaynaklanan ısınmanın, donma noktasının üzerinde sıvı suyun bulunmasına olanak vereceği derinliklerde yeraltı suyu bulunabilir. Çarpma olayları da günümüzün permafrostunun eriyip bozularak yeraltı ile yüzey arasında bir bağlantı oluşturacağı bir başka bir mekanizmadır.

Sıvı su, günümüzde toprak taneleri üzerinde ince su filmleri şeklinde bulunuyor olabilir. Phoenix iniş sahasındaki toprakların dielektrik ölçümleri, ancak bir ila üç tabaka kalınlığındaki, çok ince tabakalar halinde sıvı suyun varlığını ortaya koymuştur. Su toprak taneciklerine sıkı bir şekilde bağlı olduğu için mikroorganizmaların bu ince tabaka halindeki suya ulaşıp onu kullanıp kullanamayacağı bilinmemektedir. Bununla birlikte, bu suyun sahip olduğu ciddi bir sınırlılık, eğer bu su (Phoenix iniş alanının ortaya koyduğu gibi) statik halde kalırsa, oluşturduğu habitatın jeokimyasal olarak tükenecek olması, temel besinler bakımından fakirleşmesi ve uzun vadede yaşamsal aktivite bakımından kötü bir ortam haline gelmesidir. (Bölüm 16).

Mars'ın daha yakın dönemli jeolojik tarihinde yüksek eğim söz konusu olduğunda ısınmanın bir sonucu olarak bol miktarda sıvı su mevcut hale gelmiş olabilir. Muhtemelen Phoenix'in iniş sahasında var olan buzlar için bu durum geçerlidir. Son 5Ma'da 50°'ye varan eğim artışları yılda 100 güne kadar 0°C'yi aşan yüzey sıcaklığı üretmiş olmalıdır.



Şekil 17.13 Bu görüntüler günümüz Mars'ında tuzlu su stabilitesi bulunduğuna destek sağlar mı? Üstte: Çok daha büyük Newton kraterinin (41.6°G, 202.3°E) içinde bulunan Palikir Krateri, Tekrarlayan Eğim Doğrusu veya RSL olarak adlandırılan binlerce ayrı akış içerir. Güney orta enlemlerde, RSL her yaz belirli yerlerde oluşur ve büyür, yaz sonunda ve sonbaharda kaybolur (buna bir örnek kırmızı bir okla gösterilmiştir). Bu görüntü, Palikir Kraterinin kuzeybatıya bakan dik yamaçlarında küçük bir parça üzerinde 2011'den 2013'e kadar RSL'nin bir karşılaştırmasını göstermektedir. Yeni görüntü, RSL'nin bir önceki yıla göre biraz daha kapsamlı ve daha uzun olduğunu gösteriyor (Kaynak: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona). Aşağıda: Phoenix iniş aracının bacaklarında birçok gün içinde konum değiştiren varsayılan tuzlu su damlaları (LMST, Yerel Ortalama Güneş Zamanı; Kaynak: NASA).

17.5.2 Mars'ta Yaşam İçin Temel Elementler

Yaşam, makromoleküller oluşturmak için altı temel elemente ihtiyaç duyar (C, H, N, O, P, S; Bölüm 3). Bunların Mars'a nereden gelebileceğine bakalım. Karbon atomları atmosferik değişimlerin bir sonucu olarak (günümüzdeki atmosferde %95.32 oranında CO_2 vardır ve 800 ppm CO içerir) Mars'ın yüzeyinde ve yeraltında var olmuştur, olmaya da devam etmektedir ve yaşamın oluşum sürecinde bu karbon ototrofi yoluyla kullanılabilir. Karbonatların varlığının tespiti, bu

kayalarla su etkileşiminin, Mars tarihi boyunca bikarbonat iyonları halindeki ototrofik olarak mevcut inorganik karbon kaynağı oluşturabileceğini düşündürmektedir. Heterotroflar için potansiyel bir karbon kaynağı olan Mars'taki organik karbon konsantrasyonunun, Mars'ın farklı bölgelerinde ve derinliklerinde ne kadar olduğu bilinmemektedir. Karbonlu kondritlerin ve diğer organik karbon içeren materyallerin buraya düşmüş olabileceği düşünülmektedir fakat organik materyallerin yüzeye yakın ortamlarda reaktif oksijen türleri, ultraviyole radyasyon ve iyonlaştırıcı radyasyon tarafından yok edilmesi olasıdır. Bu faktörler, karbonun Mars'ta farklı bölge ve derinliklerde korunmasını ve ne oranda bulunacağını büyük ölçüde etkilemektedir.

Hidrojen atomları, yeraltında Mars'ın derinlikleri boyunca hidrojen üretmek üzere radyolitik olarak (radyoaktivite ile) bölünebilen sudan elde edilebilir. Hidrojen kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla da üretilebilir. Çarpmanın oluşturduğu kraterlerde serpentin varlığı, özellikle Noachian'da su akışının daha yoğun olduğu zamanlarda, serpentinleşme reaksiyonları yoluyla hidrojen üretiminin gerçekleşme olasılığı düşündürmektedir (reaksiyon dizisi Bölüm 12'de gösterilmiştir).

Mars'ın günümüzdeki atmosferinde azot gazı %2,7 oranında bulunur. Tutuklanmış azotlu bileşiklerin Mars meteorlarında var olduğu bildirilmiş ve Mars yüzeyinde bulundukları da doğrulanmıştır. Karasal analoglara dayalı olarak nitrat ve amonyum içerdikleri tahmin edilmektedir. Biyolojik sistemlerde kullanılabilmesi için azotun sabit formda olması gerekir. Buna ilişkin potansiyel bir yolak, 5 mb'lik bir nitrojen kısmi basıncı varlığında (pN_2) mümkün olduğu gösterilen, ancak 1 mb'nin altında mümkün olmayan biyolojik fiksasyondur (Bölüm 5). Bu durum da bu yolağın Mars'ın daha yoğun içerikteki erken dönemli atmosferinde mümkün olduğunu ancak günümüzde bunun mümkün olmadığını düşündürür. Azot fiksasyonu tümü azot molekülünü parçalamak için yeterli enerjiyi sağlayabilen ve azot molekülünün nitrat iyonları gibi sabit nitrojen formları oluşturmak üzere oksijen atomlarıyla yeniden birleşmesine neden olabilen, çarpma olayları, yıldırım ve volkanik aktivite gibi abiyotik süreçlerle meydana gelebilir. (NO_3^{2-}). Mars tarihi boyunca bu tür süreçlerde sabitlenen azotun ulaştığı konsantrasyon ve bunun mümkün olduğu derinlik bilinmemektedir. Özellikle Noachian'da Mars'ta yaygın yüzey hidrolojik aktivitesinin sona ermesinin ardından, Mars'ın derin yeraltı yüzeyine sürekli bir tutuklanmış azot akışı olmadığından, azot yaşamı sınırlayan faktörlerden biri olabilir ve böyle olmuş olmalıdır. Göktaşlarında ve doğrudan Mars yüzeyinde tutuklanmış azot varlığı saptanmasına rağmen, Mars kabuğundaki tutuklanmış azotun dağılımını ve biçimini, geçmişte ve günümüzde belirleyebilmek, Mars'ta yaşanabilirliğin kısıtlılığını anlamanın önündeki en önemli zorluklardan biri olmaya devam ediyor.

Oksijen atomları CO_2, H_2O, sülfatlar, perkloratlar, demir oksitler ve reaktif oksijen türleri tarafından sağlanabilir. Oksijen atomları, diğer elementlerle

(C, H, N, P, S) birlikte burada tartışılan biyolojik olarak erişilebilir bileşiklerin çoğuna bağlanır.

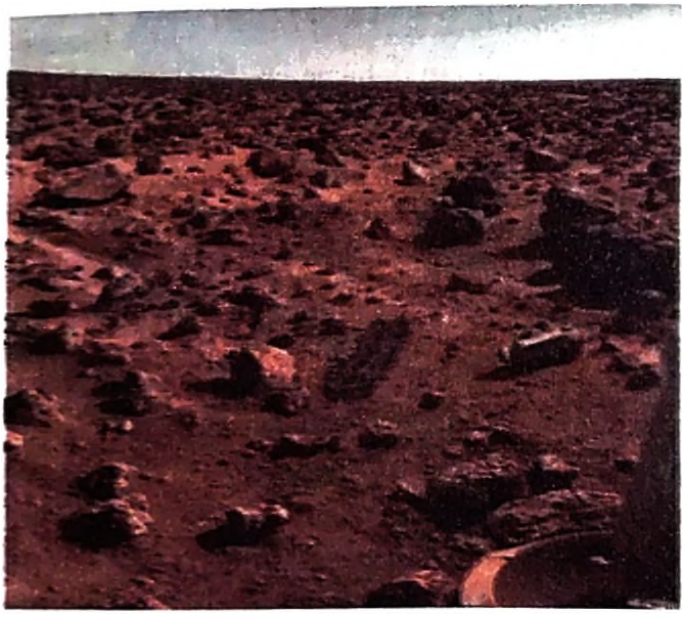
Meteorlarda ve bir dizi Mars görevinde Mars yüzeyinde fosfat bulunduğu bildirilmiştir. Örneğin, Mars Keşif Gezginleri, ağırlıkça %0,1 ile %2,4 arasında **apatit** (bir grup fosfat minerali) içeren kayalar bulmuştur. Spirit gezgini tarafından Gusev kraterinde %5'in üzerinde fosfor bolluğuna sahip bazı kayaların bulunduğu gözlemlenmiştir. Curiosity Gezgini, Gale Crater'de incelenen alkali bazaltlarda ağırlıkça <%1 bollukta fosfor bulundu gözlemini yapmıştır.

Kükürt, Mars meteorlarında ve Mars yüzeyinde alçıtaşı, demir sülfatlar, jarositleri içeren sülfat tuzları şeklinde ve sülfitler de dâhil olmak üzere farklı oksidasyon durumlarındaki diğer kükürtlü türler biçiminde tespit edilmiştir. Yeraltındaki bu bileşiklerin kapsamı bilinmemektedir, ancak Mars'taki kükürt döngüsünün baskınlığı, kükürt türlerinin Mars tarihi boyunca mantodan yüzeye dek dağılmış olacağına işaret etmektedir. Bu, H_2S ve SO_2 gibi mikrobiyal olarak erişilebilir gaz fazlarındaki kükürtü de içerebilir.

Özetle, Mars'ta farklı bölge ve derinliklerde sabit formlarının konsantrasyonunu şu anda bilmediğimiz azot dışında, yaşam için gerekli tüm ana elementlerin kolayca gözlemlenebilir kaynaklarının bulunduğunu görebiliriz.

17.5.3 Mars'ta Yaşam Bakımından İz Elementler

Mars'ta yaygın ultramafik ve mafik kayaçların varlığı ve bunların farklı ürünleri, tıpkı Dünyadaki magmatik kayaçlar ve bunların farklı ürünleri gibi, yaşamın bulunması için gereken bir dizi temel ve iz elementin mevcut olduğunu göstermektedir. Demir, olivinlerde ferröz halinde ve killerden demir oksitlere (kristal ve amorf) kadar çeşitli materyallerde ve hem yörüngeden hem de yüzeyden ölçülen sülfatlarda ferrik halinde bol miktarda bulunur. Mg ve Ca, killer ve piroksenler gibi materyallerde, K ve Na ise muskovit, illit, plajiyoklazlar ve K-feldispat gibi materyallerinde bulunur. Bekleneceği gibi magmatik kayaçlarda Mn, Cr, Ni, Zn gibi diğer biyolojik eser elementlerin de varlığı gözlenmiştir. Dünyada biyota tarafından kullanılan ve mag-



Şekil 17.14 Mars'taki kayalar, yaşam için gerekli olan eser elementlerin çoğuna sahiptir. Bu, sağ altta bir iniş ayağının bulunduğu ve yüzeydeki aletlerinden birine ait koruyucu bir kutunun görüldüğü Viking 2 iniş alanından eski bir görüntüdür. İniş pisti çapı yaklaşık 30 cm'dir (Kaynak: NASA).

matik kayaçlardan ya da onların Mars kayalarında hiç bulunmayan farklı ürünlerden elde edilebilecek ana veya iz element yoktur (Şekil 17.14).

Bu unsurların belirli formları için bir derinliğe ve uzama bağımlılık olması muhtemeldir. Noachian bölgesinin derinlerinde, kapalı sulu sistemlerde, su Ca, Mg ve Fe bakımından büyük ölçüde zenginleştirilmiş olabilir. Yüzeye yakın çevrelerde, hem günümüzde hem de geçmişte, bu elementlerin çoğu tuzlu sular, oksitler, sülfatlar ve çeşitli mineraller halinde bölünmüş olmalıdır ve bu da mikroskobik ölçekteki herhangi bir yerde biyolojik olarak gerekli element gruplarının bir arada bulunduğunu düşündürebilir.

17.5.4 Mars'ta Yaşam Açısından Enerji ve Redoks Çiftleri

Bu bölümü okumadan önce Bölüm 5'i gözden geçirmek isteyebilirsiniz.

Mars için pek çok mikrobiyal enerji kaynağı gözden geçirilebilir (Tablo 17.1). Yüzey suyu mevcut olsaydı, fotosentez makul bir metabolizma modu olurdu. Biyolojik olarak etkili ultraviyole (UV) ışınımların bugün Dünyadakinden daha tehlikeli olmadığı ancak fotosentetik olarak aktif radyasyonun (PAR) ferröz demir veya indirgenmiş kükürt türlerinin kullanıldığı oksijensiz fotosentezdeki gibi fototrofi için yeterli olduğu milimetre ölçeğindeki derinlikler söz konusudur. Bugün yüzeyde sıvı su bulunmaması, verimli bir yüzey fotosentetik biyosferini engellemektedir. Dünyanın yeraltındaki yaşam özelliğine baktığımızda derinlerde fotosentez ortadan kalkar.

Odak: Astrobiyologlar. Ralf Moeller

Hangi konuda çalışıyorsunuz?



Bakteri sporlarının karasal ve Dünya dışı aşırı koşullara karşı hayatta kalma ve dayanıklılığını inceliyorum. Sporların direncinde rol oynayan moleküler mekanizmaları araştırmaya odaklandım. Araştırmam için farklı *Bacillus subtilis* suşlarının sporlarını simüle edilmiş uzay ve gezegen koşulları (örneğin Mars) bakımından test ediyorum.

Nerede çalışıyorsunuz?

Almanya'nın Köln şehrinde (Köln), Alman Havacılık ve Uzay Merkezi, Havacılık ve Uzay Tıbbı Enstitüsü, Radyasyon Biyolojisi, Astrobiyoloji Araştırma Grubunda çalışıyorum. Almanya Braunschweig Teknik Üniversitesinde Mikrobiyoloji, Biyoteknoloji ve Genetik odaklı Biyoloji eğitimi aldım. Doktora derecemi 2007 yılında Mikrobiyoloji alanında aldım. NASA'nın Kennedy Uzay Merkezi'nde (ABD), Chiba'daki Ulusal Radyolojik Bilimler Enstitüsünde (Japonya) ve Berlin'deki (Almanya) Max Planck Enfeksiyon Biyolojisi Enstitüsünde misafir bilim insanıydım.

Lisans dönemindeki asıl alanınız neydi?

2003 yılında Almanya Braunschweig Teknik Üniversitesinden Biyoloji diploması aldım.

Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz?
Araştırmamda ele almaktan hoşlandığım bilimsel sorular şunlardır: (i) Diğer gök cisimlerinde (örneğin Mars) geçmişte veya şimdi (mikrobiyal) yaşam var oldu mu ve eğer öyleyse, bu tür bir yaşam neye benzemektedir? (ii) Dünya dışı koşullara karşı mikrobiyal dirençten sorumlu mekanizmalar nelerdir; ve (iii) (karasal) mikroorganizmalar, Dünyadaki benzemeyen koşullar altında nasıl evrimleşir?
Astrobiyoloji konusunda ilginizi çeken şey nedir?
Astrobiyolojik araştırmalara olan ilgim, farklı mikrobiyal türlerin uzay koşullarına tepkisi ve ekolojisiyle ilgilidir; insan ve robotik uzay uçuşlarıyla ilgili olarak mikrobiyal kontaminasyonun etkisi ve önlenmesi; ve Dünya dışındaki yaşamın evrimi.

Kemoototrofik redoks çiftleri alternatif bir enerji kaynağıdır. Her ikisi de Mars'ta tespit edilmiş elektron alıcıları olarak ferrik ve sülfat iyonları hidrojenle indirgenebilir (olivin, serpentin ve diğer substratların veya serpentinleşme gibi hidrojen gelişen mineral ayrışma ürünlerinin varlığından ileri gelir). Dünyadaki hidrojen, sülfat ve ferrik demirle birlikte mikrobiyal redoks reaksiyonlarına yönelik olarak yeraltında elektron donörü olarak iş görebilir.

Olivinler gibi ferröz (Fe2+) içeren minerallerin büyük kaynakları kemoototrofik demir oksidasyonunu gerçekleştirebilir. Bununla birlikte, Mars muhtemelen uygun elektron alıcılarından yoksundur. Atmosferdeki oksijen (% 0.14) bugün aerobik demir oksidasyonu için yetersiz konsantrasyonlardadır, ancak Mars'ta erken dönemdeki okside koşullarda abiyotik yollarla ortaya çıkan lokalize oksijen de göz ardı edilemez. Nitrata bağlı anaerobik ferröz demirin oksidasyonu, Mars yüzeyinde nitratın var olduğu bilindiği için, mümkün olabilir. Ancak nitratların derinliği ve yüzey dağılımı bilinmemektedir. Demir oksidasyonunda perkloratların elektron alıcısı olarak kullanılabilmesine rağmen, bugüne kadar bu çiftin büyüme için enerjiyi koruduğu gösterilmemiştir.

Mars'taki göktaşlarında ve Mars'ın yüzeyinde bulunan sülfür gibi indirgenmiş kükürt türlerinin varlığı, kükürt türlerinin oksidasyon olasılığını düşündürür. Bununla birlikte, anaerobik koşullar, oksijeni terminal elektron alıcısı olarak kullanarak kemoototrofik kükürt türlerinin oksidasyonunu önler. Sülfür, elektron alıcısı olarak ferrik demir kullanılarak oksitlenebilir. Bu reaksiyon asidik koşullarda meydana gelir ve kükürt, Mars'ta tereddütle de olsa tanımlanmıştır (kükürt bileşiklerinin yaygın varlığı göz önüne alındığında, volkanik aktivite nedeniyle var olması beklenir).

Diğer kemoototrofik redoks çiftleri, elektron alıcısı olarak atmosferden veya çözünmüş karbonatlardan gelen CO_2'yi ve Dünyanın yüzeyinde gözlemlendiği gibi elektron verici olarak serpantinleşme reaksiyonlarından H_2'yi kullanan metanojenez ve asetojenez olabilir. Metanın kendisi bir enerji kaynağı olarak mikroorganizmalar tarafından oksitlenebilir ve abiyotik olarak üretilebilir. Serpentinleşmiş ultra-mafik kayaların, Dünyanın yeraltında gelişen mikrobiyal topluluklara ev sahipliği yaptığı bilinmektedir ve bu, Mars yeraltı yüzeyi için potansiyel su-kaya-mikrobik etkileşimlerine analojiler sağlayabilir.

Günümüzde Mars'ın yeraltında yaşamının var olup olmadığı açık bir soru olmaya devam ediyor. Milyarda 7,2 parçaya (hacim olarak) varan geçici metan varlığı, Mars'ın yeraltında yaşam bulunma olasılığı hakkında devam eden tartışmaları körükledi. Başka bazı gözlemlerin derinlerde bir biyosfer varlığına işaret etmediği iddia edilebilir. Karbon monoksit'in anaerobik oksidasyonunda (karboksidotrofi) atmosferdeki bir elektron donörü olarak kullanılabilen CO'nun varlığının, önemli bir biyolojik soğurucunun bulunmadığına işaret ettiği öne sürülmüştür. Mars kaynakları ve CH_4 ve CO soğurucuları tam olarak anlaşılmasa da, veriler Mars'ta günümüzün aktif kemoototrofik biyosferi hakkındaki tartışmalar için büyük bir yelpaze sunmaktadır.

Kemoheterotrofi, geçmişt de ve günümüzde de çoğalmaya yönelilk enerji sağlayabilir. Demir ve sülfat indirgemesi organik elektron donörleriyle gerçekleştirilebilir.

Mikroorganizmalar tarafından çoğalma sırasında enerjiyi korumak için kullanılabilecek arsenit oksidasyonu, uranyum indirgeme ve birçok alternatif anyon veya katyon içeren çok çeşitli başka, daha olağandışı, redoks çiftleri vardır. Mars'ta jeokimyasal olarak daha heterojen bölgelerin incelenmesi ve çeşitli anyon ve katyonların bölgesel dağılımlarının daha fazla araştırılması, alternatif redoks çiftlerinin değerlendirilmesine olanak sağlayacaktır.

Mars'ta yaşama yönelik teorik olarak mevcut enerjiye erişilebilirlik, sıvı suyun varlığına tabi olacaktır. Geç Noachian'da yüzeydeki suyun çoğu kaybolduğu için, teorik bir metabolizma olarak fotosentez de ortadan kaldırılmış olmalıdır. Yüzeyin ve yüzeye yakın ortamın daha büyük bir kısmı kuruyup donduğundan, meteoritik materyalden gelen yüzeye yakın yerlerdeki eksojen organik bileşikler bir enerji kaynağı olarak kullanılamaz. Sonuç olarak, teorik enerji kaynakları öncelikle kemoototrofik derin yeraltı redoks çiftleri ve organik materyalin ölü organizmalardan (nekrokütle) sağlanabileceği kemoheterotrofiyle sınırlandırılmış olmalıdır.

Potansiyel olarak çok çeşitli enerji kaynakları bulunsa da, geçmişte ve günümüzde, Mars'taki enerji mevcudiyetinin güncel bir değerlendirmesi yalnızca yarı reaksiyonların kesin olarak saptanmasına dayanmaktadır (Tablo 17.1) ve bu da, neredeyse tüm mikrobiyal metabolizmanın, tam bir redoks çiftinden yoksun olduğunu göstermektedir. Bu da, geçmişte ve günümüzde, Mars'ta bulunan pek çok ortamda enerjinin son derece enerji sınırlı olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Mevcut elektron vericilerinin tespit edildiği redoks reaksiyonları, kesin olarak tespit edilen ya da bol miktarda bulunan elektron alıcılarından yoksun olma eğilimindedir. Doğrulanmış elektron alıcılarına sahip olanlarsa bol miktarda elektron vericisinden yoksundur. Enerjinin aşırı ölçüde sınırlı olduğuna dair varılan sonuç, ancak yakın bir zamandır ve eskiden beri bulunan arazilerde çok çeşitli elektron vericilerinin ve alıcılarının doğrudan tespitiyle, bunların konsantrasyonlarının ve biyolojik olarak erişilebilirliklerinin belirlenmesiyle ortadan kaldırılabilir.

Tablo 17.1 *Geçmiş ve günümüz Mars'ında yaşam için potansiyel redoks çiftlerinin örnekleri. Reaksiyonlar, anoksik redoks çiftlerinden seçilmiştir. O_2'nin geçmiş veya günümüz Mars'ında hidrojen oksidasyonu gibi mikroaerofilik reaksiyonlar için elektron alıcısı olarak kullanımı açık bir şekilde olanaksız görülmemektedir. Tablo, Mars'ın kabuğundaki tutuklanmış azot durumu bilinmediğinden, azotun farklı oksidasyon durumlarını (örneğin, nitrit ile anaerobik amonyum oksidasyonu) kullanan birçok redoks reaksiyonunu içermemektedir. Demirin oksidasyonunu ve indirgenmesini içeren redoks çiftlerinin, Mars kabuğunda değişen oksidasyon durumlarında mevcut olabilecek diğer değişken değerlik katyonlarıyla (örneğin Mn, U) gerçekleştirilebileceğini unutmayınız.*

Elektron vericisi	Elektron alıcısı	İsim	Yorum
Fotosentez			
Fe^{2+}		Fotoferrotofi	Clement yüzey koşullarına bağlıdır. Noachian'dan beri pek olası değil.
S/S^{2-}		Oksijensiz kükürt fotosentezi	Clement yüzey koşullarına bağlıdır. Noachian'dan beri pek olası değil. Curiosity verilerinde sülfür denmişken Gusev kraterinde kükürt çıkarımı yapıdı.
Organk bileşenler		Fotoheterotrofi	Organik karbonun farklı bölgelerde ve farklı derinliklerde dağılımı bilinmemektedir.
H_2O		Oksijenik fotosentez	Mars'ın erken dönemi için yadsınamaz ancak günümüz Mars'ında bu reaksiyon için atmosferik kanıt yoktur.
Kemoototrofi			
Fe^{2+}	NO_3^{2-}	Anaerobik demir oksidasyonu	NO_3^{2-}'nin Mars'taki dağılımı bilinmiyor, ancak tutuklanmış azot varlığı çıkarımı yapılıyor.
Fe^{2+}	Perkloratlar	Anaerobik demir oksidasyonu	Perklorat, demiri oksitlemek için kullanılabilir, ancak organizmalarda büyüme için kullanıldığı gösterilmemiştir. Redoks çiftleri içeren perkloratları araştırma ihtiyacını vurgulamak için dâhil edilmiştir.
H_2	CO_2	Metanogenez, asetogenez	Olivin ve serpentin üzerinden var olduğu çıkarımı yapılan hidrojen - H_2 gelişen su-kaya reaksiyonları için substratlar ve ürünler.
H_2	Fe^{3+}	Demir indirgenmesi	Yukarıda hidrojen için geçerli olduğu gibi.
H_2	SO_4^{2-}	Sülfat indirgenmesi	Yukarıda hidrojen için geçerli olduğu gibi.
H_2	Oksitlenmiş azot türleri		Oksitlenmiş nitrojen türlerinin Mars'taki dağılımı bilinmiyor.
S	NO_3^{2-}	Sülfür oksitlenmesi	Gusev kraterinde sülfür bulunduğu ileri sürülmüştür
S	Fe^{3+}	Anaerobik sülfür oksitlenmesi	Asidik koşullarda gerçekleşir
CO	NO_32-	Anaerobik karboksitrofi	Atmosferdeki karbonmonoksit
Kemoheterotrofi			
Organik maddeler	Fe^{3+}	Demir indirgenmesi	Organik karbonun farklı bölgelerde ve farklı derinliklerdeki dağılımı bilinmemektedir.
Organics/CH_4	SO_4^{2-}	Sülfat indirgenmesi	Yukarıda organik maddeler için geçerli olduğu gibi. Metan sülfat indirgeyen organizmalarla sintropide oksitlenebilir.
Organics/CH_4	NO_3^{2-}	Nitrat indirgenmesi	Yukarıda organik maddeler için geçerli olduğu gibi. Metan, nitrat indirgemesinde işlev gören genlere sahip (Dünyada bilinen) organizmalar tarafından oksitlenebilir.
Organik maddeler	Perkloratlar	Perklorat indirgenmesi	Yukarıda organik maddeler için geçerli olduğu gibi.
Fermentasyon (*oransızlaşma*)			
Organik	Organik	Fermentasyon	Yukarıda organik maddeler için geçerli olduğu gibi.

17.5.5 Yaşamın Fiziksel Sınırları: Radyasyon

Mars, atmosferde 200 nm'nin üzerindeki ultraviyole (UV) radyasyonu emebilen ozon veya gaz formundaki diğer emicilerden yoksundur. Dünyanın erken dönemi gibi gibi (Bölüm 10), Mars'ın yüzeyi bu nedenle 200 nm'ye kadar UV radyasyonuna maruz kalır (CO_2, 200 nm'nin altındaki radyasyonun çoğunu emer). Bununla birlikte, UV radyasyonu yeraltında hızla zayıflatılır, bu nedenle yüzey akışı Dünya yüzeyindekinden yaklaşık üç kat daha fazla biyolojik olarak etkili DNA hasarına neden olsa da, sadece birkaç on mikron ila milimetre düzeyindeki derinliklerde, toprak partikül boyutuna bağlı olarak, UV radyasyonu azalır. Bugün, Mars'ın yüzeyi kuruma nedeniyle yaşanmaz haldedir. Öte yandan, yaşam için gereken diğer koşullar karşılansaydı sadece UV radyasyonu yaşamın mümkün kılmayacak koşullara sebep olmaz.

Güneş enerjili parçacıkların (solar energetic particles, SEP) ve galaktik kozmik ışınların (galactic cosmic rays, GCR) iyonlaştırıcı radyasyonları daha fazla nüfuz edici özelliğe sahiptir. Mars yüzeyindeki toplam iyonlaştırıcı radyasyon dozu 76mGray (mGy) $yıl^{-1}$ olarak ölçülmüştür ve bu da 5 kGy'yi aşan dozlara kayda değer canlılık kaybı olmaksuzın dayanabilen *Deinococcus radiodurans* gibi radyasyona dirençli organizmalar tarafından tolere edilebilen değerden çok daha düşüktür (Bölüm 7). Bununla birlikte, aktif olamamak hasar birikimine yol açar, öyle ki Mars kabuğunun 2 m derinliğinde, 450.000 yıl geçtikten sonra bir *D. radiodurans* popülasyonunun canlılığında yaklaşık altı kat kadar daha fazla bir azalma söz konusu olacaktır. Mars'ta sadece birkaç metre derinlikte, özellikle aktif olan ve sıvı suyun bulunduğu bir ortamda hasarı onarabilen yeraltı biyotası söz konusu olduğunda radyasyon, yeraltını yaşanmaz hale getirmeyecektir.

17.5.6 Yaşamın Fiziksel Sınırları: pH

Mars'taki çeşitli çevrelerdeki pH aralıkları yaşamla uyumlu sınırlar içindedir. Phoenix'in iniş sahasında Mars'ın sığ derinliklerinin pH'ı ölçülmüştür. Buralar pH 7,7-7,9 olarak hafif alkali özelliktedir, ve karbonatla tamponlanmıştır. Curiosity verilerine göre Yellowknife Körfezi, Gale Kraterindeki pH'ın da nötr olduğu anlaşılmıştır. Bu pH aralığı organizmalar açısından uygundur. Geçmişte veya günümüzde yeraltının derinliklerinin pH'sını doğrudan ölçmemiş olsak da, sıvıların mafik ve ultramafik kayalarla reaksiyonları, çözeltilerin kimyasal durumunu kontrol eder. Dünyada olduğu gibi orada da sıvıların anoksik ve alkalin veya ultra-bazik (pH> 10) olması beklenir.

Mars'ın geçmiş tarihinde pek çok ortam nötr ve alkalin özellikte olsa da, Mars'ın yüzeyindeki bazı sülfat minerallerinin varlığı yerel olarak asidik koşullara işaret etmektedir. Sülfatlar, Hesperian katmanlı sülfatlar, kutupsal tortular, kraterlerdeki tortular, tüm gezegende bulunan Mars tozu (%5-10 sülfat içerebilir) ve kayaların içindeki sülfat damarları halinde bulunur. Bu sülfat-

ların çoğu, asidik koşullarla ilişkili olmayan jips ($CaSO_4$) biçiminde olmasına rağmen, jarosit ve demir sülfatların varlığı asidik çevrelerin mevcudiyetini düşündürür. Bu mineraller, Hesperian'da, Mars'ın volkanik aktivitesi sonucu SO_2 çıkışının asidik koşullar üreteceği, daha sonra Mars bazaltlarını bozarak düşük su-kayaç oranlı etkileşimlerde ikincil sülfat mineralleri üretecek bir asidik aşınma dönemi varlığına (pH 2-5) işaret eder. Bu sülfat tuzları ayrıca, Mars'ın yüzey ve yeraltı jeokimyasal döngülerinin, karbon döngüsünün genel olarak hâkim olduğu Dünyaya kıyasla, kükürt döngüsünden güçlü bir şekilde etkilendiğinin kanıtıdır. Dünyadaki asidik ortamlar yaşanmaz değildir ancak aktif çoğalma yeteneğine sahip organizmaların çeşitliliğini sınırlarlar. Hesperian döneminde su mevcudiyetinin kısıtlanması ve asidik koşulların varlığı, yüzeyde ve muhtemelen yeraltında daha yaygın sert ortamların var olduğunu kanıtlar. Bununla birlikte, Mars için öngörülen en düşük pH değerleri, kendi başlarına o çevreyi yaşanmaz hale getirmez. pH'daki yerel farklılıklar, yalnızca belirli organizmalar için varsayılan habitatların uygunluğunu değiştirir.

17.5.7 Yaşamın Fiziksel Sınırları: Tuzlar

Tuzlu sular, su aktivitesini ve kaotropiklik (makromoleküllerde indüklenen düzensizlik derecesi) gibi diğer parametreleri etkileyerek aktif yaşamın sınırlarını belirleyebilir. Son derece düşük düzeydeki su aktiviteleri (Bölüm 7) ve yüksek kaotropiklikler, klorürler (CaCl2) ve karışık sülfatlı sular gibi tuzlu sular tarafından üretilebilir.

Günümüz Mars'ında, konsantre tuzlu çözeltilerden mevsimsel olarak Tekrarlayan Eğim Çizgisi (RSL) oluşturulabilir. Mars'taki bazı tuzlu sularının, yaşam için gereken kadarın altında bir su aktivitesine sahip olduğu ve bu nedenle buraların yaşanabilir ortamlar olmayacağı hesaplanmıştır. Böylece, Mars'ın hidrolojik ortamı Noachian'dan Hesperian'a geçerken ve tuzlu su ortamlarında tuza doymuş çözeltiler yaygınlaştıkça, bu tuzlu çözeltilerin bazıları kimi ortamları yaşanmaz hale getirmiş olabilir.

17.5.8 Mars'taki Mikroplar için Yaşam Alanı

Sahip olduğu daha düşük kütleçekim (Dünyanın kütleçekiminin 0,38'i) nedeniyle Mars'ın yeraltı yüzeyinin gözenekliliği, karşılaştırılabilir derinliklerde ve litolojilerde Dünyadan daha fazla olabilir. Dünyada olduğu gibi, herhangi bir yerdeki gözeneklilik, ikincil mineral dolgusu, tortu birikimi, yerel kaya basıncı ortamları ve diğer jeolojik süreçler gibi faktörler tarafından kontrol edilecektir, ancak temelde Mars'ın yeraltı ortamının yaşam için erişilebilir olmaması için hiçbir neden yoktur. Yeraltı ortamlarının geçirgenliği, ortamların birbiriyle ilişkili olma durumunu etkileyecektir.

Mars'ın derin yeraltı yüzeyinin sıcaklık ve basınç profillerini doğrudan ölçümüş değiliz. Dünyaya gelince, jeotermal gradyan tarafından belirlenen sı-

caklık, yaşam için üst sıcaklık sınırını aştığında, derinlerde yaşanabilirliğin kısıtlanması muhtemeldir. ~10 ve ~20 °C km^{-1} arasındaki jeotermal gradyanlar, ~6–15 km derinlik mertebesinde daha düşük yaşanabilir sıcaklık derinliği anlamına gelir.

17.6 Mars'ta Yaşanabilirlik Senaryoları

Organizmaların faaliyetlerini destekleyecek mevcut koşulları etkilemiş çevresel şartların bu önceki senteziyle desteklenen, Mars'ın yaşanabilirlik senaryolarının bu verilerle tutarlı olduğunu düşünmek mümkündür (Şekil 17.15).

Mars'ın tüm yaşanabilirlik senaryoları, Mars'ın oluşumuyla başlar. İlk gezegenimsilerden, Dünyaya çok benzeyen ama yaşanabilir özellikte olmayan bir gezegen oluşmuştu (Bölüm 8). Su yoğunlaştıkça ve çevre soğudukça, gezegen biyolojik koşulların uzun vadeli senaryosunda bir dallanma noktası olmuştu. Bir dizi senaryoda gezegen durumu gereğince ıssız olarak tanımlanır (ne bir yaşam kaynağı oluşur ne de Dünyadan gezegene meteoritik madde aracılığıyla yaşam transferi olmaz). İkinci senaryo dizisinde, gezegen, yaşanabilir koşulların kullanımını değiştiren bir olay olan ve geri bildirim etkileri yoluyla yaşanabilir çevreyi değiştirecek olan yaşamın kurulmasıyla tanımlanır.

17.6.1 Yaşamın Bulunmadığı Bir Mars'a Yönelik Senaryolar

Prebiyotik kimyasalları kendi kendini kopyalayan yaşam formlarına dönüştürmek için gereken koşullar tam olarak bilinmemektedir. Yaşamın başlangıcının meydana gelmiş olabileceği çeşitli ortamları ve koşulları (Bölüm 10 ve 11) ve bunların Mars'ın ilk döneminde ne kadar yaygın olabileceğini düşünmek mümkündür. Bununla birlikte, şu anda yaşamın Mars'ta ortaya çıkma olasılığını ölçmek mümkün değildir ve ortaya çıkıp çıkmadığını bilmiyoruz.

Birlikte ele alındığında bu faktörler, tarihi boyunca gezegen için ıssızlığın makul bir koşul olarak kaldığı ve yaşanabilirlik senaryolarının sistematik olarak belirlenmesinde erken bir dallanma noktası olarak ele alınması gerektiği anlamına gelir.

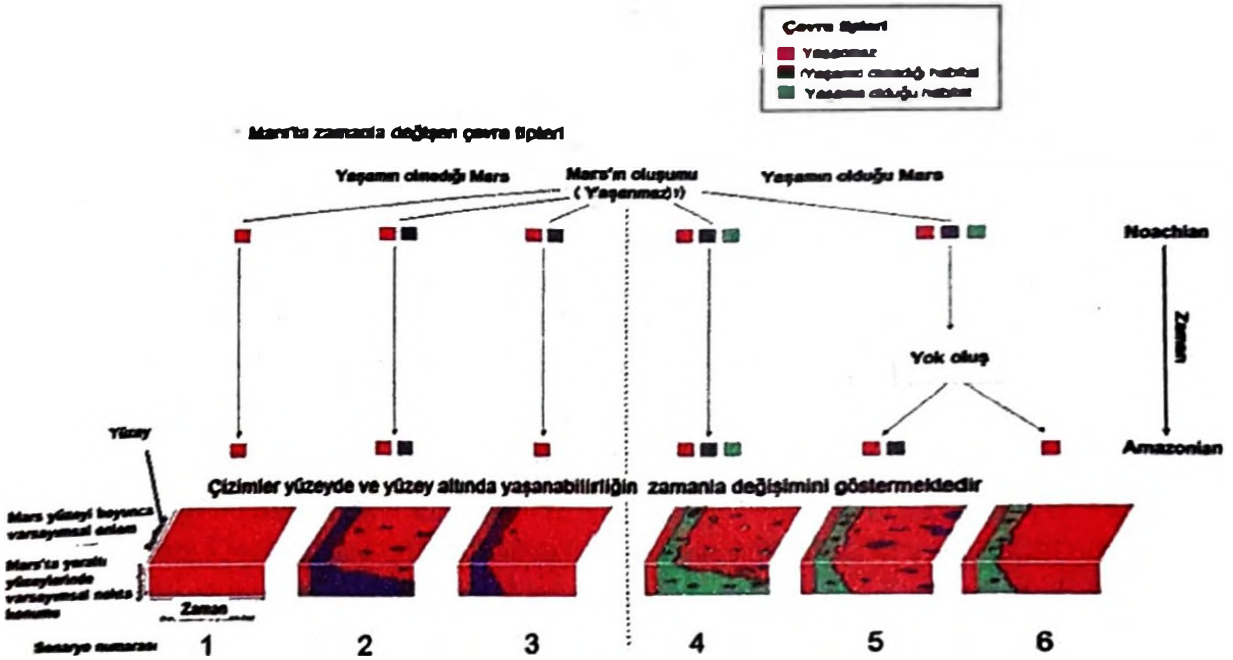
Mars için olası üç yaşanabilirlik senaryosu vardır. Senaryo 1'de (Şekil 17.15), Mars her zaman yaşanmaz niteliktedir. Yaşam için gerekli tüm şartlar sağlansa bile, mikroorganizmalar ölçeğinde (mikrondan mikron altı ölçeklere) bunların hepsi tek bir yerde hiçbir zaman bir araya gelmediğinde ortamlar yaşanmaz nitelikte olacaktır. Su akışının birçok elementi ve besin maddesini çözmesi ve yaşam için gerekli elementler de dâhil olmak üzere küçük uzamsal ölçeklerde çeşitli kimyasal türlerin bir arada var olduğu ortamlar oluşturması beklenebileceğinden, bu senaryo, Mars'ın erken dönemleri için günümüze kıyasla daha az makul görünmektedir. Hesperian döneminde koşullar bozulduğunda ve süreklilik arz eden hidrolojik süreçler sonlandığında, örneğin sıvı su eksikliği, aşırı tuzlu sularda düşük su aktivitesi ve asitlik gibi yaşanamayacak ortamlara

yol açan daha fazla sayıda koşul ortaya çıkmış ve daha fazla sayıda çevrede, özellikle yüzeyde, birlikte bulunmuş olabilir. Bunlar kombinasyon halinde, birçok ortamın yaşanmaz halde kalmasına neden olabilir.

Mars, yaşam için temel gereksinimlerin yeterli konsantrasyonlarından sürekli olarak yoksun kalmış olabilir. Mars meteoritlerinde ve Mars yüzeyinde tutulmuş azot varlığı saptanmıştır. Ancak bu türler büyük ölçeklerde yeterli konsantrasyonlarda üretilmemiş veya yaşam için diğer gereksinimlerle birlikte mikron ölçeklerinde bulunmamışsa, bu faktör yaşam bakımından sınırlayıcı etkide bulunmuş olabilir.

Bununla birlikte, Curiosity tarafından yapılan araştırmalar, tüm bir gezegenin yaşanmaz koşullara sahip olduğuna işaret etmemektedir. Aslında gezici ekip, 2014'ün başlarında, Hesperian'ın erken dönemlerinde Yellowknife Körfezi'ndeki Gale Kraterinde, yaşamı destekleyebilecek temel elementlerin ve bu elementlerin çeşitli redoks durumlarının bulunduğu, sulu bir ortamın varlığını ileri süren bir makale yayımladı. Bu sonuç doğruysa, bu senaryoyu ciddiye almak mümkün olabilir.

Issız bir Mars'a yönelik diğer bir senaryo, gezegen tarihi boyunca burada yaşam olmamasına rağmen gezegende yaşanabilir koşulların bulunduğu senaryodur (Senaryo 2, Şekil 17.15). Noachian döneminde, sıvı su daha yaygınken, yaşamın olmadığı habitatlar bol miktarda bulunmuş olabilir. Bu senaryo,

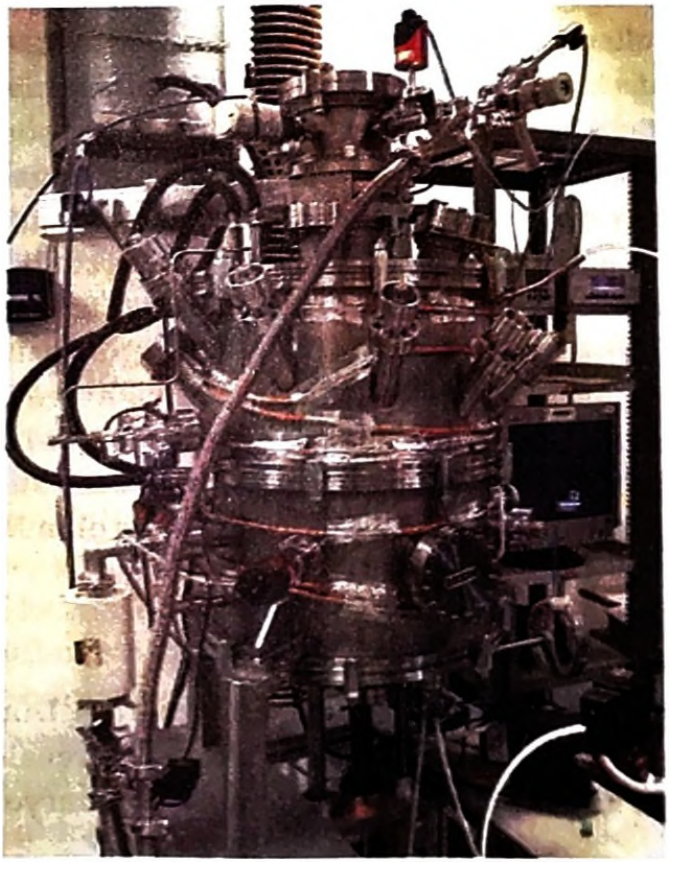


Şekil 17.15 Mars'ta yaşanabilirliğe ilişkin senaryolar. Mars'ta yaşamın olmadığı ve olduğu bir dallanma noktasından başlayarak zaman içinde yaşanabilirliğe yönelik farklı senaryolar. Diyagramın alt kısmında, senaryoları belirten şemalar gösterilmektedir. 'Yüzey' bölümü Mars'ın yüzeyini temsil eder. 'Alt yüzey noktası', Mars kabuğundan birkaç kilometrelik rastgele bir derinlik için seçilen keyfi bir konumdur. Mars'ın deneysel araştırmaları, Mars'a hangi senaryonun uygulandığının ve farklı ortamların göreceli bolluğunun belirlenmesine olanak sağlayacaktır (Kaynak: Charles Cockell).

Mars'ta eskiden var olan suyun dolaşımının, çözünmüş elementlerin ve gazların hayati önemdeki elementleri (CHNOPS) sağladığı, besinler ve enerjik özellikteki redoks çiftlerinin uygun pH koşulları ve su aktiviteleriyle mikroskobik ölçeklerde birlikte yer aldığı bazı çevreler oluşturduğunu varsayar. Hesperian döneminde yüzey koşulları bozulduğundan, artan sayıda yüzey ortamı kuruma, uzun süreli ışınlanmaya maruz kalma, asitlik, düşük su aktiviteli tuzlu suların varlığı ve diğer çevresel faktörler nedeniyle tüm ölçeklerde yaşanmaz hale geldiğinden, yaşamın olmadığı habitatlar daha sınırlı ve yerel hale gelecektir.

Tesis Odakta: Mars Simülasyon Odaları

Mars'a gitmek çok pahalıdır. Kızıl Gezegendeki koşulları araştırmaya yönelik başka bir yaklaşım, bu koşulları Dünyada yeniden yaratmak olabilir. Mars Simülasyon Odaları (Şekil 17.16), Mars'ın geçmişteki ve şimdiki koşullarını simüle etmek için kullanılabilir. Simülasyon odalarının çoğu, Mars'ın günümüzde ya da geçmişte sahip olduğu gazların içeri verildiği bir tür vakum odasıdır. Oda, basıncın istenen değere ayarlanmasını sağlayan bilgisayar kontrollü bir vakum pompasına bağlıdır (örneğin günümüzdeki Mars için ~6mb). Gaz ya önceden karıştırılır ya da Mars atmosferinde bulunan farklı bileşen gazlarının şişeleri, kütle akışı kontrolörleri kullanılarak odaya girerken karıştırılır. Mars odasında, düşük sıcaklıkların üretilmesine olanak sağlayan bir tür sirküle edilmiş soğutma ya da soğuk parmak donanımı bulunabilir. Sıvı azot soğutucu olarak kullanılabilir. Bir kuvars pencere veya fiber optik kullanmak suretiyle yüzey ışıkları



Şekil 17.16 Laboratuvarda, Mars yüzeyinin geçmişteki veya şimdiki koşullarına eşdeğer koşulları yeniden oluşturmak için kullanılan bir Mars simülasyon odası (Kaynak: İspanyol Astrobiyoloji Merkezi).

bile oluşturulabilir. Xenonarc lambaları, Mars yüzeyinde yüksek UV radyasyonu içeren Güneş benzeri bir spektrum oluşturmak için kullanılabilir. Günlük veya mevsimsel sıcaklık ve Güneş radyasyonu değişimlerini uzay araçları tarafından gözlemlenen değerlerle aynı hale getirmek için bilgisayar kullanılabilir. Bir Mars odasının tasarımı, planlanan çalışmalara bağlı olacaktır. Mars'ta organik maddelerin incelenmesi için, çok temiz, parçalarının steril edilebileceği ve organik kirlilikten arındırılabileceği bir odaya sahip olmak önemlidir. Mikrobiyoloji deneyleri söz konusu olduğunda, odanın içindeki kontaminasyon olasılığını en aza indirgemek için numuneler ya gaz geçirgen, ancak mikrop geçirmeyen, sızdırmazlığa sahip şişeler veya kaplar içine alınır ya da odanın içine giren hava kontaminasyon şansını azaltmak için filtrelenmelidir.

Günümüze kadar, bu yaşamın olmadığı habitatlar, sıvı suyun makroskopik ölçeklerde darbe kaynaklı eriğinde, mikroskobik ölçeklerde toprak taneleri içindeki su katmanlarında ve eğim değişiklikleri sırasında üretilen sıvı suda geçici olarak mevcut hale geldiği yeraltı ve yüzeye yakın ortamlarla sınırlı kalmış olabilir. Jeotermal gradyan derin akiferlerin ortaya çıkmasına olanak veriyorsa veya yaşanabilir sıvı su, seyreltik tuzlu sular gibi yüzeye yakın ortamlarda geçici olarak varlığını sürdürüyorsa, bu habitatlar var olabilirler. Bu nedenle, bu senaryo, zaman içinde yaşamın olmadığı habitatların ve yaşanmaz ortamların göreceli bolluğunun değişmesiyle karakterizedir. Senaryo, Mars üzerindeki bölgelerin tarih boyunca yaşanabilir koşullar barındırdığını varsayar.

Yine başka bir senaryo (Senaryo 3, Şekil 17.15), öncekinin daha uç bir versiyonudur. Bu senaryoda, yaşamın olmadığı habitatlar Mars'ın erken tarihi boyunca mevcuttu, ancak kötüleşen koşullar nihayetinde bu habitatların mikroskobik ölçeklerde bile tamamen yok olana kadar daralmalarına ve yerelleşmelerine neden oldu ve sonuçta günümüze kadar kalan bir durum olan tüm gezegeni yaşanmaz hale getirdi. Olası bir senaryo, yüzeyin kuruması, kriyosfer derinlemesine genişledikçe yer altının donması ve derin akiferler günümüze kadar devam etse bile, besinlerin mevcudiyetinin dönüşümün yetersiz olmasından kaynaklı olarak jeokimyasal nedenlerle azalması olabilir. Bu senaryo ayrıca, son zamanlarda geçici sıvı su oluşumunun, koşulların o yeri yaşanmaz kıldığı, örneğin tuzlu su konsantrasyonlarının ve sulu çözeltilerin su aktivitelerinin çoğalma için uygun olmadığı veya yetersiz enerji, besin ve diğer temel maddelerin mikroorganizmalar ölçeğinde bulunduğu alanlarda meydana gelmesini gerektirecektir. Bu nedenle bu senaryo, bir zamanlar yaşanabilir olan ama şimdi yaşanmaz olan Mars için iyi tanımlanmış iki aşamalı bir tarih önerir.

17.6.2 Yaşamın Bulunduğu Bir Mars'a Yönelik Senaryolar

İkinci bir senaryo dizisi, ya yerli bir yaşam kaynağı nedeniyle ya da Dünyadan Mars'a bir yaşam transferi yoluyla Mars'ta yerleşim olursa gerçekleşir. Yaşamın mevcut olduğu bir Mars için tanımlanabilecek üç makul senaryo söz konusudur.

Senaryolardan birinde (Senaryo 4, Şekil 17.15), yaşanmanın mümkün olmadığı çevreler (örn. aşırı derecede kurumuş yüzeylere sahip ortamlar), yaşamın görülmediği habitatlar (yaşanan bölgelerden geçici olarak kopmuş yeni oluşturulmuş habitatlar) ve Mars'taki var olan ve daha önce var olmuş yaşamı içeren yaşamın bulunduğu habitatların tümü mevcuttur.

Mars'ta gözlemlenen jeolojik kanıtlar, diğer senaryolarda olduğu gibi, bu üç çevresel durumun göreceli bolluğunun zaman içinde değişeceğini gösteriyor. Yüzey koşulları kötüleştikçe ve sıvı su artık bol miktarda bulunmamaya başladıkça, Noachian'dan Amazonian'a kadar yaşam alanlarının çeşitliliğinin ve genişliğinin azalması beklenebilir. Yüzey kurudukça, daha asidik olan ve buharlaşma gösteren tuzlu sular daha da fazlalaştıkça, yüzeyde yaşanamaz nitelikteki çevrelerin alanı zamanla artacaktır. Üzerinde yaşanamaz habitatların çeşitliliği ve alanı da eş zamanlı olarak değişecektir. Hidrolojik döngü kapsam olarak küçüldükçe, daha fazla habitat yalıtık hale gelecek ve yaşanabilir habitatlardan ayrılacak ve potansiyel olarak yaşanmaz habitatların sayısı artacaktır.

Başka bir senaryoya göre (Senaryo 5, Şekil 17.15), Mars'ın erken döneminde yaşam vardır ancak hidrolojik koşullar kötüleştikçe ve jeokimyasal dönüşüm daha az verimli hale geldikçe, yaşam sonunda o kadar küçük varoluş alanlarıyla sınırlandırılmıştır ki, işlevsel bakımdan yok olmuş ve sonunda tamamen ortadan kalkmıştır. Bu noktada Mars, yalnızca yaşanmaz bir çevreyi ve yaşamın olmadığı habitatları barındıran bir gezegen haline geldi. Bu tamamen ortadan kalkma olayı, örneğin eğime bağlı sıvı su oluşumundan veya çarpışmayla ortaya çıkan hidrotermal sistemlerde yeni yaşanabilir yerlerin bulunmasını engellemez ancak bağlantı eksikliği ve yeterli su akışının olmaması, bu güne kadar devam eden veya geçici olarak üretilen yaşamın olmadığı habitatları işgal edecek hiçbir yaşam kalmayana kadar, yaşamın kalan son kalıntılarından kolonileşmelerini engelledi.

Son olarak, daha uç bir senaryo (Senaryo 6, Şekil 17.15), Mars'ın erken tarihinde yaşamın varlığını öne sürüyor. Ancak buna göre koşullar kötüleştikçe yaşam ortadan kalkmıştır ve koşullar o kadar zorlayıcı hale gelmiştir ki, tüm yaşanabilir çevre ortadan kalkmıştır. Bu noktada Mars, yalnızca yaşanmaz ortamları barındıran bir gezegen haline geldi. Bu geçiş, belirli bir süre boyunca yaşamın olmadığı yalıtılmış haldeki habitatların var olduğu, yani Mars'ın yaşamın bulunduğu ve bulunmadığı habitatlara ev sahipliği yaptığı bir aşamada, koşullar o kadar aşırı hale geldi ki, yaşamın bulunmadığı habitatlar bile ortadan kalktı. Bu senaryo, Mars üzerindeki birleşik çevresel, kimyasal ve fiziksel koşulların nihayetinde farklı nitelikteki tüm çevresel durumların, bilinen tüm mikroorganizmaların aktivitelerini sürdürme yeteneklerinin olmadığı bir çerçeveye yerleştirmesini gerektirir.

Önerilebilecek başka senaryolar da mevcuttur. Örnekler, üzerinde yaşamın yok olduğu ve daha sonra yeniden başladığı (veya Dünyadan aktarıldığı) bir

Mars'ın varlığını öngörür. Yukarıda tartışılan ana senaryoların kombinasyonları mümkündür. Bununla birlikte, daha fazla yer kaplamaması bakımından, burada Mars çevresinin tarihi hakkında şu anda bildiklerimize dayanarak sadece altı ana senaryo tartışılmıştır.

Mars'ın yaşanabilirliği ve biyolojik durumu, bilim insanlarının uzun süredir ilgisini çekmektedir. Yaşanabilirliğe yönelik senaryoların daha da açıklık kazanması, gezegende yaşanabilirliği incelemek üzere yürürlüğe konan Mars görevlerinden elde edilen verilerin yorumlanmasını kolaylaştıracaktır. Yeterli araştırma ve görevlerle, Mars'ın bu senaryolardan hangilerine uygun olduğunu belirlemek ve onun bileşeni olan ortamların göreceli bolluğunu ölçmek mümkündür. Yaşanabilirlik senaryolarını belirlemeye yönelik bu yaklaşım, diğer gezegenler için de geçerli olabilir.

17.7 Viking Programı ve Yaşam Arayışı

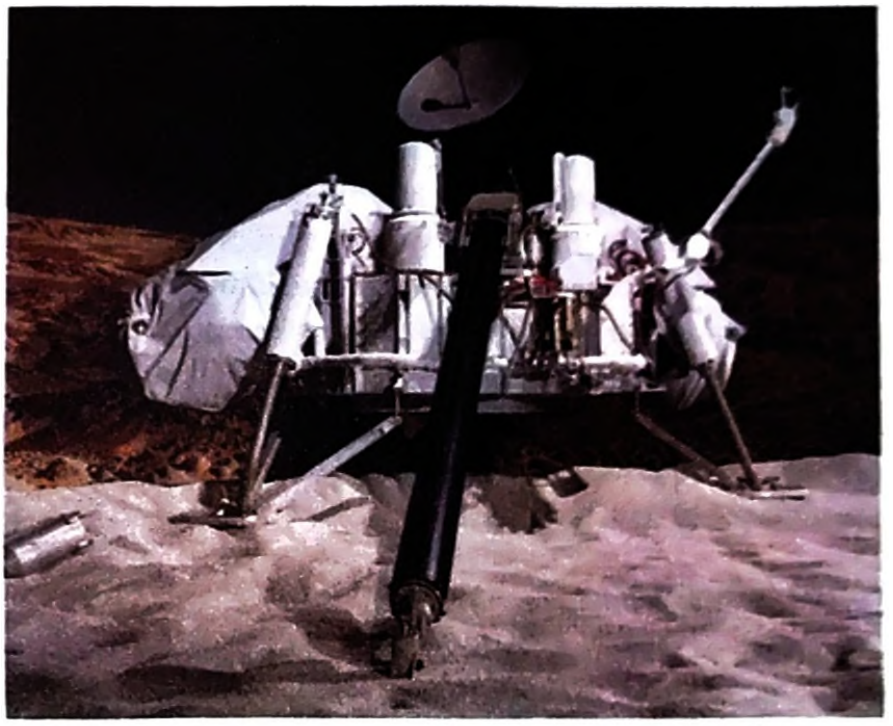
NASA Viking görevleri, Mars'ta yaşamın var olma olasılığıyla başlatıldı. 1976'da Mars'ın yüzeyine ulaşan iki iniş aracı, Viking I ve II (Şekil 17.17) ve iki yörünge aracı vardı. Viking iniş araçları, Mars atmosferinin ve yüzeydeki kayaların bileşiminin ilk yüzey ölçümleri de dâhil olmak üzere başka bilimsel hedefleri de gerçekleştirdi. Ancak asıl amaç, Mars'ta yaşam olup olmadığını belirlemekti.

Viking araçları, aktif mikrobiyal metabolizma varlığında dair kanıtlar aramak üzere dört deney yaptı. Bu deneylere bakalım. Artık oldukça eski olmalarına rağmen bu deneyler, bilimsel yöntemin diğer gezegenlerde uygulanması ve kontrolün önemi konusuna çok iyi bir örnek oluştururlar.

17.7.1 GCMS Analizi

GCMS (Gaz Kromatografi Kütle Spektrometresi) Mars toprağının bileşenlerini ve özellikle toprak farklı sıcaklıklara ısıtıldığında salınan bileşenleri analiz etmek için kullanıldı. Bu yöntem milyarda birkaç parça düzeyinde bulunan molekülleri ölçebilir. GCMS, Mars topraklarında önemli miktarda organik molekül bulunduğuna dair bir ölçüm yapmadı. Vikingler Mars toprağı örneklerini ısıttığında tanımlanan tek organik kimyasallar klorometan ve diklorometandı ve bunlar o zaman temizleme sıvılarından kaynaklanan kirleticiler olarak yorumlanmıştı.

Bu deneyin olumsuz sonuçlandığını açıklamak zordu, çünkü karbonlu kondritlerdeki organikler de dâhil olmak üzere, organik maddeler meteoritlerin düşmesi yoluyla sürekli olarak Mars'a ulaşmaktadır (Bölüm 11). İniş aracının Mars yüzeyinde perklorat tuzları bulduğu 2008 Phoenix görevine kadar bu gözleme yönelik açıklama yapılamamıştı. Yakın zaman önce yapılan bir yoruma göre ise piroliz sırasında meteorlardan gelen yerli organik maddelerle ısıtıldığında perklorat, çok düşük konsantrasyonda bulunduğu gözlemlenen klorlu bileşikler üretmiştir.



Şekil 17.17 Viking iniş araçlarından biri, Mars'ın model ortamında çalışırken kepçesini gösteriyor (Kaynak: NASA).

17.7.2 Gaz Değişimi Deneyi

Gaz Değişimi (GEX) deneyi, öncelikle Mars atmosferini bir soy gaz olan helyumla değiştirerek oraya konan bir toprak örneğinden salınan gazları inceledi. Organik ve inorganik besinlerin sıvı haldeki karışımını, önce besinler eklenmiş, ardından kontrol olarak su eklenmiş şekilde uyguladı. 12 gün bu şekilde bırakıldıktan sonra cihaz, odanın atmosferinden örnek aldı ve oksijen, karbon dioksit, nitrojen, hidrojen ve metan dâhil olmak üzere çeşitli gazların konsantrasyonlarını ölçmek için gaz kromatografisi yöntemini kullandı. Bilim insanları, metabolize edici organizmaların bu gazlardan birini üreteceğini varsayıyordu. Deneyin sonucunda oksijen üretilmişti. Bununla birlikte oksijen 145 °C'ye ısıtılan kontrol grubunda da üretildi. Bu da mikroorganizma faaliyetiyle değil ancak toprakta reaktif bileşiklerin varlığıyla açıklanabilirdi.

17.7.3 Etiketli Salım Deneyi

Etiketli Salım (LR) deneyinde, bir miktar Mars toprağı 1 ml'lik çok seyreltik besin çözeltisiyle aşılanmıştır. Yedi organik madde (format, glikolat, glisin, D-alanin, L-alanin, D-laktat ve L-laktat) içeren besinler radyoaktif ^{14}C'le etiketlendi. 10 günlük inkübasyondan sonra, topraktaki mikroorganizmaların bir veya daha fazla besin maddesini metabolize ettiğinin kanıtı olarak, toprağın üzerindeki hava radyoaktif $^{14}CO_2$ gazının evrimi bakımından izlendi. Elde edi-

len sonuca göre, radyoaktif gazlar üretilmişti. Deney, ilki Güneş ışığına maruz kalan yüzeyden örnek alan ve ikincisi de örneği bir kayanın altından alan iki Viking iniş aracı tarafından yapıldı. Her iki deney de olumlu sonuçlar verdi. 160 °C'ye ısıtılan kontrol örnekleri ise aynı sonucu vermedi dolayısıyla ortaya çıkan sonuç biyolojik aktivite eseriydi. Ancak bir hafta sonra deney odalarına yapılan sonraki enjeksiyonlar, biyolojk bakımdan aynı şekilde sonuçlanmamıştı (yeni besinlerle, canlıların yeniden çoğalmaya başlaması beklenir). Soğuk ve kuru koşullar altında ve bir karbon dioksit atmosferinde, ultraviyole radyasyon, karbon dioksitin toprakla reaksiyona girerek çeşitli oksitlenmiş bileşikleri üretmesine neden olabilir. Süperoksit kimyası ayrıca, toprakta kimyasal olarak aktif bileşen tükeneceğinden, daha fazla besin eklenmesinin bir reaksiyona neden olmaması gerçeğini de açıklar.

17.7.4 Pirolitik Salım Deneyi

Bu deneyde, ışık, su ve Mars'takine benzer bir karbon monoksit (CO) ve karbon dioksit (CO_2) atmosferi, 0,25 cm^3'lük bir toprak örneğiyle birlikte deney odasına verildi. Karbon içeren gazlar ^{14}C kullanılarak oluşturulmuştu. Fotosentetik organizmalar olsaydı, karbonun bir kısmı biyokütle olarak bunların yapılarına dâhil olacaktı. Işık sağlamak üzere bir ksenon ark lambası kullanıldı ve 120 saatlik inkübasyondan sonra ortmdaki gazlar seyreldi, kalan toprak 625 °C sıcaklığa erişti ve oluşan ürünler radyoaktivite ölçen bir cihazda toplandı. ^{14}C'den herhangi biri biyokütleye dönüştürülmüş olsaydı, ısıtma sırasında buharlaşacaktı ve radyoaktivite ölçer de bunu yaşam kanıtı olarak algılayacaktı. Isıtılmış toprak kullanan kontrol grubu da araştırıldı. Hem deneysel hem de ısıtılmış kontrol grubuna ait örneklerde gazlar küçük miktarlardaki tutuklanmış karbondan salındı.

Bu mikroorganizmalarla aktivitesinin bir sonucu değildi. Genel olarak, Viking'den elde edilen bu sonuçların, biyolojik üretimle değil, Mars topraklarındaki aktif kimyasal bileşenlerin etkileriyle açıklanabileceği düşünülmektedir.

17.7.5 Viking: Bir Bilim Dersi

Viking deneyleri bilimsel anlamda önemli dersler sunmuştur. Yukarıdakileri gözden geçirir ve sonuçları düşünürseniz, tüm deneylerin, kendi başlarına, yaşam olabileceğini ortaya koyduğunu fark edeceksiniz. Öte yandan, organizmaların canlı olmasını beklemediğimiz durumlarda, ısıtıldığında gösterdiği aktivitenin kimyasal tepkimeyle açıklandığı örnekler ise ısıyla steril edilmiş kontrol grupları olmuştu. Önem arz eden organik maddeler saptamayan GCMS verileriyle birleştiğinde, kimyasal açıklama en güçlü açıklama yoludur. Kontroller, iyi bir bilimsel deneyin çok önemli bir parçasıdır. Viking deneyleri, yaşam kanıtı bulamasalar da iyi planlanmıştı.

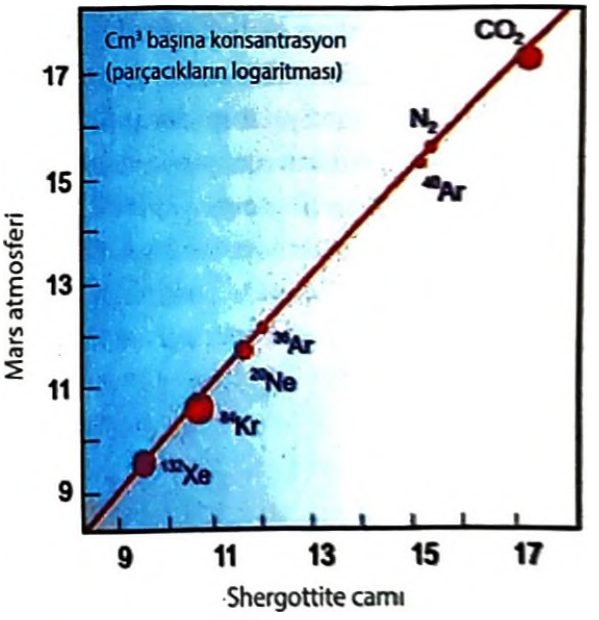
17.8 Marsın Göktaşları

Güneş Sisteminin ömrü boyunca, asteroit ve kuyruklu yıldız çarpması sonucunda Mars'ın yüzeyindeki kayalar uzaya fırladı ve bunlar sonunda meteorlar olarak Dünyaya ulaştı. Tanımlanmış olan Mars meteorlarının sayısı azdır. Bu sayı 130'un biraz üzerinde olsa da artmaya devam ediyor. Dünyadaki kayalardan ve diğer göktaşlarından çok farklı nitelikteki bileşimleri, onları daha göktaşı avcılığının ilk günlerinden itibaren ayırd edilmelerini sağladı. Bu göktaşları Mars yüzeyinden fırlatıldıklarında erimiş haldeyken camsı yapılarda hapsolmuş gaz cepleri içermekteydi. Bu gaz cepleri, esasen Mars'tan geldiklerini gösteren kanıtlardan biri olan Mars'ın atmosferinden örnekler taşıyordu. Gazlar, Mars'taki atmosferik analizlere benzer elementsel ve izotopik bileşimlere sahiptir (Şekil 17.18). Ayrıca, kayaların mineral bileşimi Mars kökenli olduklarını doğrular.

Mars meteoritleri, shergottitler, naklitler ve chassignitler (veya SNC meteorları, Mars meteorlarına verilen genel isim) olmak üzere üç gruba ayrılır. Ayrıca ortopiroksenit ve bazaltik breşler olarak adlandırılan iki 'grupçuk' da vardır.

Mars'taki tüm göktaşlarının yaklaşık dörtte üçü, adını 1865'te Hindistan'ın Sherghati kentine düşen Shergotty göktaşından alan şergottitlerdir. Birçok şergottitin oluşum yaşları çoğunlukla 150-575 milyon yıl öncedir ve bu da çok genç oduklarına işaret eder. Mars meteoritlerinin tarihlemesi oldukça önemlidir zira bu kayalar bize astrobiyologların büyük ilgi gösterdiği bir gezegenin jeokimyası ve çevresi hakkında bilgi sunar. Gezegenin yüzeyinde, suyun mevcudiyeti gibi durumları içeren değişimlerin zamanlamasının doğru bir şekilde değerlendirilmesi çok önemlidir.

Nakhlitler, adını 1911 yılında Mısır'ın İskenderiye kentindeki El-Nakhla'ya düşen ve tahmini ağırlığı 10 kg olan Nakhla göktaşından almıştır. Hepsi yaklaşık 1,3 milyar yıl önce bazaltik magmadan oluşan magmatik kayalardır ve olivin kristalleri içerirler. Yaşları, Mars'ın geniş volkanik bölgelerinde oluştuklarını göstermektedir. Naklitlerin yaklaşık 620 milyon yıl önce



Şekil 17.18 Mars kaynaklı shergottit göktaşı EET A79001'in cam yapısında hapsolmuş bulunan gazların bolluğu Mars atmosferiyle (uzay aracından belirlendiği üzere) karşılaştırıldığında, bu göktaşı Mars yüzeyinden fırlatıldığında Mars atmosferine ait örneklerin erimiş camda hapsolduğunu düşündürmektedir.

suyla birlikte sızdığı ve yaklaşık 11 milyon yıl önce gerçekleşen çarpma olaylarında Mars'tan uzaya fırlatıldıkları gösterilmiştir. Toplanan meteoritlerin çoğu Dünyaya son 10.000 yılda ulaşmıştır.

Chassignitlere ise, 1815'te Chassigny, Haute-Marne, Fransa'ya düşen Chassigny göktaşının adı verilmiştir.

Belki de en ünlü Mars göktaşı ALH84001'dir (Şekil 17.19). Oldukça uzun olan bu ismin bir mantığı vardır. 'ALH', bulunduğu Antarktika'nın Allan Hills bölgesini ifade eder; '84' bulunduğu yılı ifade eder – 1984; 001, kürasyon için iade edildiğinde analiz edilecek ilk numune olduğunu belirtir. Bu göktaşı, ortopiroksenitler (piroksenden oluşan magmatik bir kaya) grupçuğunun içinde yer alır. ALH84001, yaklaşık 4,1 milyar yaşındadır, dolayısıyla gezegende ilk dönemlerde bulunan sıvı suya ilişkin kanıtlarla aynı zamana denk gelmektedir ve Mars'taki yaşamla ilgili tartışmaların odak noktası olmuştur.

1996'da NASA Johnson Uzay Merkezi'nde David McKay (1936–2013) liderliğindeki bir grup tarafından *Science* dergisinde, ALH84001'de ilkel Mars yaşamına ilişkin kanıtların bulunduğunu belirten cesur bir iddia ortaya atıldı. Mars'ta yaşam bulunduğuna ilişkin hipotezi kanıtlamak üzere birçok kanıt sunuldu. Göktaşı üzerinde yapılan bir inceleme, (i) yaşama elverişli düşük sıcaklıklarda oluştuğu yorumlanan küçük karbonat kürecikleri içerdiğini, (ii) karbonat kürecikleriyle bağlantılı polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'ler; Bölüm 9) içerdiğini, (iii) yaklaşık 300 nm uzunluğunda ilkel bakterilerin mikrofosillerini andıran şekiller içerdiğini (Şekil 17.20) ve (iv) bakteriyel aktivitenin yan ürünleri ve özellikle manyetotaktik bakterilerle tutarlı olarak ~40-60 nm büyüklüğünde manyetit mineral fazları içerdiğini ortaya koymuştur. Bu organizmaların, optimum oksijen konsantrasyonunu ararken, kendilerini Dünyanın manyetik alanları boyunca yönlendirebilecekleri demir oksit mineral zincirleri ürettikleri bilinmektedir. Manyetit kristallerinin biyolojik aktivitenin ürünleri olduğu ileri sürülmüştür. Orijinal iddia, bu kanıt dizilerinin her birinin biyolojik olmayan süreçlerle ayrı ayrı açıklanabileceği ancak hepsi birlikte değerlendirildiğinde yaşam için kanıt oluşturduğu yönündeydi.

Bugün bu kanıt tartışmalıdır. Bu kanıt dizilerinin her birinin biyolojik olmayan süreçler tarafından üretilebileceğini iddia eden çalışmalar mevcuttur (eski korunmuş materyalin biyolojik kökenli olup olmadığını belirleme kriterleri hakkında bir tartışma için Bölüm 12'ye bakınız). Karbonatların, yaşam için şu anda bilinen üst sıcaklık sınırından çok daha yüksek olan, 200 ile 500 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda üretildiği ileri sürülmüştür. Mikrofosiller biyolojik olmayan yollarla üretilmiş şekiller olabilir. Çok küçüktürler, minimum hücre boyutu olarak düşünülenden daha küçüktürler ya da buna yakın bir sınırdadırlar (Bölüm 4). Birçoğu, en azından karadaki hücre boyutu referans alınırsa, birkaç ribozomdan fazlasını içeremez. Göktaşında bulunan PAH'ların, karbonat kürecikleriyle ilişkili olmalarına rağmen, biyolojik olmayan kökenlere sahip oldukları bilinmektedir (Bölüm 9). Manyetik kristaller en tartışmalı konu

olmaya devam etmiştir. Burada konu, şekillerinin belirgin biçimde biyolojik olup olmadığı veya kristallerin biyolojik olmayan süreçler tarafından üretilip üretilemeyeceği üzerine yapılan tartışmalar etrafında dönmüştür. Bununla birlikte göktaşı üzerinde yapılan çalışma, minimum hücre boyutu ve varsayılan olarak korunmuş yaşam kalıntılarının biyolojik kökenli olduğuna ilişkin belirleme kriterleri de dâhil olmak üzere, astrobiyolojiyle ilgili birçok tartışmayı teşvik etmiştir. Mars meteorlarının biyojenik aktivite yönünde herhangi bir kanıt içerip içermediği konusundaki tartışma bir sonuca bağlanmamıştır.

Tartışma Noktası: Bilim ve astrobiyoloji

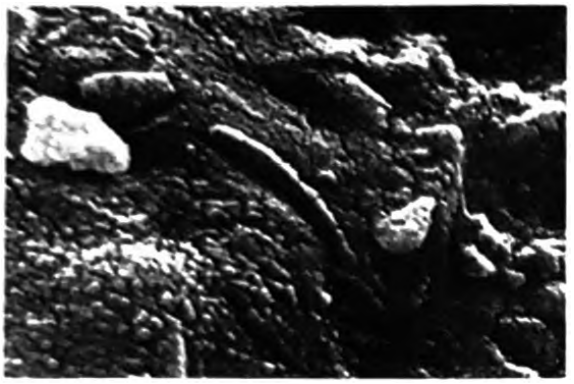
Astrobiyoloji, Dünyanın ötesinde yaşam olduğu hipotezini ele almaya çalışır. Sıfır hipotezi, Dünyanın ötesinde yaşam olmadığıdır. Saygın bilim insanları hiçbir sonucu umursamazlar; sadece nesnel olarak hangisinin doğru olduğunu bulmak isterler. Ancak, amacın yaşamın varlığını kanıtlamak olduğu bir yaşam "arayışına" kapılmak çok kolaydır. Öte yandan yapılacak keşiften elde edilen sonuç, bireyler ve kuruluşlar için çok büyük bir önem arz edecektir. Mars gezegeni, yaşam bulma "arzusununa" dair mükemmel örnekler sunar. Percival Lowell, isabetli bir şekilde kanalların yapay olup olmadıklarına dair hipotezini test etmenin yollarını aramaktan vazgeçti ve bunun yerine onların doğasına ve özelliklerine odaklandı. ALH84001 çalışması sağlam bir araştırmaydı, ancak mikrofosillerin görüntüleri, en azından kamusal alanda, nesnel analiz anlayışının hızlıca kaybolmasına yol açacak şekilde Dünya dışı yaşama dair "ümidi"' besledi. Başkan Clinton bile Beyaz Saray bahçesinde bu keşfi övmek zorunda hissetti. Astrobiyologlar buradan ne gibi derler çıkarabilir? Astrobiyologlar, Dünya ötesindeki yaşamla ilgili cezbedici ve inanılmaz derecede zorlayıcı sorunun nesnel biçimde test edildiğinden nasıl emin olmaktadır? Mars'taki mikroskobik yaşam kanıtlarını tartışmak ve günümüzde Mars'ta yaşam varlığına ilişkin bilimsel kanıtları değerlendirmek amacıyla gruplar kurmayı düşünebilirsiniz.

17.9 Mars Benzeri Çevreler

Mars'a benzeyen bir çevre, Mars'ta geçmişte veya günümüzde görülen çevreyle karşılaştırılabilir koşullara ev sahipliği yapan ve bir şekilde gezegenin jeofiziğini, jeokimyasını veya yaşanabilirlik potansiyelini anlamamızı sağlayan Dünya üzerindeki bir çevredir. Dünya üzerinde, Mars'a gerçekten benzeyen hiçbir ortam yoktur (Dünyanın yüzeyi ve hatta yüzeyinin altı, 2,4 Ga'dan fazla bir zamandır atmosferik oksijenden etkilenmiştir; Bölüm 14).



Şekil 17.19 ALH84001, Mars'a ait bir göktaşı (Kaynak: NASA/JSC/Stanford Üniversitesi).



Şekil 17.20 ALH84001'deki olası mikrofosiller. Bu olası mikrofosil şekli ~400nm uzunluğundadır. Bu görüntüler son derece düşündürücüdür ve medyanın da ilgisini çekmiştir, ancak morfoloji yaşam varlığına ilişkin olarak tek başına ikna edici bir kanıt değildir.

Bununla birlikte bazı bölgeler, Mars'a özgü çevrelerin incelenmesi için faydalı olabilecek özelliklere sahiptir.

Mars benzeri çevreler, astrobiyologlar tarafından, örneğin jeolojik süreçleri incelemek ve su-kaya etkileşimlerinin yaşanabilirliği nasıl etkilediğini araştırmak gibi bir dizi amaç için kullanılmıştır. Bunlar, mikroorganizmaların Mars'takine benzer zorlu çevre koşullarına nasıl uyum sağladığını araştırmak üzere onların izole edildiği yerlerdir. Benzerlik gösteren bu çevreler, gezegen araştırmalarında kullanılacak donanımı test etmek için de kullanılır.

Mars benzeri çevreler şu özelliklere sahiptir:

1. Hesperian asidik arazilerinin jeokimyası ve yaşanabilirliği hakkında bilgi sağlayan asidik ortamlar. Buna bir örnek İspanya'daki asidik Rio Tinto Nehridir.
2. Mars permafrostunda olası süreçleri anlamak için kullanılan Permafrost. Örnekler arasında Kanada'daki Yüksek Arktik bölgesi (örneğin Axel Heiberg Adası, Devon Adası) ve Grönland sayılabilir.
3. Kuru bölgeler, özellikle günümüz Mars'ıyla ilgili aşırı derecede kuru çevrelerde yaşanabilirli anlamak için kullanılır. Örnekler, Antarktika'nın Kuru Vadileri ve Şili'deki Atacama Çölüdür.
4. Buz-volkan etkileşimlerini ve magmatik kayaçların ve volkanik ortamların yaşanabilirliğini incelemek için kullanılan volkanik çevreler. İzlanda'nın birçok arazisi buna örnek teşkil eder (Şekil 17.21).
5. Yüzeye yakın bölgelerdeki süreçleri ve kapalı yeraltı bölgelerinin yaşanabilirliğini araştırmak üzere kullanılan mağaralar. Bir örnek, İspanya'nın Lanzarote adasındaki lav tüpleri ve mağaralar olabilir.
6. Yeraltı laboratuvarları, yer altının derinliklerindeki Mars'la ilgili olabilecek süreçleri incelemek için kullanılmıştır (Bölüm 7).

17.10 Panspermia – Yaşamın Gezegenler Arasında Taşınması?

Dünyanın ilk dönemi ile Mars'taki koşulların benzerliği, tarihlerinin erken dönemlerinde yaşamı paylaşıp paylaşamayacakları konusunda kaçınılmaz sorulara yol açtı. Yaşamın gezegenler arasında taşınması olasılığına kimi zaman **panspermi** denir (Yunanca, *pan*, 'hepsi' ve *sperma*, 'tohum' anlamına gelir). Kelime pek uygun değil çünkü "her yerde yaşam" anlamına gelen kaba çevirisi,

kişinin nesnel olarak test etmesi gereken hipotezin sonucunu önceden varsayar. Ben onu sadece gezegensel ada biyocoğrafyası olarak düşünmeyi tercih ediyorum –ada biyocoğrafyası üzerinden bir kestirim ki bu, yaşamın habitatlar arasında nasıl taşınabileceğini ve dağılımını sınırlayan faktörleri dikkate alan bir ekoloji alanıdır. Yeryüzünde, mikroplar ve küçük omurgasızlar gibi bazı organizmalar kıtalar arasında taşınabilir, ancak memelilerin bazıları gibi büyük organizmalar dağ sıraları gibi engellerden dolayı bunu yapamaz. Bu gözlemlerden yola çıkan mantıklı bir soru şudur: Organizmalar gezegenler arasında taşınmış olabilir mi (Şekil 17.22) ve hangi fiziksel engeller veya dağılım filtreleri bunu önleyebilir? Gezegenler biyocoğrafik adalar mıdır?

Gezegenler arasında yaşamın taşınması sorununa yaklaşmanın en iyi yolu, gezegenler arasında taşınan organizmalar üzerinde etkili olan dağılma filtrelerini dikkate almaktır. Şu anda Mars'ta yaşam olup olmadığını bilmiyoruz. Her iki gezegen arasında materyal alışverişi olduğunu biliyoruz (Bu Mars kökenli meteoritlerin toplanmasıyla kanıtlanmıştır). Bu değiş tokuş, yaşamın taşınması sorununun önemli olduğunu göstermektedir. Mars'ta asla yaşam bulamıyorsak, ancak gezegen yaşanabilir koşullara ev sahipliği yapıyorsa, bu, dağılma filtrelerinin bir taşınmanın gerçekleşmesini engellediği anlamına mı gelmektedir? Yaşam bulursak, bu yaşam tipi Dünyadakine benzer mi olacak? Eğer öyleyse, belki Dünyadaki ve Mars'taki yaşam gezegenler arası taşınma bakımından birbiriyle ilişkilidir. Belki de yaşam Mars'ta evrimleşti ve hepimiz Marslıyız! Mars yaşamı Dünyadakiyle akraba değilse, neden Mars'a Dünyadaki



Şekil 17.21 İzlanda, Mars'ın geçmiş dönemlerdeki jeokimyasını ve yaşanabilirliğini anlamaya yönelik benzer bir ortam oluşturan volkanik kaya-buz etkileşimlerine sahip bir çevreye sahiptir. Bu görüntü, ülkenin güney doğusundaki lav akıntılarını göstermektedir.

yaşam gitmedi? Bu nedenle, Mars'ta yaşamı arayışının sonucu ne olursa olsun, gezegenlerin biyocoğrafik adalar olup olmadığı sorusu, verilerin açıklanmasının bir parçası olacaktır. Bazı verilere daha ayrıntılı bakalım ve gezegenler arasında yaşamın aktarımı sürecini ele alalım.

17.10.1 Bir Gezegenden Fırlatılmak

Bir gezegenin yüzeyinden kayaların fırlatılması sırasında organizmalar üzerinde etkili olan dağılma filtresi, materyalin kurtulma hızına erişecek şekilde fırlatılmasına neden olan çarpma etkisiyle ilişkili hızlanma, şok ve yüksek sıcaklıkları kapsar.

Gezegenden fırlama sırasında hızlanmanın etkisi, organizmaların hayatta kalmalarını incelemek için bir tüfekten sert bir hedefe atışların yapıldığı deneylerde hem *Bacillus subtilis* hem de *Deinococcus radiodurans* kullanılarak araştırılmıştır. $4,5 \times 10^6$ m s^{-2}'ye kadarki hızlanmalardan sonra %40-100 arasındaki sağ kalım değerleri, hızlanmanın etkili bir dağılma filtresi olmadığını ortaya koymuştur. Sonoran çölü (ABD) bazaltından izole edilen *Bacillus subtilis* sporları da, benzer şekilde 1.5×10^{10} m s^{-2}'ye kadarki ivme etkisinden kurtulmuştur. *Bacillus subtilis* spor oluşturan bir organizmadır (Bölüm 7) ve bu nedenle spor üzerindeki sert kabuk yapısı nedeniyle sarsıntı ve hızlanmaya karşı dirençli olabilir.

Gezegenden fırlamak ayrıca şok basınçlarının etkisinden korunarak hayatta kalmayı da gerektirir. Yaklaşık 5 ila 55 gigapaskal (GPa) arasında şok basınçları gösteren Mars meteorlarına bakarak, fırlatılan kayaların maruz kaldığı şok basınçları hakkında ampirik bilgi edinebiliriz. Gaz tabancası (Şekil 17.23) ve **uçan-plaka** aygıtı kullanılarak çok sayıda araştırmacı tarafından gerçekleştirilen şok deneyleri, hayatta kalmanın hem hücrenin doğasına hem de yerel mikro-çevresine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. *Bacillus subtilis* sporları, 50 GPa'dan daha yüksek şok basıncı varlığında hayatta kalarak şoka karşı yüksek direnç gösterir. Buna karşılık, vejetatif hücreler, düşük şok basınçlarının etkisine karşı hassastırlar. Kayaların doğal bir sakini olarak Bölüm 7'de bahsettiğimiz fotosentetik bir siyanobakteri olan *Chroococcidiopsis* sp., 10 GPa'dan daha yüksek şok basınçları kullanılarak öldürüldü. Bu organizma, doğal olarak kayaların içinde yaşadığı için seçilmişti. Bu yoğun şoklar sırasında ortaya çıkan çok yüksek sıcaklıklar, şok dalgasının yayılmasının doğasına, biyolojik materyalin kalınlığına ve organizmaların özelliklerine bağlı olacaktır.

Deneyler, kurutulmuş vejetatif hücrelerin bile, Mars'tan (ve Mars benzeri gezegenlerden) kurtulma hızı için gerekli en alt seviyedeki şok basınçlarında hayatta kalabileceğini göstermiştir. Buna karşın *Chroococcidiopsis* sp. örneğinde hayatta kalma eşiği, kayaların Mars'tan kurtulma hızına ulaşacağı şok basıncının en alt seviyesindeydi. Dünyanın kurtulma hızı (11.19 km s^{-1}), Mars'ın (5.03 km s^{-1}) yaklaşık iki katıdır, bu da kurtulma hızına ulaşmak için gereken



Şekil 17.22 Gezegenler biyocoğrafik adalar mıdır? Yaşamın bir gezegenden diğerine aktarılabilmesi için hayatta kalarak aşması gereken dağılım filtrelerini gösteren bir şema. Atmosferin kalınlıkları abartılı olarak verilmiştir (Kaynak: Charles Cockell).

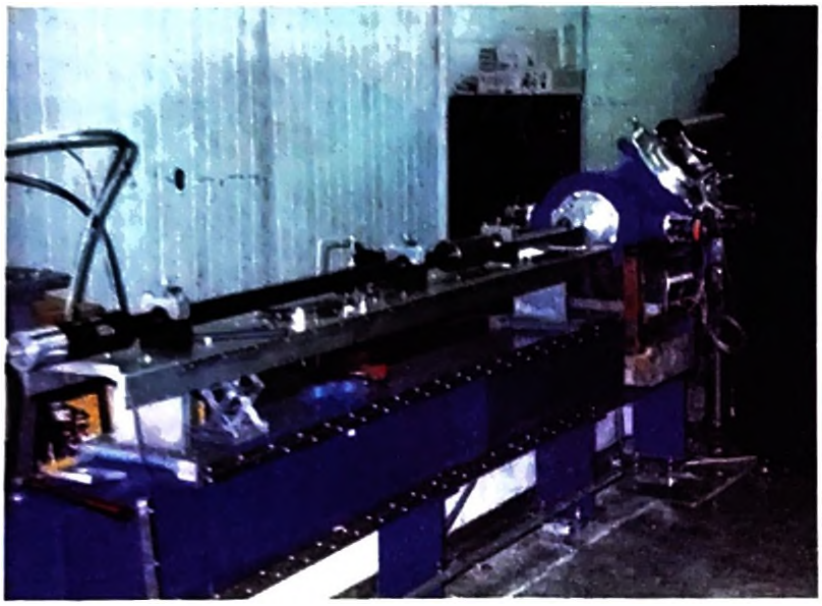
daha yüksek minimum şok basınçlarını ifade eder. Spor oluşturan durumların varlığı, organizmaların dağılma filtresinden kurtulabilecekleri şok basınçlarının aralığını artıracak ve gezegenden fırlaa sürecinde hayatta kalma şanslarını artıracaktır. Bu nedenle, bu dağılım filtresinin birincil moleküler temeli, hücre duvarlarının/zarlarının mekanik mukavemetini aşmaktadır. Hücresel makromoleküllerin sıcaklık nedeniyle inaktivasyonunun katkısı da önemli olabilir.

17.10.2 Gezegenler Arasında Yolculuk Aşaması

Organizmalar da uzay yolculuğunda hayatta kalmak zorundadır. Gezegenler arasındaki yolculuk aşamasında, kayaların yüzeyine yakın organizmalar yüksek UV radyasyonuna maruz kalma potansiyeline sahiptir. Gezegenler arası UV radyasyonunun, gezegenler arasında yolculuk eden organizmalar için önemli ölçüde zararlı bir faktör olduğu kabul edilmiştir. Bir organizmaya nüfuz eden UV radyasyonunun akışı, kayanın bulunduğu yıldızdan olan uzaklığa, yönüne, organizmaları kaplayan malzemenin kalınlığına, UV soğurmaya ve saçılma özelliklerine bağlı olacaktır. Atmosferik soğurmanın koruyucu etkileri olmadan, gezegenler arası uzaydaki kayaların yüzeyi, yıldızın yaydığı tam UV dalga boyu aralığına maruz kalacaktır.

Şimdiye dek yayımlanmış olan çalışmaların çeşitliliği, farklı mineral türlerinin katmanlarının UV radyasyonunu önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Bir çalışma, kil, kumtaşları veya Mars meteoritiyle (Zagami) karıştırılan *Bacillus subtilis* sporlarının UV radyasyonuna karşı korunduğunu ancak ince tabakaların muhtemelen çatlaklardan sızan UV veya toksik fotokimyasal ürünlerin oluşumu nedeniyle koruma konusunda etkisiz olduğunu ortaya koymuştur.

Diğer bir zararlı faktör ise içeriye UV radyasyonundan daha fazla nüfuz eden kozmik (iyonlaştırıcı) radyasyondur. Ağır iyon dozlarında *Bacillus subtilis*



Şekil 17.23 Asteroit çarpmasını simüle etmek için kullanılan bir hafif gaz tabancası (Kaynak: NASA).

sporlarının hayatta kalmasıyla ilgili deneysel verileri kullanan modeller, 1 m kayanın arkasındaki sporların yaklaşık bir milyon yıl hayatta kalabileceğini göstermektedir. Bu hayatta kalma süresi, kayanın yüzeyine çarpan kozmik radyasyondan kaynaklanan ikincil radyasyon nedeniyle 10 cm korumanın gerisindeyken de yaklaşık 300.000 yıla düşer.

Bu güçlü engellere rağmen, kanıtlar organizmaların uzaydaki koşullarla ilişkili diğer dağılma filtrelerinden kurtulabileceğini göstermektedir. Uzay koşullarında bir dizi organizma hayatta kalmıştır. *Bacillus subtilis* sporlarının Dünyanın Alçak Yörüngesinde altı yıl boyunca hayatta kaldıkları gösterilmiştir. Likenler, siyanobakteriler, mantarlar ve bir dizi bakteri, Avrupa Uzay Ajansının Uluslararası Uzay İstasyonu dışındaki EXPOSE tesisinde bu deneylere maruz bırakılmış (Şekil 17.24) ve genellikle gezegenler arasında (binlerce ila milyonlarca yıla kadarki) yolculuk sürelerinden çok daha kısa olsa da, uzay boşluğunda hayatta kalabilirler.

17.10.3 Varış Gezegenine Ulaşım

Bir kayanın hem fırlatılması hem de vardığı gezegene inişi, onun başlangıç ve hedef gezegen atmosferlerinin oluşturduğu dağılma filtresinden geçmesini gerektirir. Gezegenden fırlamada olduğu gibi bunun da sondaj roketleri ve yörünge araçları kullanılarak deneysel olarak izlenebilir olduğu kanıtlanmıştır.

Granit dilimleri üzerine aşılanan *Bacillus subtilis* sporları, bir roket üzerinde ~120 km irtifaya fırlatılarak hiper hızlı atmosferik geçişe tabi tutulmuştur. Sporların kayanın kenarlarında hayatta kaldığı, ancak maksimum 145 °C sıcaklığa maruz kalan öne bakan yüzeyde ise hayatta kalamadığı gözlemlenmiştir.

Atmosfere giriş sırasında yapay meteorlar üzerinde hayatta kalma durumunu araştırmak için tasarlanmış deneysel proje olan STONE deneyinde, at-



Şekil 17.24 EXPOSE tesisi. Aparat, Uluslararası Uzay İstasyonunun dışına takılır. Kap içindeki her küçük delik, içine bir biyolojik malzeme örneğini sığdırabilir. Yukarıda, güneş radyasyonunun belirli dalga boylarının nüfuz etmesine izin vermek için seçilebilen filtreler var (Kaynak: ESA).

mosfere girişin fotosentetik organizmalar üzerindeki etkileri de incelenmiştir (Şekil 17.25). Fotosentetik organizmalar, fotosentez için gerekli ışık seviyelerinin yeterli olduğu derinlikteki bir kayada yaşamak durumundadır. Normalde fotosentetik organizmaların çoğalmasına yardımcı olan çeşitli kaya türlerinde, fotosentez için gereken derinlik yaklaşık 5 mm veya daha azına karşılık gelir. *Chroococcidiopsis* sp. Asteroit ve kuyruklu yıldız çarpması sonucu doğal olarak şoka uğrayan bazı kayalara yerleştirildi. Organizmalar, doğal ortamdaki materyalde çoğalan fototrofların bulunduğu derinlikteki kayalara yerleştirilmişti. Kaya, bir Rus FOTON uzay kapsülünün ısı kalkanına sabitlendi ve yörüngeye fırlatıldı. 16 gün boyunca Dünya yörüngesinde kaldıktan sonra, örnek yörüngeden çıkarıldı ve Kazakistan'a indirildi.

Ne organizmalar ne de onların biyomolekülleri varlıklarını sürdürebildi. Bu da çoğalmak üzere kayaların yüzeyinin yakınında yaşaması gereken fotosentetik organizmaların transferinde bir dağılma filtresi olarak atmosferik geçişin etkinliğinin basit ve deneysel olarak gösterimi olmuş oldu.

Bu sonuçlara rağmen, meteoritlerin iç kısımlarının atmosferden geçiş sırasında daha soğuk kalabildiği iyi bilinmektedir. Kayanın dış kısmında ulaşılan sıcaklıklar yüksek olmasına rağmen, ~10 km s^{-1} hızda geçiş süreleri onlarca saniye mertebesindedir, öyle ki ısının içeriye nüfuz etmesi için zaman kalmaz. Yeterli büyüklükteki kayalar söz konusu olduğunda, kayanın içindeki herhangi bir organizma, yüksek sıcaklıklardan mutlak surette etkilenmeyecektir.

Özetle, şu anda bazı mikropların bir gezegen yüzeyinden püskürtülmeyi mümkün kılan koşullarda hayatta kalabileceğine ve kayaların iç kısmının, kayanın derinliklerindeki organizmaların atmosfere girişte hayatta kalabilmesi için yeterince soğuk kaldığına dair güçlü kanıtlar vardır. Bazı kayalar gezegenler arasında kısa sürede yolculuk etse de, organizmalar için önemli olan



Şekil 17.25 Foton uzay aracı, Kazakistan bozkırlarında Dünya'ya geri dönüyor. Isı kalkanının içine (uzay aracının solundaki küçük beyaz daireler), kayaların atmosferik girişe nasıl tepki verdiğini ve organizmaların hayatta kalıp kalamayacağını incelemek için yapay göktaşları yerleştirilmiştir.

dağılım filtresi genellikle gezegenler arası uzaydaki uzun süren yolculuktur.

Bazı araştırmacılar, yıldızlar arasında yaşamın nasıl aktarılabilecği sorusunu gündeme getirdiler. Yıldızlararası uzayın organizmalar için etkili bir dağılma filtresi görevi görmesi muhtemeldir. Gezegenden fırlayan kayaların bir hedef gezegene denk gelebilme olasılığının düşük olması bir yana uzun süreler boyunca (milyonlarca yıl) kozmik radyasyona maruz kalmak muhtemelen yaşamı yok edecektir. Gezegenlerin biyocoğrafik adalar olup olmadığı sorusu astrobiyolojide büyüleyici bir soru olmaya devam ediyor. Güneş sistemimizde meydana geldiğine dair bir kanıt olmamasına rağmen, yine de mikroorganizmaların hayatta kalabilme sınırları hakkında sorular sormaya ve bizi Dünyamızın ötesindeki ekolojik sorunları tahmin etmeye yönlendiriyor. Eninde sonunda Mars'ın neden sakinlerinin olmadığı ya da orada yaşamın neden bulunmadığını açıklamak gerekecek.

17.11 Sonuçlar

Mars, Güneş Sistemindeki gezegenler arasında Dünyaya en çok benzeyen gezegendir ancak tarihi Dünyadan çok farklı şekilde seyretmiştir. Mars, Noachian'dan günümüze, her biri sırayla yaşamın ortaya çıkmasını daha da zorlaştıran üç genel jeolojik evrim aşaması yaşadı. Gezegen, yaşam gereksinimlerinin çoğuna sahiptir ancak kuru ve ışınlara maruz kalmış yüzey, bugün orada herhangi bir yaşam varsa da bunun yeraltında olması gerektiğini düşündürmektedir. Mars'taki robotik görevler, gezegen ve geçmişi hakkındaki anlayışımızı önemli ölçüde geliştirdi. Viking, Mars'ta yaşam aramayla ilişkili ilk görevdi. Mars'ın sakinlerinin olup olmadığı ve yaşanabilir koşulların kapsamı açık bir soru olarak kaldı. Mars'ın yaşanabilirliğinin tarihini ve biyolojik durumunu anlamanın bir kısmı, gezegenlerin biyocoğrafik adalar olup olmadığı sorusunun içinde yatmaktadır.

İleri Okumalar

Kitaplar

Pyle, R., Manning, R. (2012) *Destination Mars: NewExplorations of the Red Planet*. Prometheus Books,New York.

Vogt, G.L. (2009) *Landscapes of Mars: A Visual Tour*. Springer, New York.

Yayınlar

Benner, S.A., Devine, K.G., Matveeva, L.N., Powell, D.H. (2000) The missing organic molecules on Mars. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97, 2425–2430.

Bibring, J.-P., Langevin, Y., Mustard, J.F., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Gondet, B., Mangold, N., Pinet, P., Forget, F., the OMEGA team (2006) Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. *Science* 312, 400–404.

Boston, P,J,, Ivanov, M.V., McKay, C.P. (1992) On the possibility of chemosynthetic ecosystems in subsurface habitats on Mars. *Icarus* 95, 300–308.

Burr, D.M., Grier, J.A., McEwen, A.S., Keszthelyi, L.P. (2002) Repeated aqueous flooding from the Cerberus Fossae: evidence for very recently extant, deep groundwater on Mars. *Icarus* 159, 53–73.

Cockell, C.S. (2014) Trajectories of Martian habitability. *Astrobiology* 14, 182–203.

Cousins, C.R., Crawford, I.A., Carrivick, J.L., Gunn, M., Harris, J., Kee, T.P., Karlsson, M., Carmody, L., Cockell,

C.S., Herschy, B., Joy, K.H. (2013) Glaciovolcanic hydrothermal environments in Iceland and implications for their detection onMars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 256, 61–77.

Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Murchie, S.L., Poulet, F., Bishop, J.L., Brown, A.J., Calvin, W.M., Clark, R.N., DesMarais, D.J., Milliken, R.E., Roach, L.H., Roush, T.L., Swayze, G.A., Wray, J.J. (2008) Orbital detection of carbonate-bearing rocks on Mars. *Science* 322, 1828–1832.

Grotzinger, J.P., the MSL Science Team (2013) A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. Science. doi: 101126/science1242777.

Hecht, M.H., Kounaves, S.P., Quinn, R.C., West, S.J., Young, S.M., Ming, D.W., Catling, D.C., Clark, B.C., Boynton, W.V., Hoffman, J., Deflores, L.P., Gospodinova, K., Kapit, J., Smith, P.H. (2009) Detection of perchlorate and the soluble chemistry of martian soil at the Phoenix lander site. *Science* 324, 64–67.

Horneck, G., Rettberg, P., Reitz, G., Wehner, J., Eschweiler, U., Strauch, K., Panitz, C., Starke, V., Baumstark-Khan, C. (2001) Protection of bacterial spores in space, a contribution to the discussion on panspermia. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 31, 527–547.

Jakosky, B.M., Nealson, K.H., Bakermans, C., Ley, R.E., Mellon, M.T. (2003) Subfreezing activity of microorganisms and the potential habitability of Mars' polar regions. *Astrobiology* 3, 343–350.

Malin, M.C., Edgett, K.S. (2000) Evidence for recent groundwater seepage and run-off onMars. *Science* 288, 2330–2335.

Mancinelli, R.L., Banin, A. (2003) Where is the nitrogen on Mars? International Journal of *Astrobiology* 2, 217–225.

McEwan, A.S., Ojha, L., Dundas, C.M., Mattson, S.S., Bryne, S., Wray, J.J., Cull, S.C., Murchie, S.L., Thomas, N., Gulick, V.C. (2011) Seasonal flows on warm Martian slopes. *Science* 333, 740–743.

McKay, D.S., Gibson, E.K., Thomas-Keprta, K.L., Vali, H., Romanek, C.S., Clemett, S.J., Chillier, X.D.F., Maechling, C.R., Zare, R.N. (1996) Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science* 273, 924–930.

Michalski, J.R., Cuadros, J., Niles, P.B., Parnell, J., Rogers,A.D.,Wright, S.P. (2013) Ground water activity on Mars and implications for a deep biosphere. *Nature Geoscience* 6, 133–138.

Mileikowsky, C., Cucinotta, F., Wilson, J.W., Gladman, B., Horneck, G., Lindgren, L., Melosh, H.J., Rickman, H., Valtonen, M.J., Zheng, J.Q. (2000) Natural transfer of viable microbes in space. Part I: From Mars to Earth and Earth to Mars. *Icarus* 145, 391–427.

Poulet, F., Bibring, J.-P., Mustard, J.F. et al. (2005) Phyllosilicates on Mars and implications for early Martian climate. *Nature* 438, 623–627.

Schulze-Makuch, D., Irwin, L.N., Lipps, J.H., LeMone, D., Dohm, J.M., Fairén, A.G. (2005) Scenarios for the evolution of life on Mars. *Journal of Geophysical Research* 110: E12S23.

Weiss, B.P., Yung, Y.L., Nealson, K.H. (2000) Atmospheric energy for subsurface life on Mars? *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97, 1395–1399.

Westall, F.,Loizeau,D., Foucher, F.,Bost, N.,Betrand, M., Vago, J., Kminek, G. (2013) Habitability on Mars from a microbial point of view. *Astrobiology* 13, 887–897.

18

DEV GEZEGENLERİN UYDULARI

Öğrenme Çıktıları:

- Güneş Sistemindeki dev gaz gezegenlerinin uydularından bazılarının özelliklerini anlamak.
- Europa, Ganymede ve Enceladus'a özellikle değinerek, bazı buzul uyduların yüzeylerinin altındaki su kütlelerine ilişkin kanıtları anlamak.
- Titan'daki yüzey, atmosfer ve karbon döngüsü jeolojisini ve bunların bazı özelliklerini anlamak.
- Yaşanabilirlik koşullarının uydular tarafından nasıl karşılanabileceğine dair bazı fikirleri tanımlamak.
- Gezegensel korumanın arkasındaki motivasyonları ve bunun için kullanılan bazı yöntemleri anlamak.

18.1 Uyduların Astrobiyolojisi

Birkaç on yıl önce, yaşanabilir koşullar bulmak için ötegezegen uydularını araştırma fikri, bir bilimkurgu saçmalığı olarak görülürdü. Bölüm 16'da gördüğümüz gibi, yaşanabilir bölge kavramı yaygın olarak kabul görüyordu. Yaşamın, yüzeylerinde sıvı su bulunan, biraz Dünyaya benzeyen gezegenlerde bulunabileceği yaklaşımı yaygındı. Güneş sisteminin dış kısımlarının dondurucu bölgelerinde bulunan devasa ve yaşanılmaz gaz gezegenlerinin yörüngesinde dönen küçük uyduların, astrobiyologların ilgisini çekebilecek yerler olabileceği gezegen bilimcilerinin aklına gelmezdi.

Bu uyduların canlılara ev sahipliği yapıp yapmadığını bilmiyoruz ancak, birazdan göreceğimiz gibi, su ve diğer yaşanabilirlik gereksinimlerinin tespiti bu tür dünyalara bakışımızı kökten değiştirdi. Bu uydular canlılara ev sahipliği yapmasalar bile, en azından karbonun Güneş Sisteminde işlenmesi hakkında önemli bilgileri ortaya çıkarma ve prebiyotik öneme sahip moleküllerin üretimi hakkında yeni fikirler sunma potansiyeline sahiptirler. Bundan dolayı, evrendeki yaşanabilir koşulların sınırlarını ve dağılımı hakkında bize kesinlikle bir şeyler anlatacaklardır.

Mars'ın yörüngesinin ötesinde dev gaz gezegenleri ve onların uyduları vardır. Bu uyduların çoğu, Satürn'ün 100 km uzunluğunda bir patatese benzeyen iç uydusu Pandora gibi küçük kayalık cisimlerdir (Şekil 18.1). Pandora, ya gezegenler tarafından yakalanan ya da aynı ön gezegensel materyallerde oluşturulan çok sayıda küçük kayalık uydunun temsilcisidir. Bu cisimlerden bazıları karanlık ve karbon bakımından zengin olabilirler. Jüpiter ve Satürn 50'den fazla, Uranüs ise 20'den fazla böyle küçük uyduya sahiptir. Güneş sistemimizin nasıl oluştuğunu anlamaya çalışırken bu küçük dünyaların tümü ilgi çekicidir, ancak bunlardan çok azının astrobiyoloji açısından özel bir önemi vardır. Bu durumun istisnası, genellikle çapı yaklaşık 200 km'den fazla olan büyük küresel cisimler oluşturacak kadar büyük olanların oluşturduğu sınıftır. Bu cisimler, Güneş Sisteminin oluşumu sırasında kendilerine bahşedilen özgün uçucu maddeleri tutacak kadar büyüktürler. Bu buzul ve uçucular bakımından zengin uydular, bazı dikkate değer sürprizler ortaya koydu. Genel olarak, Güneş Sistemi içerisinde ilerledikçe, daha düşük donma sıcaklıklarında uçucu maddelere sahip uydularla karşılaşırız. Jüpiter sisteminde su buzu hâkimdir, ancak Neptün'ün uydusu Triton'da nitrojen, su, metan ve karbon monoksit buzları da mevcuttur.

Şimdi, astrobiyologların ilgisini çekmeye aday olan uydulardan bazılarını ziyaret edelim.

18.2 Jüpiter'in Uyduları: Europa

Jüpiter'in uyduları (Jüpiter sistemi), büyük ölçüde Europa'nın buz kabuğunun altında bulunduğu varsayılan okyanus nedeniyle, astrobiyoloji için yoğun bir odak noktası haline geldi. Europa, 1601'de Galileo Galilei (1564–1642; Şekil 18.2) tarafından keşfedildi. Europa, Jüpiter'in 'Galilei uydularının' (Io, Europa, Ganymede ve Callisto) en küçüğüdür.



Şekil 18.1 Satürn'ün yaklaşık 100 km uzunluğundaki kayalık uydusu Pandora, gaz gezegenlerinin yörüngesinde dönen küçük kayalık uyduların çoğunu temsil etmektedir (Kaynak: NASA).



Şekil 18.2 Galileo Galilei, Jüpiter'in yörüngesindeki dört uydunun kaşifi.

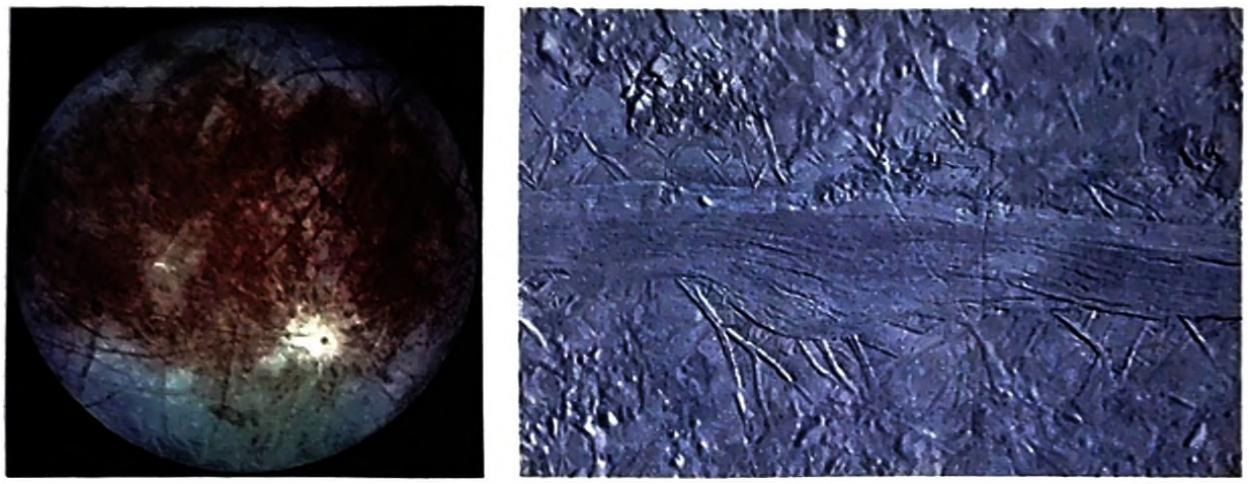
Europa hakkında bildiklerimizin çoğu uçuş görevlerinden gelmektedir. 1973 ve 1974'te Pioneer 10 ve 11, yakın çekim görüntüler elde etti. 1979'da Voyager 1 ve 2, uydu yüzeyinin ilk ayrıntılı görüntülerini çekti. Son derece yansıtıcı buzlu yüzey, yüzey altı sıvı okyanus olasılığı hakkında tartışmaya yol açtı. Galileo sondası 1995 yılından itibaren sekiz yıl boyunca uydunun manyetik alanı, yoğunluğu ve yüzey özellikleriyle ilgili çalışmalar da dâhil olmak üzere, bugüne kadarki en yakın tarihli ve en ayrıntılı bilgileri sağlamaya başladı.

Europa, kendi uydumuzdan biraz daha küçüktür (Ayın 3475 km çapına kıyasla 3100 km çapında) ve Jüpiter'in yörüngesini üç buçuk günde tamamlar. Europa ile Jüpiter arasında kütleçekim kilidi vardır, böylece bir yarım küre sürekli olarak gezegene bakar. Uydunun ortalama yoğunluğunun 2,94 g cm^{-3} olduğu tahmin edilmektedir; bu, uydunun çoğunlukla kayalık (silikatlar), muhtemelen metalik ancak bir su buzu kabuğu ve bir yüzeyaltı okyanusu da dâhil olmak üzere daha hafif bir materyalle kaplanmış bir çekirdeği olduğunu düşündürmektedir.

Jüpiter ortamı zorlu bir ortamdır. Çok büyük bir radyasyon alanı mevcuttur. Jüpiter'in manyetik alanı veya manyetosferi, Güneşle aynı yönde yedi milyon kilometreye kadar ve ters yönde neredeyse Satürn'ün yörüngesine kadar uzanır ve yüksek hızlı yüklü parçacıkları yakalar. Galilei uydularının yüzeyindeki radyasyon dozları, Jüpiter'e olan uzaklıkla geniş ölçüde ilişkilidir, bundan dolayı Io en yüksek radyasyon oranına sahipken ardından Europa, Ganymede ve son olarak Callisto gelir.

Jüpiter'in kütlesi, çarpışma rotalarında birçok kuyruklu yıldızı ve diğer cisimleri çeker. Bu, organik materyalin muhtemelen bu cisimlerin çarpışmalarında uydularına oldukça düzenli bir şekilde iletildiği anlamına gelir.

Europa'nın uzaktan çekilmiş bir görüntüsü, bariz bir özelliğini ortaya koymaktadır (Şekil 18.3). Çarpma sonucu oluşmuş birkaç kraterinin etkisiyle oldukça düz bir yüzeye sahiptir. Bu, yüzeyin jeolojik olarak nispeten genç olduğunu ve jeolojik aktiviteyle belki de her 10 milyon yılda bir yenilendiğini göstermektedir. Ayrıca 0,64'lik bir albedo değeriyle çok yansıtıcıdır ve bu, buzlu bir yüzeyin varlığına işaret eder. Kendi uydumuzun verilerini daha iyi bildiğimiz krater oluşum kaydı ve oranı dış Güneş sistemindeaynı olmadığı için, krater oluşumuna bağlı olarak yüzeyin tarihlendirilmesi zordur. Dış Güneş Sisteminin farklı kayalık uydularında krater oluşum oranları karşılaştırıldığında, Güneş Sistemi tarihi boyunca krater oluşum oranının bir konumdan



Şekil 18.3 Solda: Europa'nın yüzeyi boyunca oluşan karakteristik çizgiler gösteriliyor. Uydu yaklaşık olarak doğal renklerinde gösterilmiştir. Sağ altta göze çarpan krater Pwyll'dir ve daha koyu bölgeler, Europa'nın su buzu yüzeyinin daha yüksek mineral içeriğine sahip olduğu alanlardır. Bu görüntü 7 Eylül 1996'da Galileo uzay aracı tarafından çekildi. Sağda: Agenor Linea, Europa'nın yüzeyindeki parlak bir çizgi. Görüntü yaklaşık 130 × 95 km'lik bir alanı kapsamaktadır (Kaynak: NASA).

diğerine, özellikle de dış Güneş Sisteminde değiştiği açıktır. Bununla birlikte, Europa'daki krater sayısının azlığı, genç bir yüzeye sahip olduğunu öne sürmek için yeterli bir kanıttır.

Buzul uyduların yüzeyi şaşırtıcı derecede soğuktur. Europa'nın ortalama yüzey sıcaklığı 103 K'dir, ancak bazı bölgelerde 50 K'e kadar düşmektedir. Ganymede ve Callisto, sırasıyla yaklaşık 110 ve 120 K ortalama yüzey sıcaklıklarına sahiptirler. Farklı değerler, farklı albedolardan kaynaklanır. Europa, Ganymede ve Callisto'dan daha yansıtıcıdır.

Galileo'nun Europa'ya ait spektroskopik gözlemleri, Jüpiter'in yoğun manyetik alanına yakalanmış iyonlarla bombardımana tutulan su buzundan veya UV ışımasından beklenebilecek birçok özelliği göstermektedir. Bunlara oksijen, ozon ve hidrojen peroksit (H_2O_2), suyun parçalanması sonucu oluşan tüm ürünler ve serbest oksijen radikallerinin üretimi dâhil dir. Bu bileşenlere ek olarak yüzey, sülfat tuzları (epsomit olan $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ dâhil) ve SO_2 gibi diğer kükürt bileşikleri için de kanıtlar sunar. Bu tuzlardan bazılarının, yüzeye çıkan Europa okyanusunun bileşenleri olduğu öne sürülmüştür.

Europa, yüzey jeolojisini karakterize eden bir dizi iyi tanımlanmış özelliğe sahiptir. *Lineae* (çizgiler) ve *lenticulae* (lekeler –Latince çil) özellikle belirgindir. Ay yüzeyinin dikey aralığı birkaç yüz metreyle sınırlıdır ve bu da yine genel olarak jeolojik olarak genç ve bastırılmış bir yüzeyle tutarlıdır.

Lineae, bazıları koyu ve bazıları çok açık olan farklı renkteki bantlardan oluşan ilgi çekici özelliklerdir ve merkezlerinden aşağı doğru uzanan belirgin oluklara sahiptirler. Açık bantlar genellikle koyu bantlar içinde oluşur. Bu bantların bir örneğini Şekil 18.3'te görebilirsiniz. Koyu bantları açıklamak için,



Şekil 18.4 Europa'nın yüzeyinin çökük bölgelerini ve tümseklerini gösteren resim. Bu alan yaklaşık 140 × 130 km'lik bir bölgeyi kapsar ve 12,3°K, 268°W'de ortalanır. Oluklar lineae, koyu lekeler lenticulae. Yüzeyin nispeten yeni doğası açıktır. Örneğin, sol alt köşede çapraz olarak uzanan 8 km genişliğindeki sırtlar (beyaz ok), bu resimde görülen arazinin çoğundan daha genç. Sol alttan sağa doğru kesen dar bir bant üzerinden geçer. Sırasıyla bu bant da resmin sağ alt köşesinden sol üst köşesine uzanan 2 km genişliğindeki dar bir çift sırt tarafından kesiliyor. Ayrıca, çoğu buz olmayan materyalden oluşan koyu lekelerle ilişkili, 9 km'ye kadar genişliğe sahip çok sayıda tepe ve alçak kubbe kümesi de görülebilir. Sırtlar, tepeler ve tümsekler, alt yüzeyden elde edilen buz açısından zengin malzeme olarak kabul edilir (Kaynak: NASA/Arizona Eyalet Üniversitesi).

uydu Jüpiter'in yörüngesinde dönerken buzun açılıp kapanmasıyla birlikte gelgit kuvvetlerinin etkisiyle buzun bükülmesi sonucu oluşan kırıklar oldukları hipotezi sunulmuştur. Koyu bantlar ayrıca zamanla daha parlak hale gelir, bu da yeni materyal açığa çıktığında ve işlendiğinde, bileşimini değiştirerek radyasyonla etkileşime girmesinden kaynaklanabilir. Bazı bilim insanları, özellikle Dünyadaki levha tektoniğine benzer paralellikler ortaya koydular, genellikle bu kırıkların her iki tarafında, açıkça birbirine göre kaydırılmış olan özellikler sıralanabilir. Ayrıca, bazı kırıkların, Dünyadaki sınırları dönüştürmek için analoji olarak birbirine paralel hareket ettiği görülmektedir (Bölüm 13).

Lineae, birbirlerini kesme şekilleri incelenerek göreli yaş tarihli olabilir (Şekil 18.3 ve 18.4). Bu gözlemler, Bölüm 13'te tartışılan göreli yaş tarihlendirme ilkelerine dayanmaktadır.

Bazı çizgisellikler, uydunun buz tabakasındaki gelgit gerilimiyle tutarlı olan sikloidal (yay benzeri) geometrilere sahiptir.

Daha koyu lekelerin veya *lenticulae* (Şekil 18.4), yüzeye yükselen daha genç ılık buz bölgelerine karşılık geldiği ve bölgesel erimenin kanıtlarını temsil edebilecekleri düşünülmektedir. Alternatif bir model, bu tür özelliklerin, yüzeye yakın hareket eden ılık, ancak katı buzdan oluşmasıdır.

Europa yüzeyindeki belki de en dikkat çekici özelliklerden biri kaos arazisidir. Bunlar, potansiyel olarak bir okyanusun içinde veya üzerinde buzun parçalandığı varsayılan bölgelerdir. Conamara Chaos, buna bir örnektir (Şekil 18.5). Buzun buz örtüsü içindeki hareketi, kesin karasal benzetmeler çizerken dikkatli olunmasına rağmen, buzdağlarının hareketlerinden birini hatırlatacak şekilde, sıraya girmiş gibi görünen, ancak parçalanmış kırıkların gözlemlenmesiyle önerilmektedir.



Şekil 18.5 Conamara Chaos, Europa'da bozuk kaotik arazi bölgesi. 9°N, 274°W merkezli görüntü, yaklaşık 70 × 30 km (44 × 19 mil) bir alanı kapsıyor ve NASA'nın Galileo uzay aracındaki Katı Hal Görüntüleme (CCD) sistemi tarafından üç yörüngesi sırasında alınan verileri birleştiriyor. Jovian sistemi. Beyaz ve mavi renklerin, 26 km (16 mil) çapındaki büyük krater, Pwyll, yaklaşık 1000 km (621 mil) oluşumu sırasında atılan ince buz parçacıkları tozuyla örtülü alanlar olduğu düşünülmektedir. Güney. Örtülmemiş yüzey, bozulduğunda kabuğun altından salınan su buharı tarafından taşınan ve yayılan mineral kirleticilerin neden olabileceği kırmızımsı kahverengi bir renge sahiptir (Kaynak: NASA).

Yığınlar, çevredeki materyalden 100 m'ye kadar yükselir. Buzdağlarıyla yapılan benzetme, buzun yalnızca sıvı içinde yüzdüğünü varsaydığı için dikkatle değerlendirilmelidir ki bu durum böyle olmayabilir. Arazi başlangıçta sıvı halde olsa da, gelgitle ısıtılan, bükülen ve mutlaka sıvı suya dönüşmesi gerekmeyen bir buz tabakası içinde hareket ediyor olabilir.

Tartışma Noktası: Europa üzerindeki levha tektoniği

Europa'nın birçok özelliği, özellikle yüzey kırıkları, Dünyadaki levha tektoniğine benzerlikler gösterir. Bununla birlikte, yapısal materyalleri, Europa için buz ve Dünya için kaya olmak üzere, birbirinden oldukça farklıdır. Ayrıca, jeolojik aktivitenin altında yatan süreçler de farklıdır –levha tektoniği, Dünyada kaya yoğunluğu ve dalma-batma tarafından yönlendirilirken Europa'da gelgit ısınması tarafından yönlendirilir. Bu bariz farklılıklara rağmen, bariz benzerlikler de vardır. Bölüm 13'teki levha tektoniği tartışmasını gözden geçirin ve Europa ile Dünyadaki yüzey süreçlerini karşılaştırmak için gerekirse diğer kaynaklardan yararlanarak Europa hakkında bildiklerinizi tartışın. Europa'daki ve Dünyadaki levha tektoniği arasında ne gibi benzerlikler ve farklılıklar var? Uzay görevlerini ve yapılan gözlemler aracılığıyla bu fikirleri test etmeye ne dersiniz?

Kattenhorn, S.A., Prockter, L.M. (2014) Evidence for subduction in the ice shell of Europa. *Nature Geoscience*, doi 10.1038/ngeo2245.

18.2.1 Yeraltı Okyanusu?

Europa'nın çok hassas kütleçekimi ve manyetik ölçümleri, daha önce sunulan jeolojik yüzey verileriyle tutarlı olarak, bir yeraltı okyanusunun varlığını düşünmemizi sağlar. En ikna edici kanıt, Europa çevresinde Jüpiter'in manyetik alanıyla etkileşime giren bir iletken materyal tarafından indüklenmesi gereken küçük bir manyetik momentin (Jüpiter'in manyetik alanının bozulması) ölçümüdür. Böyle bir materyal için en makul aday tuzlu bir okyanustur. Manyetik veriler sadece su cepleriyle kolayca açıklanamaz. Jeofizik veriler, bir buz tabakasının 30 km kalınlıkta ve yeraltı okyanusunun potansiyel olarak 100 km derinliğinde olabileceğini gösteriyor. Bu rakam doğruysa, bu, Dünyanın tüm okyanuslarının toplam hacminin yaklaşık iki katına eşdeğer olacaktır.

Europa'da oluşan kraterler incelenerek buz kabuğunun kalınlığı ve davranışı daha iyi anlaşılabilir. Birçoğu olmamasına rağmen, mevcut olanların merkezlerinde iyi tanımlanmış merkezi tepe noktaları (geri tepme tepe noktaları) vardır. Modeller, bu buz zirvelerini destekleyebilmek için buzun en az 5 km kalınlığında olması gerektiğini göstermektedir.

2014 yılında Hubble Uzay Teleskobu kullanılarak yapılan gözlemler, ayın yüzeyinden çıkan su bulutlarının varlığını ortaya koymuştur. Yüzeyden en az 200 km uzakta gözlemlenen 130,44 nm'de UV Lyman-α yayınımları oksijenin varlığına işaret etmiştir. Bu verilerin bir yorumu, bir yeraltı okyanusundan çıkan suyun elektron bombardımanının, suyu kurucu atomlarına ayırması ve bu yayınımları üretmesiydi. Europa'nın uzaya ne kadar materyal fırlattığı daha fazla araştırma gerektirecektir.

Bu noktada bariz bir soru ortaya çıkmaktadır; Europa'nın yüzeyinin altındaki sıvı su nasıl korunur (Şekil 18.6). Bu sıvı su neden donmuyor? Suyu sıvı



Şekil 18.6 Europa'da bir yeraltı okyanusu mu? Buzla kaplı okyanusu gösteren varsayımsal bir şema. Daha katı bir işlenmiş buz tabakası üstte kahverengi olarak belirtilmiştir. Ayrıca okyanus, buz katmanları ve yüzey arasında var olabilecek olası bağlantılar da gösterilmiştir
(Kaynak: NASA).

tutacak ısı, Dünyanın radyoaktif ısınmasına benzer şekilde kayalık çekirdek içindeki radyoaktif elementlerden kaynaklanamaz çünkü gerekli ısıyı üretmek için yeterli kayaç yoktur.

Europa'nın okyanusu için cevap, ısının Jüpiter'in devasa kütleçekim kuvvetinden kaynaklanan gelgit çarpıklıkları tarafından üretilmesidir. Europa, dairesel olmayan yörüngesi nedeniyle küçük ama önemli miktarda gelgit ısınması yaşar. Europa'nın yüzeyindeki gelgit kuvvetlerinin, yörünge periyodu başına uyduyu yaklaşık 50 m çarpıttığı tahmin edilmektedir.

Jüpiter uydularının deneyimlediği kütleçekim tarafından üretilen gelgit kuvvetleri, herhangi bir gezegenimsi gibi, mesafenin karesiyle ters orantılıdır. İki cisim arasındaki kütleçekim kuvveti, Newton'un Evrensel Kütleçekim Yasası kullanılarak hesaplanır:

$$F = GM_1M_2 / r^2 \qquad (18.1)$$

burada r cisimler arasındaki mesafe, M_1 ve M_2 cisimlerin kütleleri ve G kütleçekim sabitidir.

Newton'un Kütleçekim Yasası, Jüpiter'den daha uzakta olan Ganymede ve Callisto'nun neden Europa'dan önemli ölçüde daha az gelgit ısınması hissettiğini açıklıyor. Daha yakın olan Io, çok aktif olan volkanizmasını açıklayan en yüksek gelgit kuvvetlerini deneyimliyor.

Gelgit kuvvetleri, uydular üzerinde gelgitsel kilite neden olabilir. Aksi takdirde, gelgit kuvvetlerinin neden olduğu şişkinliğin uyduyla birlikte dönmesi ve kayaçların bükülmesi nedeniyle büyük sıcaklıklar oluşturması gerekecekti. Bunun için enerjik olarak en uygun çözüm, kütleçekimsel olarak kilitli bir duruma gelmektir.

İş başında olan başka bir etki daha var. Gelgit kuvvetleri yalnızca gezegenleri kütleçekimsel olarak kilitlemekle kalmaz, aynı zamanda yörüngeyi dairesel hale getirir. Dairesel olmayan bir yörünge için, Kepler Kanunları (Bölüm 8) bize cismin yörüngenin farklı bölümlerinde farklı hızlarda hareket edeceğini söyler (çevresinde döndüğü cisme yakın olduğunda daha hızlı, uzaklaştığında daha yavaş). Bu, yörünge hızı değiştikçe gelgit şişkinliğinin yan yana hareket etmesine neden olacak ve yine büyük enerjiler üretecektir. En düşük enerji durumu, yörüngenin tam bir kütleçekim kilitlenmesine izin vererek daireselleşmesi içindir. Bununla birlikte, Jüpiter'in uyduları hiçbir zaman tam olarak dairesel bir yörüngeye ulaşamazlar. Tüm Jüpiter uydularının kütleçekim kuvvetleri birbirini etkiler ve yörünge rezonanslarına (farklı ayların yörünge dinamikleri arasındaki etkileşimler) yol açar. Ganymede, Europa'nın her iki yörüngesi için Jüpiter'in yörüngesinde ve Io'nun her iki yörüngesi için Europa yörüngesinde dönmektedir. Bunun etkisi, uyduların yörüngelerinde küçük bir değişiklik geliştirmelerine neden olmaktır. Europa, kendi dönüşü, değişen yörünge hızıyla hiçbir zaman tam olarak aynı hizada olmadığından, yana, geriye ve ileriye doğ-

ru sallanma eğilimindedir. Bu küçük yanlış hizalama, uydu içindeki jeolojik süreçleri yönlendiren ısıyı üretir.

Uydunun soğuk yüzey sıcaklığında, buz mekanik olarak, sizin ve benim aşina olduğumuz buzdan daha çok beton gibi davranır. Uydunun çatlak yüzeyini hesaba katarak kırılma eğilimindedir.

Europa için, gelgit ısınmasıyla sağlanan enerji girişinin, 8900×10^{12} W olan Io'ya kıyasla, yaklaşık üç büyüklük sırası daha fazla olan $8,7 \times 10^{12}$ W seviyesinde olduğu tahmin edilmektedir. Çok kaba bir tahmin, Europa'daki birim yüzey alanı başına etkin ortalama enerji girdisini yaklaşık 0,26 $W.m^{-2}$ olarak belirler. Karşılaştırma için, bu, jeolojik aktif bölgelerin etrafındaki yerel enerji girişi çok daha yüksek olabilse de, Dünya yüzeyine ulaşan net akıdan yaklaşık iki kat daha düşüktür.

Yeraltı sıvı su olasılığı, Europa'yı Dünya dışı yaşam arayışındaki ana hedeflerden biri haline getirdi. Okyanusun bileşimi veya kayalık bir çekirdekle etkileşimlerinin doğası üzerinde çok az kısıtlamamız olduğu için, yaşamı destekleyip destekleyemeyeceği konusunda güvenilir yorumlar yapmak zordur. Okyanus $MgSO_4$, NaCl veya farklı tuzların karışımlarını içerebilir.

Europa yaşam için uygunsa, ortaya çıkan bariz sorulardan biri şudur: potansiyel enerji kaynakları nelerdir? Bölüm 5'te öğrendiklerinize dayanarak makul redoks çiftlerini düşünmek isteyebilirsiniz. Metanojenez bir olasılık olabilir, ancak iç kısım çok indirgenmiş olsaydı, karbonun çoğu CO_2 değil CH_4 olarak dışarı atılır ve bu da CO_2'yi metanojenler için kullanılabilir CO_2'yi sınırlı hale getirirdi (her ne kadar CH_4'ün kendisi bir elektron donörü olsa da ve Europa'nın yüzeyinde suyun ışınlanmasıyla üretilen O_2'le oksitlenebilir). Ya çekirdekten üretilen hidrojen ya da meteoritik bombardımanla taşınan ve yüzeyden okyanusa karışan ya da yeterince enerjik etkilerle doğrudan ona verilen organikler, demir veya sülfat indirgemesi için potansiyel elektron vericileri olabilir. Oksitlenmiş demir, kayalık çekirdekten veya meteoritik bombardımandan gelirdi. Sülfatların zaten ayın yüzeyinde olduğu bildirildi. Buz kalınlığı kesinlikle okyanus fotosentezini engelliyor.

Enerji kaynakları var olsaydı bile, yaşamın hangi fiziksel streslere maruz kalacağını bilmiyoruz. Karasal yaşamın replikasyonu için güvenilir şekilde gözlemlenen en düşük sıcaklık yaklaşık –15°C'dir (Bölüm 7). Europa okyanusu bundan daha soğuk olabilir. Tuz konsantrasyonlarıyla bileşimleri ve bunların donma noktasını düşürme potansiyelleri bilinmeden okyanus sıcaklığını doğru bir şekilde tahmin etmek zordur. Bununla birlikte, kayalık çekirdek içindeki gelgit ısınması, ömür boyu sınırlar içinde sıcaklıklara sahip yerel sıvılar üretebilir.

Okyanuslardaki basıncı tahmin edebiliriz. Bir sıvı sütunu altındaki basınç ρgd'yle verilir. 1100 $kg.m^{-3}$ olarak verilen bir okyanus yoğunluğunu (ρ) Dünya ve Europa üzerinde çok kaba bir tahmin olarak varsayabiliriz (her ne kadar Euro-

pa'nın okyanuslarının bileşimini bilmesek de). Kütleçekim ivmesi g, Dünyada 9,8 $m.s^{-2}$ ve Europa'da 1,31 $m.s^{-2}$'dir. Europa okyanusunun dibinin derinliği yaklaşık 130 km olabilir (Dünyanın en derin okyanus hendeği olan ve canlıların büyüdüğü bilinen yaklaşık 11 km'deki Mariana Çukuruyla karşılaştırınız). O zaman, Europa okyanusunun dibindeki basıncın, Dünyadaki en derin okyanus habitatlarının yaklaşık 1,6 katı olduğunu söyleyebiliriz. Bu çok daha büyük değil. Basıncın kendi başına yaşamı engellemesi pek olası değildir.

Radyasyonun yaşam için bir sorun olması pek olası değildir. Europa'nın yüzeyi, yalnızca bir metrelik bir buz derinliğinde, ağırlıklı olarak elektronlar tarafından yoğun bombardımana maruz kalsa da, bu dozların Dünyanın alt yüzeyinin yakınında bulunan değerlere düşmesi bekleniyor. Europa'nın yüzeyindeki dozun yaklaşık 5,4 $Sv.gün^{-1}$ olduğu tahmin edilmektedir – bir insanı öldürmek için 4,5 Sv yeterlidir.

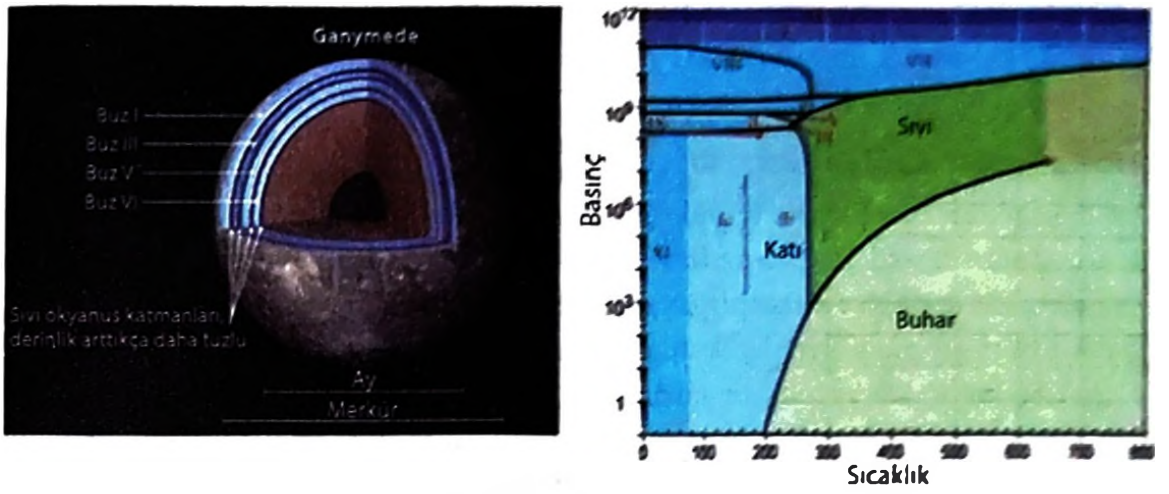
Europa okyanus ortamının en iyimser değerlendirmeleriyle bile, fotosentetik olarak üretken bir biyosferin olmaması, okyanusu Dünyanın biyosferinden on kat daha az üretken hale getirecektir. En iyimser tahminler, yaklaşık 1 hücre cm^{-3} (yaklaşık 10^{18} g olan Dünyayla karşılaştırıldığında) 10^{11}–10^{15} g sabit durum biyokütlesi seviyesinde değerler verir. Europa'daki yaşamı tespit etmeye çalışırken kullanılan yöntemler için bu sayının sonuçlarını düşünmek isteyebilirsiniz.

18.3 Jüpiter'in Uyduları: Ganymede ve Callisto

Jüpiter'in bir başka Galilei uydusu olan Ganymede, 5268 km çapıyla Güneş Sistemindeki en büyük uydudur. İndüklenen bir manyetik momentin ölçümü, Europa'da olduğu gibi, bir yeraltı okyanusunun varlığını akla getiriyor.

Europa'nın aksine, uydunun yoğunluğuna ilişkin modeller, yüzeydeki buz tabakası ile derin iç kısımdaki buz arasında buzlu bir okyanusun sıkışabileceğini öne sürüyor. Uydu içinde birden fazla su katmanı bile olabilir. Bu sandviç yapısının nedenleri suyun faz diyagramı dikkate alınarak anlaşılabilir (Bölüm 2 ve Şekil 18.7). Gezegensel bir iç kısma inildikçe, daha yüksek sıcaklık buzu eritme eğiliminde olacaktır. Bununla birlikte, gezegensel iç kısımdaki aşırı yüksek basınçlar buz oluşturma eğiliminde olacaktır. Ayrıca, tuz içeriğindeki artışlar donma noktasını düşürecektir. Bu etkileşimli faktörler, değişen su/buz katmanlarının oluşumuna izin verebilir.

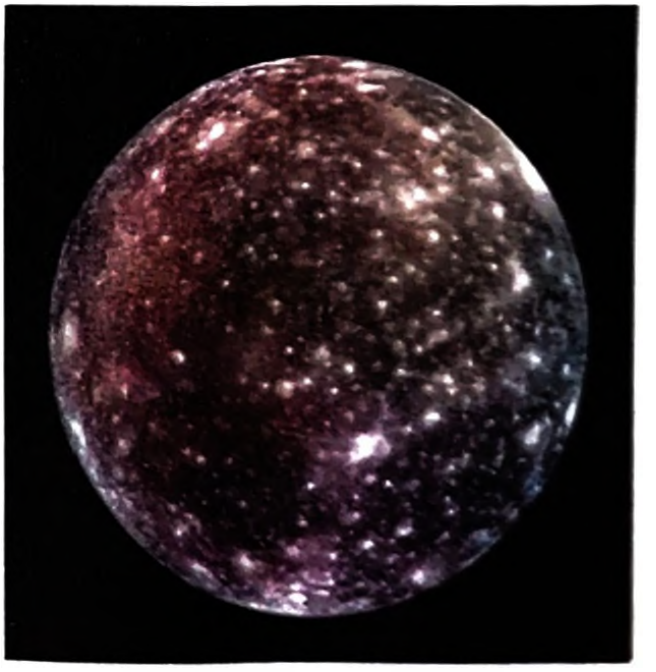
Bu sandviç konfigürasyonun etkileri, yaşanabilir bir ortam olarak iç okyanus için önemli olabilir. Europa özelinde, kayalık bir iç kısım boyunca sirkülasyon, eğer böyle bir sirkülasyon meydana gelirse, okyanus suyunun silikatlardan taşınan katyonları ve anyonları içereceği anlamına gelir. Bu nedenle, sıvı suyun kayalık bir iç kısımla etkileşiminin, redoks reaksiyonları için elementler ve bileşiklerin yanı sıra biyo-esansiyel elementlerin mevcudiyeti olasılığını artıracağı varsayılabilir. Ganymede özelinde, eğer sıvı su iki buz tabakası arasın-



Şekil 18.7 Solda: Ganymede'nin iç yapısı için, farklı yüksek basınçlı buz formlarını (buz I, V ve VI dâhil) ve bunların arasına sıkıştırılmış sıvı suyu gösteren olası bir karmaşık yapı. Ay ve Merkür'ün boyutu karşılaştırma için gösterilmiştir. Sağda: Bir gezegen gövdesi içinde yeterince yüksek basınçlarda, yeni katı buz formlarının (maviyle gösterilen ve Romen rakamlarıyla gösterilen) nasıl var olabileceğini gösteren bir faz diyagramı. Sağdaki faz diyagramı, Ganymede'de bulunanlar da dâhil olmak üzere bir dizi buz fazı için sıcaklık ve basınç koşullarını gösterir. Dünyadaki tipik buz, Buz Ih'dir (Kaynak: NASA).

da sıkıştırılırsa, o zaman dışsal dağıtım dışında, su içinde jeokimyasal dönüşüm veya su-kaya etkileşimleri yoluyla iyon içeriğinin arttırılması için çok az olasılık vardır.

Europa ve Ganymede'ye benzer şekilde, Galilei uydularının (4800 km çapında) dış kısmı olan Callisto (Şekil 18.8) da indüklenmiş bir manyetik momente sahiptir ve bir yeraltı okyanusunu barındırabilir. Ganymede ve Callisto'nun daha yaşlı kraterli yüzeyleri, jeolojik aktivitenin ve okyanus-yüzey etkileşiminin Europa'dan çok daha az yoğun olduğunu öne sürüyor; bu, Jüpiter'den uzakta oldukları için deneyimledikleri daha küçük gelgit kuvvetleriyle tutarlı olacaktır. Her iki durumda da sıvı su yüzeyin 200 km altında olabilir.



Şekil 18.8 Callisto (Kaynak: NASA).

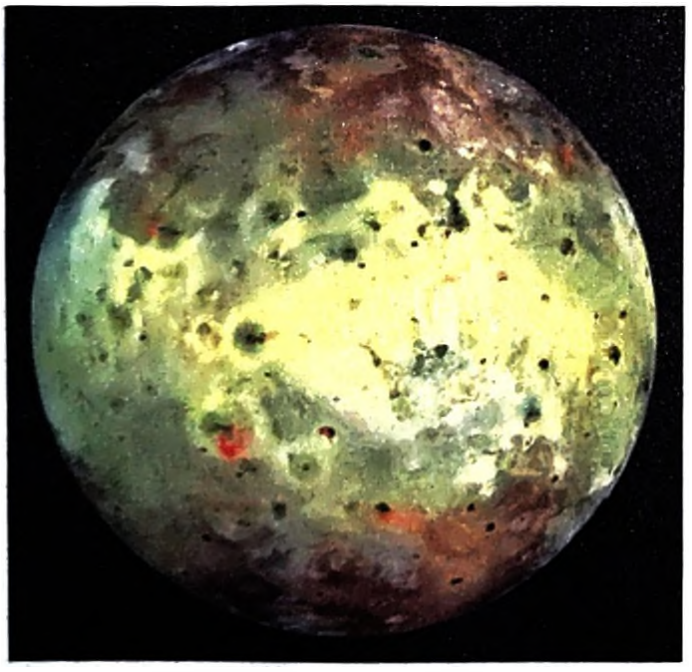
Jüpiter'in uydularının özellikleri arasındaki farklar, insanlığın Dünyanın ötesine uzun mesafeli akınlarını planlayan hırslı bireyler tarafından fark edilmedi. Callisto'da deneyimlenen nispeten düşük

yüzey radyasyon akısı ve jeolojik olarak kararlı yüzeyi, onu dış Güneş Sistemindeki bir durak olabilecek bir yer haline getirdi.

18.4 Jüpiter'in Uyduları: Io

Io, Ayımızdan biraz daha büyük (3642 km) kükürt bakımından zengin bir silikat uydudur (Şekil 18.9). Bazıları Everest Dağından daha yüksek olan 100'den fazla volkanik dağa ev sahipliği yapan aktif volkanizmaya sahiptir. Erimiş silikat malzemeyi püskürten volkanlar, aynı zamanda, Dünyadan dört kat daha az olan 2,56 $km.s^{-1}$ kaçış hızının yardımıyla, uyunun yüzeyinden 500 km uzağa kükürt ve SO_2 püskürtür. Bu materyal uydunun yüzeyinde yoğunlaşır ve radyasyonla işlenerek olağanüstü renkleri elde edilir. Jüpiter'e Europa'dan daha yakın olan, yaşadığı ve 100 m'lik bir gelgit çıkıntısı oluşturabilecek yoğun gelgit kuvvetleri, etkinliğini açıklar. Sıvı su için hiçbir kanıt olmadığı için prebiyotik kimyaya veya yaşam varlığına bakmak pek makul bir hedef değildir. Bununla birlikte uydu, jeolojik araştırmaların bir hedefi olarak, kükürt kimyası ve aktif volkanizması, onu daha genel olarak gezegenimsilerde ilkel kükürt ve kükürt kimyasının kaderini anlamak için önemli bir yer haline getirir. Aynı zamanda, gaz devlerinin yörüngesinde dönen uyduların çeşitliliğine ve farklı gelgit rejimlerinin etkisine ilişkin daha sentetik bir görüşü tamamlaması bakımından, astrobiyologların ilgisini çeken buzul uydularla mükemmel bir karşılaştırma sağlar. Sıvı suyun kararlılığı ve kalıcılığı için büyük gelgit kuvvetlerinin şiddetli sonuçlarının altını çizmektedir.

18.5 Satürn'ün Uyduları: Enceladus

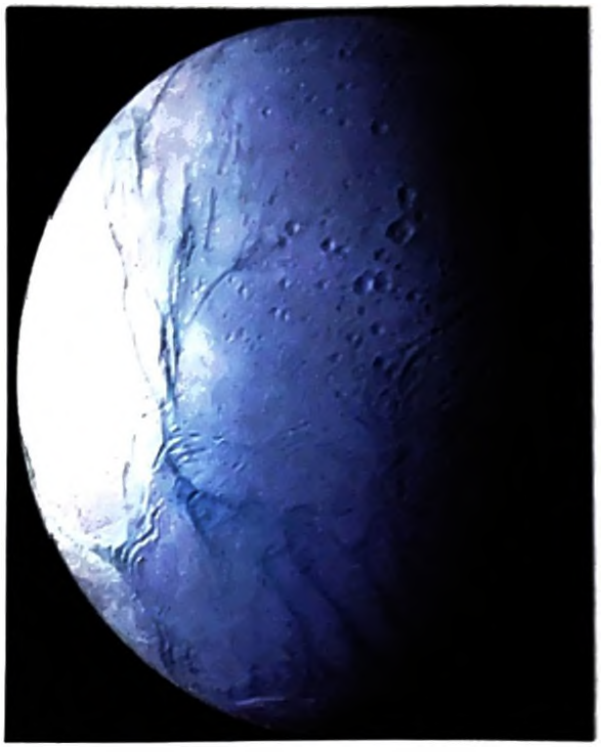


Şekil 18.9 Io (Kaynak: NASA).

Şimdi Güneş Sisteminde dışa doğru giderek Satürn'e geçiyoruz. Jüpiter gibi bu gaz devi etrafındaki yörüngede, astrobiyologların ilgisini çeken olağanüstü gezegenimsiler buluyoruz.

Satürn'ün uydusu Enceladus büyük ilgi gördü. 1789'da William Herschel tarafından keşfedilen Enceladus, su buzu yüzeyine sahiptir. Satürn'e ve halkalarına yakındır, bu da Dünyadan görülmesini zorlaştırır. Uydu, Satürn'ün E-halkasının en yoğun kısmına gö-

mülüdür ve uydudan fırlatılan materyalin Satürn'ün E-halkasını beslemede önemli bir rol oynadığı düşünülmektedir. Enceladus'un belki de en ayırt edici özelliklerinden biri, 504 km çapında küçük bir uydu olmasıdır. Bölümün başında belirtildiği gibi, bu şaşırtıcıdır çünkü hiç kimse, yüzeyinde sıvı suyu destekleyemeyen bu kadar küçük bir cismin astrobiyologlarla herhangi bir ilgisi olabileceğini hayal edemezdi.



Şekil 18.10 Enceladus'un yansıtıcı yüzeyi (Kaynak: NASA).

1980'de Voyager 1 ve 2, Enceladus'un doğası hakkında ilk görüntüleri ve bilgileri sağladı (Şekil 18.10). Voyager 1, Europa'dan farklı olarak, birkaç çarpma kraterine sahip oldukça yansıtıcı bir yüzey gördü. Europa için olduğu gibi bu veriler jeolojik olarak genç bir yüzey önermektedir. Voyager 2, orta ila yüksek kuzey enleminde yoğun bir şekilde kraterli bir bölge ve ekvatora daha yakın hafif kraterli bir bölge keşfetti.

Enceladus'un yüzeyinde, farklı bölgelerde farklı seviyelerde kraterler bulunur. Var olan tüm kraterler, Europa gibi jeolojik olarak genç ve aktif bir yüzeyin göstergesi olan deformasyon ve bozulma belirtileri göstermektedir. Uydudaki en çarpıcı özelliklerden bazıları, güney kutup bölgesindeki 500.000 yıldan çok daha genç olan 'kaplan çizgileri'dir (Şekil 18.11). Bunlar 100 km uzunluğunda ve yaklaşık 2 km genişliğinde sırtlardır.

Odak Noktası: Astrobiyologlar. Hunter Waite.



Hangi konu üzerine çalışıyorsunuz? Güneş sisteminin oluşumunu ve içindeki yaşamın ortaya çıkışını anlamak amacıyla Jüpiter ve Satürn'ün uydularının bileşimini inceliyorum.
Nerede çalışıyorsunuz? San Antonio, Texas'ta kar amacı gütmeyen bir araştırma kuruluşu olan Southwest Araştırma Enstitüsünün Uzay Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde çalışıyorum.
İlk uzmanlık alanınız neydi? Fizik, Kimya ve Matematik.
Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz? En çok ilgilendiğim sorular şunlar: (i) Güneş Sistemi nasıl oluştu; (ii) Dünyada

yaşam ilk olarak nasıl başladı; (iii) Güneş sisteminin başka yerlerinde yaşam var mı? (iv) Varsa, Dünyadaki yaşama benziyor mu; ve (v) diğer yıldız sistemleri bizimkine benzer bir evrim süreci mi izledi?

Astrobiyoloji alanında sizi heyecanlandıran nedir? Astrobiyoloji birçok farklı disiplini bir araya getirir: fizik, kimya, biyoloji ve jeoloji bunlardan birkaçıdır. Yeni ve özgün gezegenimsileri açıklamak için tüm bu bilgileri bir araya getirmek, zevk aldığım özel bir ayrıcalık.

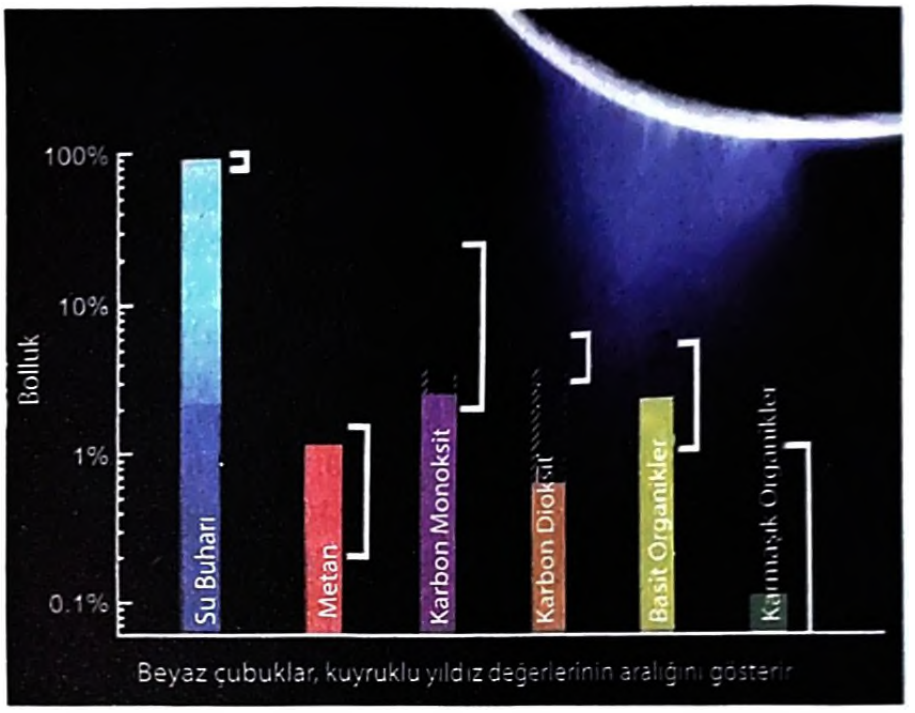
18.5.1 Enceladus'un Gayzerleri

Cassini görevi sırasında, kaplan çizgilerinin yakınında uydunun güney kutbundan püsküren su ve gaz fışkırmaları gözlemlendi (Şekil 18.12). Cassini bir yaşam tespit görevi olarak tasarlanmamıştı, ancak gazları ve karbon bileşiklerini inceleyebilen spektrometrelere sahipti. Görev profilinde yapılan bir revizyon, su, metan, karbondioksit, propan, etan, asetilen ve karmaşık organik maddeler içerdiği tespit edilen gayzerler arasında geçişe izin verdi. Yaklaşık %0,5 NaCl ve %0,5 $NaHCO_3$'ün varlığı, gayzerlerin hafif alkali (pH 8,5–9,0) bir su kütlesinden gelen suyu temsil ettiğini gösterir. Encedalus'un karbon içeren bileşenlerinin konsantrasyonlarının kuyruklu yıldızlarla bazı benzerlikleri vardır, bu da ilkel bir kökene işaret eder.

Gayzerler, astrobiyolojide bariz ve önemli soruları gündeme getiriyor. Su ve organik bileşiklerin varlığı birkaç olasılığa işaret eder: (i) ilkel organik maddelerin uyduda işlenip uzaya fırlatıldığı, (ii) uydunun içinin dev bir organik kimya reaktörü olduğu (ki bu da, içinde prebiyotik moleküllerin sentezinin içinde



Şekil 18.11 Enceladus'un kaplan çizgileri, Cassini'nin birleşik kızıl-altı spektrometresi tarafından ölçüldüğü gibi, çevrelerindeki sıcaklıkları (K olarak) gösteriyor. Veriler, kaplan şeritlerinin yakınında ısınmanın kanıtlarını gösteriyor (Kaynak: NASA).



Şekil 18.12 Enceladus'tan fışkıran su bulutlarının (içteki metin)bileşimi ve miktarı. Beyaz çubuklar, kuyruklu yıldız değerlerinin aralığını gösterir (Kaynak: NASA).

meydana gelip gelmediği sorularını ortaya çıkarıyor), (iii) yaşam için bir habitat olabileceği.



Şekil 18.13 Enceladus'un buz kabuğu içinde sıvı su oluşumu için bir model. Gelgit ısınması suyu eriterek, uydudan kırıklar halinde püskürtülen dâhil i basınçlı su üretir (soğuk gayzer modeli; Kaynak: NASA).



Şekil 18.14 Gelgit ısınması, kaplan şeritlerinin etrafındaki güney kutup bölgesinde yerel ısınmadan ve bu iç şemada kırmızı ve sarıyla (buz içinde) gösterilen o bölgede ölçülen (Şekil 18.11) daha yüksek sıcaklıklardan sorumlu olabilir (görsel: NASA).

Enceladus'un gayzerlerinin astrobiyolojik potansiyelini değerlendirmenin bariz bir yolu, buralardan malzeme toplamak ve onu Dünyaya getirmek için bir örnek iade görevi uygulamak olacaktır.

Gayzerlerin kökeni belirsizdir, ancak bunların tuzlu bir iç okyanus veya gölden yüzey çatlaklarından kaçan materyal olduğu düşünülmektedir. Şekil 18.13, buzun gelgit ısınması ve uydu içinde basınçlı iç su kütlelerinin oluşumu için bir modelin şemasını göstermektedir. Cassini uzay aracı tarafından yapılan kütleçekim ölçümleri, kayalık bir çekirdeğin üzerinde yaklaşık 15 km kalınlığında ve yaklaşık 30 km buzla kaplı bir yeraltı okyanusu olabileceğini gösteriyor.

Enceladus'un güney kutup bölgesinde, buzu eritmek, sıvı su oluşturmak ve 'soğuk gayzerlerde' kaplan çizgilerinden dışarı atılacak materyale basınç oluşturmak için gerekli enerjiyi sağlayabilen ısınmanın (Şekil 18.14) kanıtı vardır.

Tartışma Noktası: Okyanus dünyalarının keşfi

Gezegenimsilerin buz örtülerinin altındaki Dünya dışı okyanusların keşfi, astrobiyolojide geleceğin en etkileyici sınırlarından biridir. Bu okyanusların ıssız olduğu ortaya çıksa bile, bize Evrendeki sulu ortamların jeokimyası ve bu ortamlarda yaşamın kökeni ve ortaya çıkması için nelerin eksik olabileceği hakkında bilgi verecektir. Ancak, bu okyanuslara erişim son derece zor olacaktır. Bu cisimlerin bazılarındaki buz kalınlığının yaklaşık 10 ila 100 km arasında olabileceğini varsayarak, bu ortamlara erişmek için ne tür yöntem ve teknolojilerin kullanılabileceğini tartışın. Europa ve Enceladus gibi bazı yerlerde suyun yüzeye çıktığına dair kanıtlar var. Bu tür örnekleri toplama görevi, okyanuslara doğrudan girişten daha az iddialı olsa da, okyanustan doğrudan bir örnek almaya kıyasla, tüylerden ve yüzey özelliklerinden hangi verilerin toplanabileceğini tartışın. Yüzey örneklerini değiştirmiş olabilecek ve yüzey veya bulut örneklerinde organik madde veya yaşam arayışını tehlikeye atabilecek süreçleri listeleyin ve tartışın.

McKay, C.P., Porco, C.C., Altheide, T., Davis, W.L., Kral, T.A. (2008) The possible origin and persistence of life on Enceladus and detection of biomarkers in the plume. *Astrobiology* **8**, 909–919.

Odak Noktası: Astrobiyologlar: Ralph Lorenz



Hangi konu üzerine çalışıyorsunuz? Çok geniş ilgi alanlarım var, ancak gezegen atmosferleri ve yüzeyler arasındaki etkileşim, Titan'daki hidrokarbon denizlerinden ve Mars'taki toz şeytanlarından Venüs'teki kum tepelerine kadar kapsayıcı bir tema. Çalışmalarım, Dünyadaki analogları incelemeyi, modellemeyi ve veri analizini, ancak özellikle gezegensel keşif için aletlerin ve uzay araçlarının tasarımını ve işleyişini içeriyor.

Nerede çalışıyorsunuz? Maryland'deki Johns Hopkins Üniversitesi Uygulamalı Fizik Laboratuvarında (Washington, D.C., ABD yakınlarında). Burası NASA, Amerika Birleşik Devletleri Donanması ve diğer devlet kurumları için çalışan ve birçok uzay aracı ve enstrümanı inşa eden bir laboratuvardır.

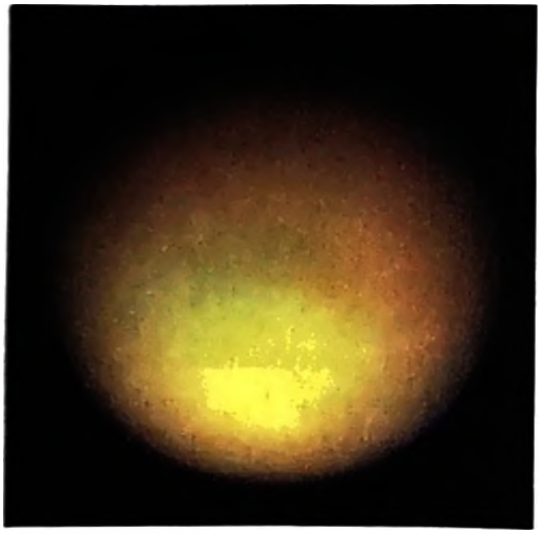
İlk uzmanlık alanınız neydi? Birleşik Krallık'taki Southampton Üniversitesinde Havacılık ve Uzay Sistemleri Mühendisliği. Daha sonra Fizik alanında doktora yapmadan ve daha çok bilime doğru ilerlemeden önce Avrupa Uzay Ajansı için bir yıl çalıştım.

Hangi bilimsel soruları ele alıyorsunuz? O sırada en ilginç görünen ne varsa! Uzay aracıyla gezegen araştırmasının doğası, birkaç yılda bir tamamen yeni bir pencerenin açılmasıdır – ister Huygens sondasından Titan'da ilk yerinde yüzey kimyası ölçümlerini yapmak için bir araç olsun (inşasında rol oynadım), Dünyanın çöllerindeki toz şeytanlarını ve Venüs'ün küresel radar haritalarını incelememize izin veren yeni veri kaydı araçları. Bu yeni yetenekler ve veri kümeleri genellikle yeni analiz yaklaşımlarını veya laboratuvar araştırmalarını veya eski veri kümelerinin yeniden incelenmesini teşvik eder.

Astrobiyolojide sizi heyecanlandıran nedir? Astrobiyoloji, hepsi ilginç olan çok çeşitli bilimsel disiplinlere değinir. Çalışmalarımın çoğu, yeni görevler formüle etmek –tam olarak neyi nasıl ölçmemiz gerektiğini bulmaya çalışmak– etrafında dönüyor. Genellikle jeofizik soruları etrafında odaklansa da, bazen doğrudan astrobiyolojiye değinirken (Titan'ın hidrokarbon denizlerinde hangi kimyasal sentez süreçlerinin meydana geldiği ve prebiyotik kimyasal süreçlerin kanıtlarını nasıl tespit edeceğimiz gibi), bazen dolaylı olarak gezegenlerin korunması gibi konular aracılığıyla dolaylı olarak değinir. (Örn. bir Mars iniş aracının steril edilmesinin gerekip gerekmediği).

18.6 Satürn'ün Uyduları: Titan

Satürn'ün en büyük uydusu olan Titan, Ganymede'den sonra Güneş Sistemindeki en büyük ikinci uydudur (5152 km çapında, Dünyanın 0,40 katıdır). Merkür'den bile daha büyüktür (Merkür, Dünyanın 0,38 katı bir çapa sahiptir). Titan, Güneş Sistemindeki önemli bir atmosfere ve Dünyadan çok daha büyük bir yüzey basıncına sahip tek uydudur. Yüzeyde, Dünyanın (10^{20} molekül cm^{-3}) yaklaşık dört katı bir atmosferik yoğunluğa sahiptir. Galilei uydularına benzer şekilde ve aynı nedenlerle gelgit kuvvetleri onu da kütleçekimsel olarak kilitlemiştir –Satürn'ün etrafında eşzamanlı olarak dönmektedir.



Şekil 18.15 Cassini uzay aracı tarafından görüntülenen görünür dalga boyu aralığındaki Titan'ı kaplayan homojen sisi gösteriliyor (Kaynak: NASA).

Uydu, Hollandalı astronom ve fizikçi Christian Huygens (1629–1695) tarafından keşfedildi ve 1940'larda astronom Gerard Kuiper (1904–1975), metan içeren bir atmosfere sahip olduğunu göstermek için soğurma spektroskopisini (Bölüm 2) kullandı. Titan ilk olarak 1980 yılında Voyager 1 tarafından sarı-turuncu bir top olarak gözlemlendi (Şekil 18.15) ve şu anda Titan hakkında sahip olduğumuz ayrıntılı bilgilerin çoğu, 2004 yılında NASA'nın Cassini uzay aracı (NASA-ESA ortak görevinin bir parçası olan Cassini– Huygens) tarafından Dünyadan yedi yıllık bir yolculuktan sonra Satürn sistemine ulaştığında elde edildi.

Voyager gemisindeki Radyo Bilimi Sistemi (RSS), atmosfer hakkında ayrıntılı bilgi gönderen ilk araçtı. Radyo bölgesinde çalıştığı için sis tabakasından etkilenmeden, yüzeydeki sıcaklığın 94 K olduğunu ve yüzeydeki atmosfer basıncının 1,6 bar olduğunu göstermeyi başarabildi.

Titan'ın stratosferindeki atmosferinin bileşimi kabaca %98,4 nitrojen, %1,4 metan ve kalan %0,2 hidrojenden oluşur. Yüzeye yakın yerlerde metan konsantrasyonları %4,9'a yükselir.

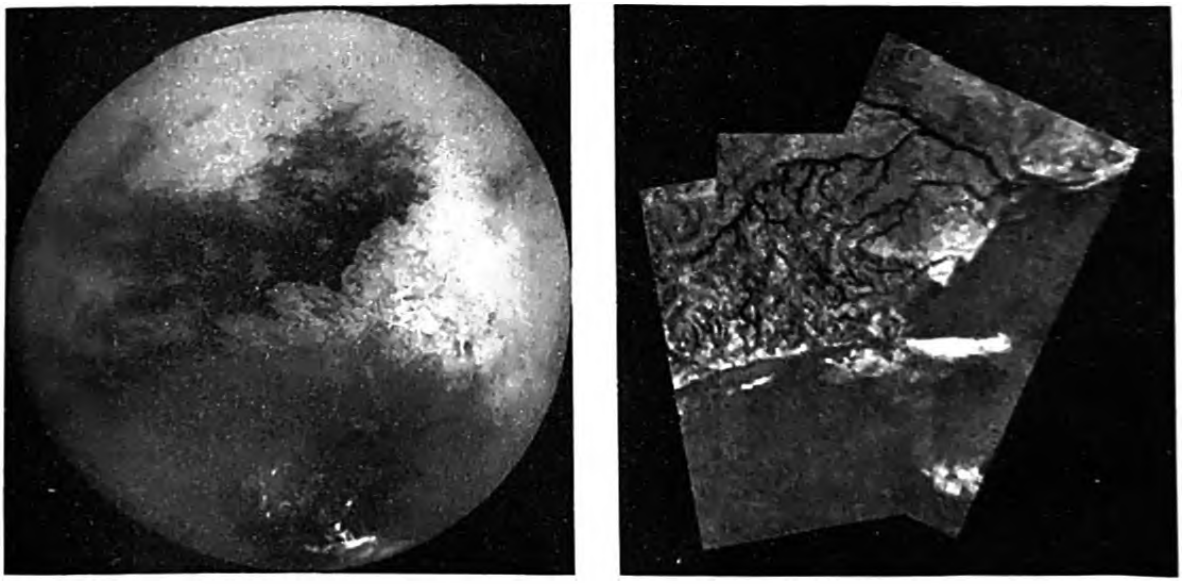
Uydu, zengin çeşitlilikte organik moleküller içeren yüksek irtifalarda yoğun turuncu renkli bir hidrokarbon dumanına sahip olmasıyla Dünyadan kolayca görünür. Hidrokarbon dumanı, atmosferde yüksek moleküllerin iyonlaşmasıyla, özellikle de Güneşten gelen UV radyasyonuyla üretilir. İyonize moleküller, diğer iyonize ve nötr moleküllerle reaksiyonlara girerek etan ve propan gibi karbon bileşikleri üretir ve bunlar sonunda atmosferden yağar ve yüzeyde birikir. Bu hidrokarbonların bazılarının, sisin turuncu-kahverengi rengini açıklayan, genel olarak tholin olarak adlandırılan çeşitli yapıların karmaşık molekülleri olduğu düşünülmektedir. Cassini uzay aracı, organik maddeleri ilk tespit eden Voyager uzay aracında öncü kızıl-altı ölçümleri takip etmek için bir kızıl-altı spektrometre kullandı. Daha önceki bulguları doğrulamanın yanı sıra benzen (C_6H_6), hidrojen siyanür (HCN), etin (asetilen) (C_2H_2) ve diğer molekülleri de tespit etti.

Titan'ın atmosferik kimyası, üst atmosferin UV ışımasıyla üretilen bir dizi radikal tarafından yönlendirilir ve bunların tümü temel olarak metanla başlar. Metan, CH_4, birbirleriyle reaksiyona girerek metil radikali CH_3'ü üretebilen CH_2 ve H_2'yi üretmek için UV ışımasıyla fotolize edilebilir. İki metil radikali, atmosferden Titan'ın göllerine yağan etan (C_2H_6) üretmek için reaksiyona girebilir.

Metan ve CH radikali arasındaki reaksiyonlar eten (C_2H_4) ve etin (C_2H_2) üretebilir. Etin, kahverengi-turuncu bulanıklıktan sorumlu uzun zincirli hidrokarbonları oluşturmak üzere yeniden birleşen radikaller üretmek için UV aralığında Güneş ışığıyla reaksiyona girebilir. Titan atmosferinin çoğunu oluşturan nitrojen gazı fotolize olduğunda ve nitril bileşikleri (CN bağları içeren) üretmek için tartıştığımız bazı radikallerle reaksiyona girebilen N radikalleri ürettiğinde daha karmaşık kimya meydana gelir.

Cassini uzay aracı Satürn sistemine ulaştığında, 2005 yılında bulut katmanından yüzeye başarılı bir iniş yapan Huygens adlı küçük bir sondayı da beraberinde götürdü. Titan'ın atmosferi hakkında bilgi verirken, ürünleri bir Gaz Kromatografı/Kütle Spektrometresini (GCMS) besleyen Aerosol Yakalama ve Piroliz Cihazı (ACP) kullanarak hidrokarbonları da inceledi. Bu aletler, atmosferin bir buz tabakası ve uçucu maddelerle çevrili karmaşık hidrokarbonlardan oluşan bir çekirdekten oluşan parçacıklarla dolu olduğunu doğruladı.

Bu çeşitli bileşiklerin üretiminin muazzam olduğu hesaplanmıştır. Tahminler, Güneş Sisteminin ömrü boyunca, eğer bugün meydana gelen süreçlerin uydunun tarihi boyunca meydana geldiği varsayılırsa, 600 m kalınlığında etan ve 20 m kalınlığında hidrojen siyanür tabakası olacağını gösteriyor! Ancak, Güneş Sisteminin tarihi boyunca bugün gözlemlenen süreçlerin aslında ne kadar sabit olduğunu bilmiyoruz.



(a) (b)

Şekil 18.16 (a) Titan'ın yüzey özellikleri. Solda, 26 Ekim 2004'te Cassini'nin ilk çok yakın uçuşu sırasında elde edilen işlenmiş dokuz görüntüden oluşan bir mozaik. Görüntü 15°G, 156°B üzerinde ortalanmıştır. Mozaiği oluşturan görüntüler, atmosferin etkilerini azaltmak ve yüzey özelliklerini keskinleştirmek için işlenmiştir. Yüzey özellikleri en iyi, uzay aracının doğrudan aşağıya baktığı diskin merkezine yakın bir yerde görülür; kontrast giderek azalır ve uzay aracının pusun içinden baktığı dışarıya doğru yüzey özellikleri daha bulanık hale gelir (Kaynak: NASA). *(b) Huygens iniş aracı tarafından atmosferden aşağı inerken çekilen ve metan nehirlerini ve bir kıyı şeridini gösteren bir görüntü* (Kaynak: ESA/NASA/JPL/Arizona Üniversitesi).

Titan'ın Cassini uzay aracı tarafından 928 nm'de kızıl ötesi ortamda görüntülenmesi, bilim insanlarının görünür bölgelerdeki yüzeyi gizleyen sisin içinden bakmalarına ve ilk kez yüzey özelliklerini görselleştirmelerine izin verdi.

Görüntüler kum tepeleri, kraterler, nehirler ve göller içeren, yeryüzüne benzer engebeli bir araziyi ortaya çıkardı (Şekil 18.16). Göllerin metan ve etan karışımı olduğu düşünülmektedir ve çoğunlukla kuzey yarımkürede bulunmaktadırlar. Birçok küçük göl var, ama aynı zamanda çok büyük olanlar da mevcut. Kraken Mare (Şekil 18.17) yaklaşık 400.000 km²'lik bir alanı kaplar, bu yaklaşık olarak Kaliforniya'nın kapladığı alanla aynı.

Dünyanın aksine, metan suyun oynadığı rolü üstlenir ve yüzeyde vadiler ile nehirlerin oluşmasından, ayrıca fotoayrışma tarafından yönlendirilen reaksiyonlar yoluyla kaybedilen atmosferik metanı yenilemekten sorumludur, aksi takdirde metan sadece birkaç on milyon yılda tükenirdi. Bunun tersine, su buzu, Dünyadaki silikat kayaçları gibi davranır ve bazılarını Titan'ın Huygens tarafından elde edilen yüzey görüntüsünde görebileceğiniz sert kayalar oluşturur (Şekil 18.18). Yuvarlak görünümleri, metan ile su buzunun şekillendirilmesinden kaynaklanmış olabilir. Bu garip metan güdümlü jeoloji, soğuk yüzey sıcaklıklarıyla mümkün olmaktadır.



Şekil 18.17 Kraken Mare, Titan'da mavi renkle gösterilen büyük bir kuzey gölü (sahte renk; Kaynak: NASA).

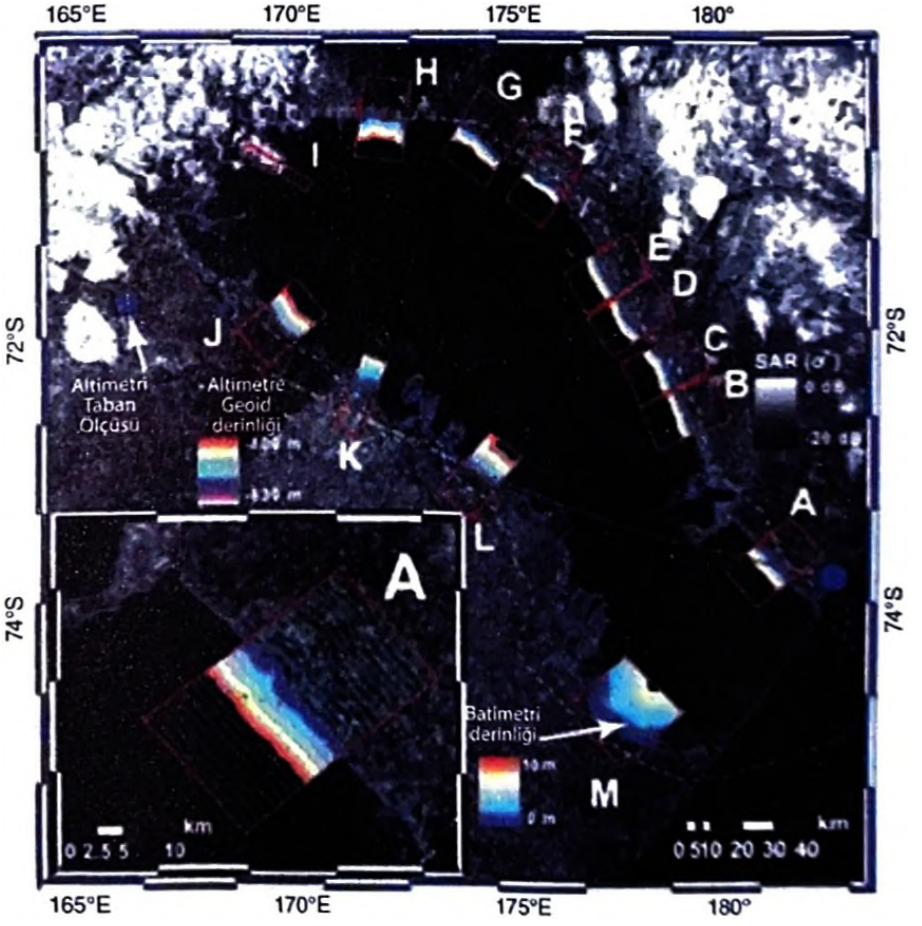


Şekil 18.18 Huygens sondası tarafından görüntülenen Titan'ın yüzeyi. Ön plandaki büyük kayalar su buzudur (Kaynak: ESA/NASA).

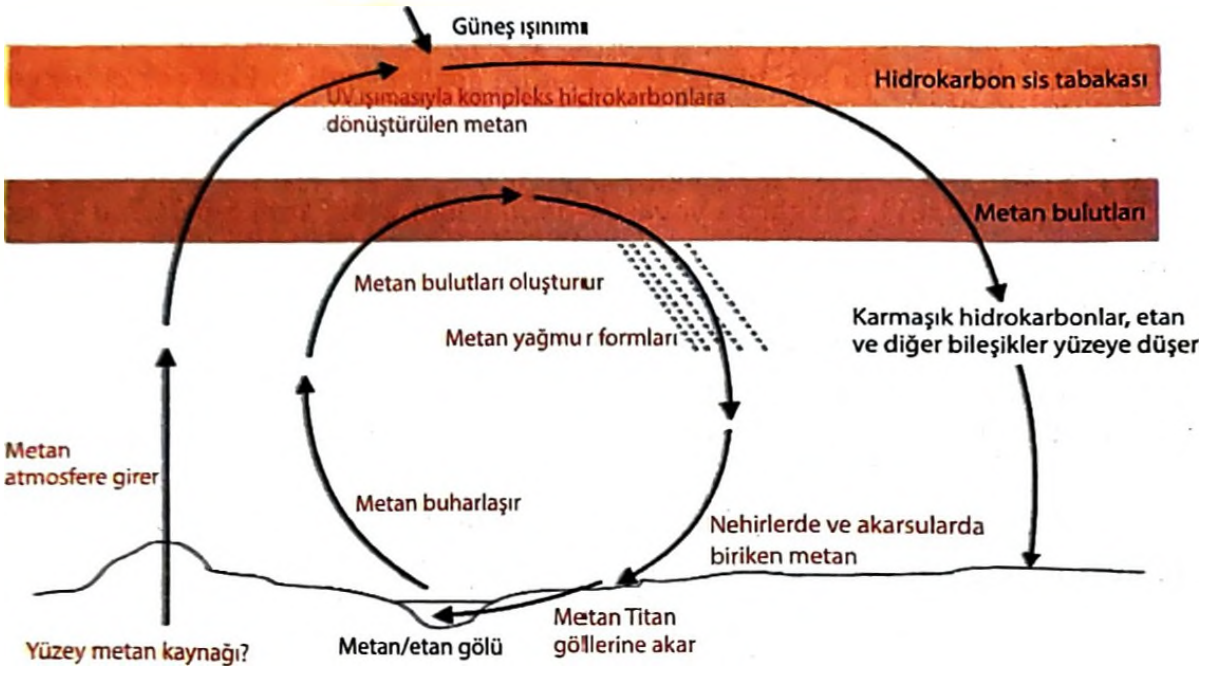
Cassini uçuşları ayrıca Titan'ın uzun zaman dilimlerinde çok aktif bir dünya olduğunu da göstermiştir. Titan'ın güney yarımküredeki en büyük gölü olan Ontario Lacus'un seviyesinin (Şekil 18.19), Satürn'ün yörüngesindeki değişiklik sonucu yaz aylarında uydunun Güneşe yaklaşmasıyla artan buharlaşma nedeniyle her dört yılda bir, bir metre azaldığı gözlemlendi. Dikkat çekici bir şekilde, bu, yüzey jeolojik (ve muhtemelen jeokimyasal) süreçleri çarpıcı biçimde etkileyen, yörüngesel olarak zorlanan uydudaki iklim değişikliğinin kanıtıdır.

Uydunun yüzeyi, rüzgârda yavaşça dalgalanan geniş kum tepelerine ev sahipliği yapar. Bu kum tepelerinin bizim dünyamızda olduğu gibi kumdan (kuvars) meydana gelmediği düşünülmektedir. Bunun yerine, kum tepeleri hidrokarbonlardan, uydunun yüzeyinde üretilen veya yüksek atmosferdeki organik işlemeden geriye kalan kalın tholin birikintilerinden oluşmuştur. Bu kum tepeleri ekvator bölgesinin yaklaşık %30'unu kaplarlar ve 100 m yüksekliğe kadar ulaşırlar.

Titan'da meydana gelen dinamik süreçler ile metan ve hidrokarbonların işlenmesi için genel şema Şekil 18.20'de özetlenmiştir.



Şekil 18.19 Ontario Lacus, Titan'da değişen göl seviyeleri (kırmızı bloklarla ve renkli çizgilerle gösterilmiştir), Titan'ın yüzeyinde aktif bir sıvı döngüsüne ve iklim değişikliklerinin varlığına tanıklık ediyor (Kaynak: Radar Science Team, NASA/JPL/Caltech).

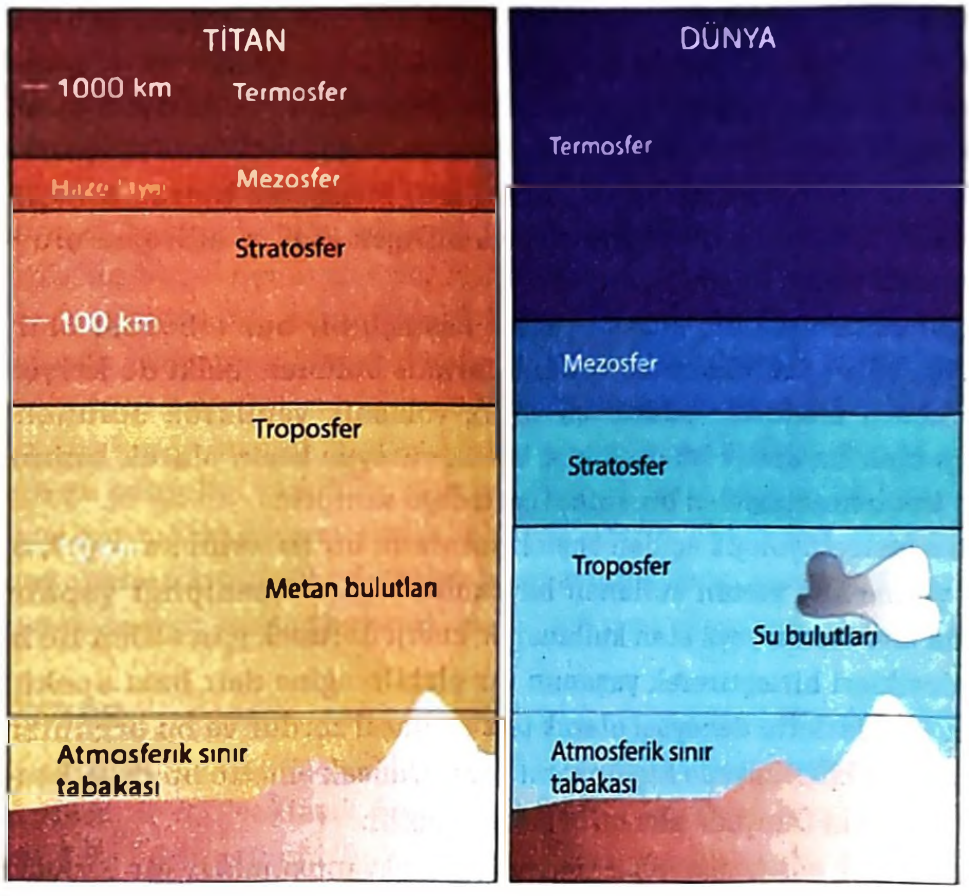


Şekil 18.20 Titan'daki metan ve hidrokarbon döngüsünü gösteren bir şema (Kaynak: Charles Cockell).

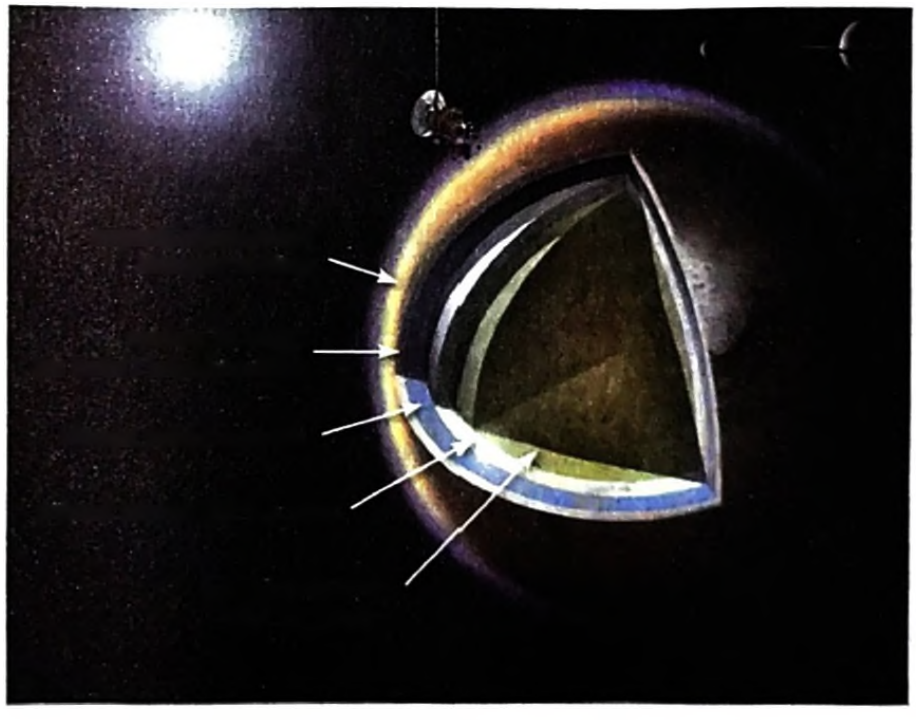
Titan ve Dünyanın, en azından iklim değişikliğine maruz kalan nehirleri ve gölleri oluşturan sıvı döngüleri açısından tuhaf benzerlikleri, atmosferik bileşime de yansıyor. Titan'ın atmosferi, Dünyanınkinden yaklaşık 200 K daha soğuk olmasına rağmen, Dünya atmosferine eşdeğer katmanlar içerir: troposfer, stratosfer, mezosfer ve termosfer. Titan'ın daha zayıf kütleçekim nedeniyle bu katmanlar dikey olarak gerilir (Şekil 18.21). Ozon tabakasındaki UV soğurumu nedeniyle Dünyanın stratosferinin sıcaklığı yükselerek artarken, Titan'ın üst atmosferinin sıcaklığındaki artış, Güneş ışığının hidrokarbon sis tarafından soğurulmasından kaynaklanmaktadır.

Titan'ın yüzeyinin altında başka astrobiyolojik sürprizler olabilir. Titan'ın kendi ekseni etrafında dönme hızındaki değişiklikler, uydu Satürn'ün yörüngesinde dönerken Titan'daki yüzey özelliklerinin yaklaşık 30 km yer değiştirebileceğini, gezegenin kütleçekim kilitli dönüşünden beklenecek olanla eşzamanlı olmadığını göstermiştir. Cassini'nin Titan'ın dönüşündeki küçük ama önemli bir eşzamansızlık ölçümü, kabuğun daha derindeki iç kısımdan sıvı bir katmanla ayrılmasıyla açıklanır. Yüzeyi, gelgit kontrollü iç kısımdan ayrılmış, düzensiz bir şekilde sallanıyormuş gibi düşünebilirsiniz. Bu gözlemler, bir sıvı okyanusunun kalın bir su buzu kabuğunun altında uzanabileceğini gösteriyor.

Titan'ın iç kısmının modelleri (Şekil 18.22), ısıl evrim de dâhil olmak üzere, uydunun, birkaç yüz kilometre derinlikte bir sıvı su okyanusu üzerinde uzanan



Şekil 18.21 Dünyaya kıyasla Titan'ın atmosferinin yapısı.



Şekil 18.22 Titan'ın önerilen yapısı (Kaynak: NASA).

ve %30'a kadar çıkabilen, amonyak içinde çözülen, antifriz görevi gören 50 ila 150 km kalınlığında kafes bileşikleri içeren bir buz kabuğuna sahip olabileceğini öne sürüyor. Erken ön gezegensel diskin buzlarından ve uçucularından oluştuğunda Titan'ın bileşimine karıştırılan sıvı amonyak da uydu atmosferindeki nitrojen kaynağı olacaktır. Amonyağın atmosferde UV radyasyonuyla NH_2 radikallerine parçalandığı ve bu radikallerin birleşerek hidrazin (N_2H_4) oluşturduğu ve kendisi de UV radyasyonuyla nitrojen gazı ve hidrojen oluşturmak üzere parçalandığı düşünülmektedir.

Okyanus tabakasının altında yüksek basınçlı bir buz tabakası olabilir. Titan'ın içi, yüzey özelliklerinde ve atmosferinde bulunan, belki de kriyovolkanlarda, uçucu maddeler püskürten soğuk volkanik yapılarda solunan metan kaynağı olabilir, ancak bu özellikler henüz yüzeyde kesin olarak tanımlanmamıştır. Uydu muhtemelen bir silikat çekirdeğe sahiptir.

Titan, astrobiyolojik açıdan önemli soruların bir listesini sunuyor, örneğin:

Su yerine sıvı metan kullanan bir canlı türüne ev sahipliği yapabilir mi? Titan'da sıvı metan veya etan kullanarak, enerji üretmek için etilen ile hidrojen gibi bileşikleri birleştirerek yaşamın var olabileceğine dair bazı spekülasyonlar var. Bu fikirlerin deneysel olarak test edilmesi zordur ve bu organizmaların varlığına ilişkin Dünyada hiçbir kanıt yoktur, ancak elbette bu düşük sıcaklıklı biyokimyaların Dünyada olması beklenmeyebilir.

Bu organik yüzey materyali, derin yeraltı okyanusundaki bir biyosferi besleyebilir mi? Yüzeyin altındaki sıvı su olasılığı, Titan'da yeraltının derinliklerinde yaşanabilir koşullar olma olasılığını artırır. Ancak bu araştırmayı ilerletebilmek için, bu yeraltı suyunun neler içerdiğini ve yaşamın gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını bilmemiz gerekiyor. Sanıldığı gibi amonyak içeriyorsa, aşırı alkali pH koşullarına sahip olacaktır. Okyanustaki farklı elementlerin konsantrasyonlarını veya biyolojik olarak mevcut enerji kaynaklarını içerip içermediğini bilmiyoruz.

Karmaşık organik yüzey bize prebiyotik kimya hakkında ipuçları verebilir mi? Titan yaşam için çok soğuk olsa bile, zengin hidrokarbon kimyası, prebiyotik moleküllerin oluşumu için önemli ipuçları sağlayabilir. Uyduyu, UV radyasyonunun neden olduğu organik materyal üretimi gibi süreçleri anlamak için dev bir organik kimya laboratuvarı olarak düşünebiliriz. Bize UV radyasyonunun ozon kalkanının oluşumundan önce erken Dünyadaki organik bileşiklerle nasıl etkileştiği hakkında bir şeyler söyleyebilirler. Özellikle, Titan'ın yüzeyinin altında bir su tabakası varsa, çarpma olayları gibi süreçler, su ve karmaşık organik bileşikler arasında kısa süreli etkileşimler ve hidroliz reaksiyonları aracılığıyla amino asitler gibi prebiyotik bileşiklerin oluşumuna yol açma olasılığı vardır (Bölüm 11). Çarpan bir cisim tarafından iletilen bir ısıl darbe, daha yüksek bölgesel sıcaklıklara ve hızlandırılmış reaksiyon oranlarına katkıda bulunacaktır.

18.7 Diğer Buzul Dünyalar

Şaşırtıcı bir şekilde, astrobiyologların ilgisi Jüpiter ve Satürn'le sınırlı kalmıyor. Güneş sisteminin daha da ilerisindeki diğer gezegenimsiler, yaşanabilirlik araştırmalarımız için ilgi çekici olabilir.

Bu uzak gezegenimsilerin bazıları sıvı su içerebilir. Buralarda yaşam olmasa bile, bize suya sahip bir kimyayı incelemek ve karbon veya prebiyotik molekülllerin işlenmesi hakkında bilgi edinmek için daha fazla jeokimyasal ortam sunarlar. Uranüs'ün buzul uyduları Ariel ve Miranda gibi bazı uydular, özellikleri tam olarak anlaşılmasa da astrobiyolojik hedefler olabilirler. Ortak kütle merkezleri etrafında eşzamanlı olarak dönen (birbirine doğru bakan) Plüton (yaklaşık Europa'yla aynı boyutta) ve uydusu Charon bile, su ve gezegen cisimlerinin etkileşimleri hakkında önemli bilgiler edinebileceğimiz jeokimyasal olarak aktif alt yüzeylere ev sahipliği yapabilir. Tüm bu olasılıklar bize suyun dağılımı, karbon kimyası ve evrendeki yaşanabilirlik hakkında çıkarımlar yapmak için kullanılan örnek boyutunun istatistiksel sağlamlığını artırma şansı sunuyor. Bu sıra dışı hedeflerden sadece ikisine bakarak bu bölümü tamamlayalım.

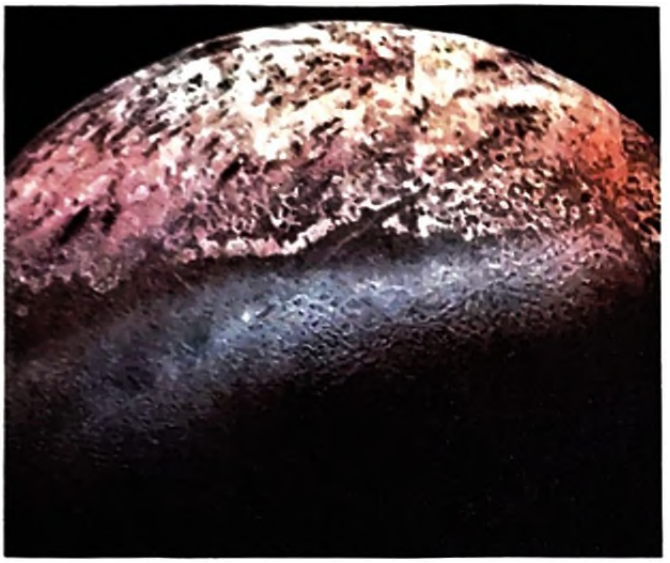
18.7.1 Triton

Neptün'ün en büyük uydusu Triton (2700 km çapında) geriye dönük bir yörüngeye sahiptir ve bu, yaklaşık üç veya dört milyar yıl önce Neptün tarafından yakalandığını ve Neptün'ün ön gezegensel diskinden oluşmadığını gösterir. Yakalanmış bir Kuiper Kuşağı cismi olması muhtemeldir.

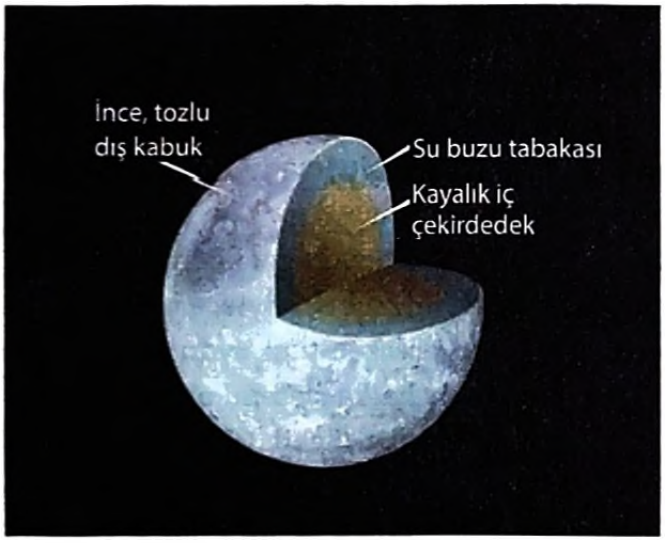
Neptün'ün gelgit kuvvetleri Triton'un içe doğru sarmal yapmasına neden olmaktadır (bu, dışa doğru hareket eden Ayımızdan farklıdır), böylece yaklaşık 3,6 milyar yıl içinde, uydu Roche sınırının içinden geçerken tüm uydu gelgit kuvvetleri tarafından yıkılacak ve Neptün için yeni bir halka sistemi oluşturacak.

Triton, donmuş nitrojen içeren bir yüzeye sahiptir (Şekil 18.23). Voyager 2 tarafından ölçülen yüzey sıcaklığı 36 K'dir. Uydunun kutuplarında donmuş metan vardır. Kabuk çoğunlukla su buzundan oluşur. İç yapısına ilişkin modeller, farklılaştığını göstermektedir. Europa gibi, radyoaktif ısınma muhtemelen jeolojik zaman dilimlerinde derin bir yeraltı okyanusunun oluşumuna neden olmak için yetersizdir, ancak gelgit ısınması meydana gelirse, derin yeraltı sıvı su oluşumuna izin verebilir. Uydunun buzlu bir mantoya ve kaya ile metalden oluşan bir çekirdeğe sahip olduğu düşünülmektedir. Çekirdek, kütlesinin yaklaşık üçte ikisini oluşturur.

Uydunun jeolojik olarak aktif olduğu bilinmektedir. Sonuç olarak, yüzeyi nispeten genç ve karmaşık kriyovolkanik arazilerde ortaya çıkan karmaşık bir jeolojik geçmişe sahiptir. Scientific American tarafından *'Güneş Sisteminin Harikası'* olarak seçilen Triton, muhtemelen nitrojen püskürten birçok kriyojene ve yüzeyinde görülen koyu renkli organik bileşiklere sahiptir. Gayzerler, onun zayıf nitrojen atmosferine katkıda bulunmaktadır.



Şekil 18.23 Triton'un Voyager 2 tarafından görüntülenen yüzeyi. Yüzeydeki siyah ovaller, alt yüzeyden getirilen materyalle birlikte soğuk gayzer püskürme bölgeleridir (Kaynak: NASA).



Şekil 18.24 Ceres'in varsayılan iç yapısı (Kaynak: NASA).

18.7.2 Ceres

Su için bir başka ilgi çekici olasılık da cüce gezegen Ceres'dir. 950 km çapıyla Güneş Sistemindeki en büyük göktaşıdır. Göktaşı kuşağının kütlesinin yaklaşık üçte birini içerir. 1801 yılında Giuseppe Piazzi tarafından keşfedilmiştir.

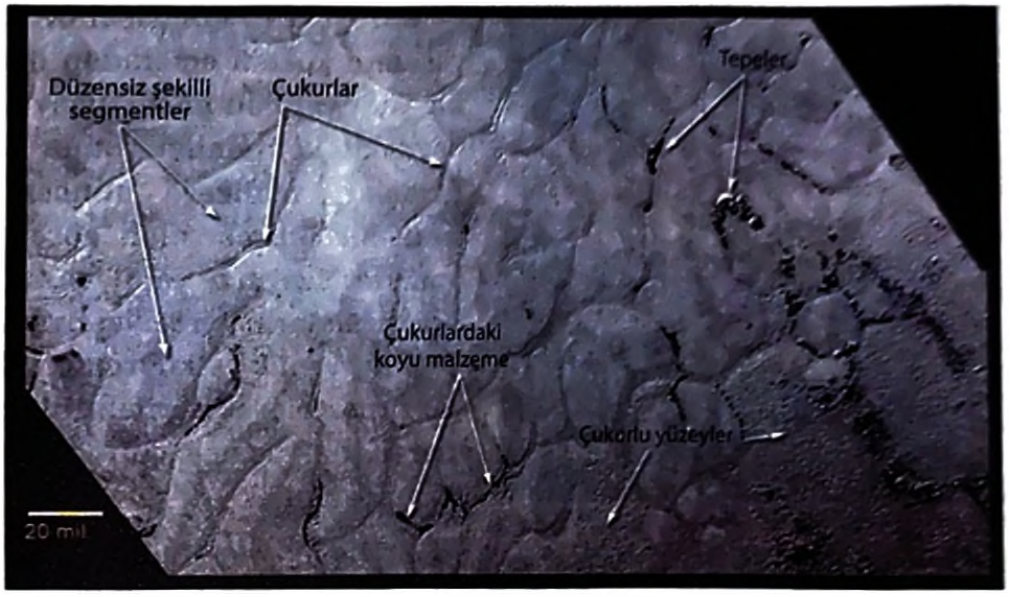
Ceres'in yüzeyi muhtemelen su buzu ile karbonatlar ve killer gibi çeşitli hidratlı minerallerin bir karışımıdır. 2,09 $g.cm^{-3}$ yoğunluğa sahiptir. Yüzey için yapılan sıcaklık tahminleri, en yüksek değerin yaklaşık 235 K olduğunu göstermektedir. Kayalık bir çekirdek ve buzlu bir mantoya farklılaşmış gibi görünmektedir ve yüzeyinin altında bir sıvı su okyanusu veya su buzu olabilir (Şekil 18.24). Ceres, Dawn görevinin odak noktasıydı.

18.7.3 Plüton

Jeolojik olarak aktif bölgeler, Güneş sistemimizin uzak noktalarında bile mevcuttur. Plüton'un kratersiz ovaları (Şekil 18.25), nitrojen ve metan buzlarını içeren son jeolojik aktivitenin varlığını düşündürür. Bu buzlar muhtemelen astrobiyolojik açıdan ilgi görmeyecek kadar soğuk olsa da, Güneş Sisteminde jeolojik aktiviteye olanak sağlayan farklı koşullar hakkında fikir veriyor ve hangi tür jeolojik aktivitenin yaşanabilir koşullarla ilişkili olabileceği veya olamayacağı konusundaki anlayışımızı genişletiyor.

18.8 Gezegen Koruması

Mars ve buzul uydular da dâhil olmak üzere diğer gezegenimsilerde yaşam veya yaşanabilir ortamlar olasılığı, bunları Dünyadan gönderilen uzay gemilerinde



Şekil 18.25 Yakın zamandaki jeolojik özellikleri gösteren, Plüton ovalarının açıklamalı bir görüntüsü (Kaynak: NASA).

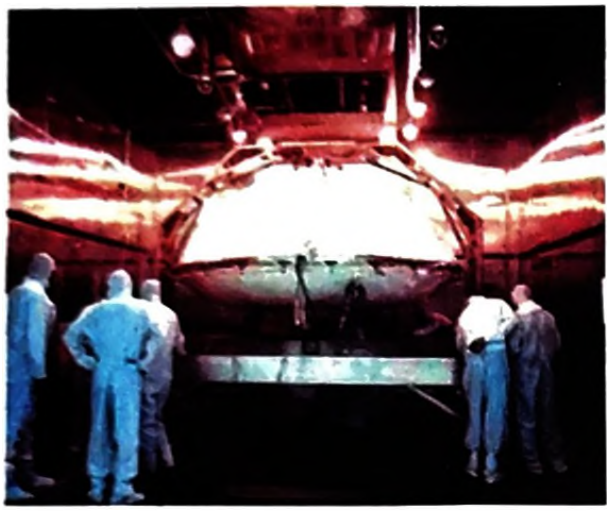
mikroorganizmalarla kirletme (ileri kontaminasyon), hatta Dünyayı yabancı biyosferlerden istemeden gelen zararlı mikroplarla kirletme (geri kontaminasyon) konusundaki endişeleri destekler. Bu endişeler, genel olarak gezegensel koruma başlığı altında yer almaktadır. Gezegensel koruma ciddiye alınan bir konudur ve Uzay Araştırmaları Komitesi (COSPAR*), kontaminasyonun meydana gelme olasılığına karşılık gelen görev kategorilerine sahiptir. Bu protokoller, diğer gezegenimsileri araştıran ulusların 'zararlı kirlenmeleri önlemelerini' gerektiren Birleşmiş Milletler Dış Uzay Antlaşmasına yanıt olarak geliştirildi. Bu ifade, gezegenin korunmasında etik kaygıların bir rol oynamasına rağmen, gezegenin kendisi veya varsayımsal uzaylı biyosferleri için içsel bir endişe değil, bilimsel bilgilerin yok edilmesine bir referanstır. Gezegen korumasına yönelik düzenlemeler uluslararası kanunlar değil, COSPAR tarafından önerilen ve ulusların uyduğu düzenlemelerdir.

Gezegen koruması yeni bir çaba değil. Mars'a gönderilen Viking iniş araçları (Bölüm 17), Mars'ı kirletme olasılıklarını en aza indirmek için dev bir fırında 40 saat boyunca 111 °C'ye kadar ısıtıldı (Şekil 18.26). Yine de, COSPAR kategorileri bu prosedürleri resmileştirmiştir.

Gezegen koruması kategorileri aşağıda gösterilmiştir ve bunların genellikle ilginç organik kimyaya veya yaşama sahip olma olasılığı en düşük olan yerlerden (Tip I) başladığını ve oradan yukarıya, daha büyük endişe uyandıran gezegenimsilere doğru ilerlediğini görebilirsiniz.

Kategori I: Kimyasal evrim veya yaşamın kökeniyle doğrudan ilgisi olmayan bir yere yapılan görev. Güneş veya Merkür bu görevlere bir örnek olabilir.

* [İng.] Committee for Space Research -çn.



Şekil 18.26 1970'lerde Mars'a gönderilmeden önce ısıyla steril edilen bir Viking iniş aracı (Kaynak: NASA).

Kategori II: Kimyasal evrim ve yaşamın kökeni açısından önemli bir yere yapılan ancak uzay aracı kaynaklı kontaminasyonun araştırmaları tehlikeye atması çok uzak bir ihtimal olan görev. Organikler üzerinde yapılacak ilginç araştırmaların gerçekleştirilebileceği Ay, Venüs ve kuyruklu yıldızlar örnek olarak verilebilir, ancak buralarda yaşama dair güçlü bir kanıt yoktur.

Kategori III: Kimyasal evrim ve yaşamın kökeni için önemli bir ilgi alanına sahip olan ve kontaminasyonun araştırmaları tehlikeye atabileceğine dair şu anda değerlendirilen önemli bir şansa sahip olan bir yere uçuş ve yörünge görevleri. Örnekler arasında Mars, Europa ve Enceladus sayılabilir.

Kategori IV: Kategori III'le aynı yerlere iniş veya keşif görevleri.

Kategori IV'te Mars'a yapılan görevler ayrıca alt sınıflara ayrılır:

Kategori IVa. Marslı yaşamı aramayan uzay görevleri. Bu iniş araçları, ön sterilizasyon sırasında Viking iniş aracıyla aynı biyolojik yüke sahip olmalıdır. Isıyla steril edilmeden önce, Viking uzay aracı üzerinde belirli sayıda organizma vardı (herhangi bir uzay aracı gibi). Bu sayıya ulaşmak için iniş aracında, uzay aracı başına 300.000'den fazla spor ve 300 spor m^{-2} bulunmamalıdır.

Kategori IVb. Marslı yaşamı arayan uzay görevleri.

Kategori IVc. Yaşamın yayılabileceği bir bölge olan Mars Özel Bölgesine erişen herhangi bir bileşen, en azından Viking sterilizasyon sonrası biyolojik yük seviyelerine (uzay aracı başına toplam 30 spor) kadar steril edilmelidir.

Kategori V: Bu kategori örnek iade görevleri içindir. 'Sınırsız' ve 'kısıtlı' örnek iade görevlerine ayrılmıştır.

Sınırsız Kategori V. Bilimsel görüşe göre yerel yaşam formuna sahip olmadığı değerlendirilen yerlerden örnekler. Özel gereksinim yok.

Kısıtlı Kategori V. Yerel yaşamla ilgili bilimsel görüşün belirsiz olduğu örnekler. Gereksinimler şunları içerir: iade üzerine yıkıcı etkinin yasaklanması, hedef gövdeyle doğrudan temas eden tüm iade edilen donanımların ve Dünyaya iade edilen steril edilmemiş numunelerin korunması.

Tartışma Noktası: Gezegen koruması gerekli mi?

Gezegen koruması, diğer gezegenimsiler üzerindeki potansiyel bilimsel çalışma alanlarının kirlenmesini ve dolayısıyla yok edilmesini durdurma arzusuyla motive edildi. Son yıllarda, özellikle Dünya dışı bir biyosfere müdahale etme veya ona zarar verme endişesiyle, yalnızca bilimsel değeri yok etmenin ötesinde, bu motivasyonu etik alana genişletmeye ilgi olmuştur. Ancak, bazı insanlar tüm bu endişelerin abartılı olduğunu söylediler. Örneğin, bir uzaylı biyosferini kirletme ve herhangi bir tür yıkıma neden olma şansının o kadar düşük olduğunu, gezegensel koruma gereksinimlerinin, gezegensel görevlere zor kısıtlamalar getirerek uzay araştırmalarını yavaşlatan maliyetli bir kulübe endüstrisi olduğunu iddia ediyorlar. Ne düşünüyorsun? Gezegensel koruma, bilimsel bir konumdan mı yoksa sadece sağduyulu bir konumdan mı haklı? Neyin yeterli temizlik olduğuna ve neyin tek bir sporun yaşanabilir bir bölgeyi kirletmeye yetmeyeceğine nasıl karar verebiliriz? Son olarak, robotik ve insan misyonları arasındaki farkı düşünün. İlk durumda bir robotu steril edebiliriz, ikinci durumda bir insanı steril edemeyiz, bu da kontaminasyonu çok olası hale getirir. Varsa, diğer gezegenlerin insan keşfine hangi düzenlemeler eşlik etmelidir?

Fairén, A.G., Schulze-Makuch, D. (2013) The overprotection of Mars. Nature Geoscience 6, 510–511.

Kminek, G., Rummel, J.D., Cockell, C.S. et al. (2010) Report of the COSPAR Mars Special Regions colloquium. Advances in Space Research 46, 811–829.

18.9 Sonuç

Birkaç on yıl önce, Güneş Sisteminin dışındaki uydularının astrobiyologların ilgisini çekeceği fikri, uç bir öneri olarak kabul edilirdi. Bugün, bu uyduların çoğu önemli fırsatlar sunuyor. Bazılarındaki yeraltı okyanuslarının keşfi, bunların yaşanabilir olup olmadığı, hatta yaşam içerip içermediği sorusunu gündeme getiriyor. Bununla birlikte, yaşam arayışına fazla odaklanmamalıyız, çünkü bu ortamlar, evrendeki sulu ortamların jeokimyası ve orada meydana gelebilecek organik kimya hakkında çok daha genel ve önemli kavrayışlar ortaya çıkaracaktır. Titan ve hatta Triton'un yüzeyi gibi diğer uydular, organik moleküllerin gezegensel koşullar altında, örneğin UV radyasyonu altında işlenmesine ilişkin yeni anlayışlar sağladı; bu, erken Dünyadaki prebiyotik koşullar hakkındaki anlayışımızı geliştirebilir. Bu uyduların ve dış Güneş Sistemindeki diğer gezegenimsilerin keşfi bize, organiklerin ve prebiyotik moleküllerin nasıl üretildiği ve yaşamın karasal tipteki kayalık gezegenlerle sınırlı olup olmadığı gibi erken güneş sistemlerindeki koşullar hakkında bilgimizi artıracak çok sayıda karşılaştırmalı veri sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

İleri Okumalar

Kitaplar

Greenberg, R. (2008) *Unmasking Europa: The Search for Life on Jupiter's Moon, Copernicus*. Springer, New York.

Lorenz, R., Mitton, J. (2008) *Titan Revealed*. Cambridge Üniversitesi Yayınları, Cambridge.

Yayınlar

Broadfoot, A.L., Atreya, S.K., Bertaux, J.L., et al. (1989) Ultraviolet spectrometer observations of Neptune and Triton. *Science* 246, 1459–1466.

Collins, G.C., Head, J.W., Pappalardo, R.T., Spaun, N.A. (2000) Evaluation of models for the formation of chaotic terrain on Europa. *Journal of Geophysical Research* 105, 1709–1716.

Greenberg, R., Geissler, P., Hoppa, G., Tufts, B.R., Durda, D.D., Pappalardo, R., Head, J.W., Greeley, R., Sullivan, R., Carr, M.H. (1998) Tectonic processes on Europa: Tidal stresses, mechanical response, and visible features. *Icarus* 135, 64–78.

Hand, K.P., Carlson, R.W., Chyba, C.F. (2007) Energy, chemical disequilibrium, and geological constraints on Europa. *Astrobiology* 7, 1–18.

Lorenz, R.D., Stiles, B.W., Kirk, R., Allison, M.D., del Marmo, P.P., Less, L., Lunine, J.I., Ostro, S.J., Hensley, S. (2008) Titan's rotation reveals an internal ocean and changing zonal winds. *Science* 319, 1649–1651.

Lorenz, R.D., Mitchell, K.L., Kirk, R.L., et al. (2008) Titan's inventory of organic surface materials. *Geophysical Research Letters* 35, L02206.

McKay, C.P., Porco, C.C., Altheide, T., Davis, W.L., Kral, T.A. (2008) The possible origin and persistence of life on Enceladus and detection of biomarkers in plumes. *Astrobiology* 8, 909–919.

Paranicas, C., Mauk, B.H., Ratliff, J.M., Cohen, C., Johnson, R.E. (2002) The ion environment near Europa and its role in surface energetics. *Geophysical Research Letters* 29, doi: 10.1029/2001GL014127.

Raulin, F., Owen, T. (2002) Organic chemistry and exobiology on Titan. *Space Science Reviews* 104, 377–394.

Roberts, J.H., Nimmo, F. (2008) Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus. *Icarus* 194, 675–689.

Sagan, C., Khare, B.N. (1979) Tholins: organic chemistry of interstellar grains and gas. *Nature* 277, 102–107.

Schmidt, B., Blankenship, D., Patterson, W., Schenk, P. (2011) Active formation of 'chaos terrain' over shallow subsurface water on Europa. *Nature* 479, 502–505.

Waite, J.W., Lewis, W.S., Magee1, B.A., et al. (2009) Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and 40Ar in the plume. *Nature* 460, 487–490.

19

ÖTEGEZEGENLER: BAŞKA YAŞANABİLİR DÜNYALAR ARAYIŞI

Kazanımlar

- Ötegezegenlerin ne olduğunu anlamak.
- Ötegezegenleri tespit etmek için kullanılan farklı yöntemleri anlamak.
- Bir gezegenin kütlesini, yarıçapını ve yoğunluğunu ölçmek için ötegezegen tespitinde kullanılan Transit ve Radyal Hız yöntemleriyle ilgili denklemleri uygulayabilmek.
- Bulunan bazı ötegezegenlerin çeşitliliğini açıklamak.
- Hangi gazların yaşamın potansiyel biyolojik belirteçleri olabileceğini ve bunların nasıl tespit edilebileceğini anlamak.

19.1 Ötegezegenler ve Yaşam

Astronomide astrobiyologların ilgisini çeken en heyecan verici gelişmelerden birinin, diğer yıldızların yörüngesinde dönen gezegenlerin –ötegezegenlerin– keşfi olduğunu söylemek abartı olmaz. Güneş sistemi dışındaki bir gezegen (veya ötegezegen), Güneşten başka bir yıldızın etrafında dönen bir gezegendir.

Ötegezegenler, birçok nedenden dolayı astrobiyologlar için büyük öneme sahiptir. Bu nedenlerden sadece birkaçı şunlardır:

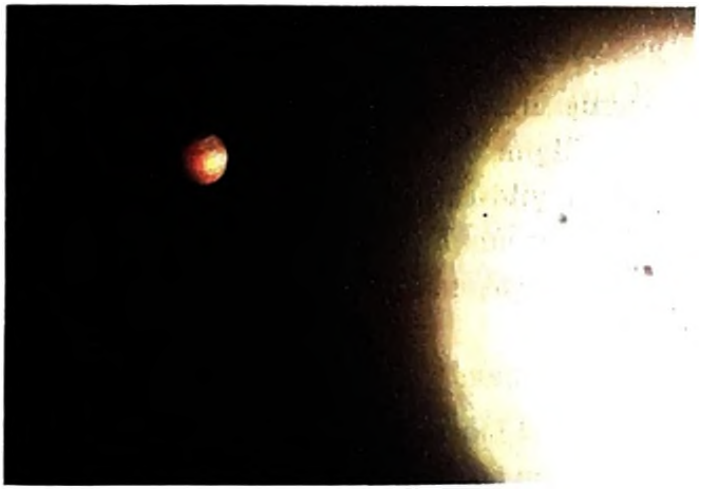
- Güneş sistemimizin gezegensel "mimarisinin" ne kadar tipik olduğunu anlamak.
- Karasal türdeki kayalık gezegenlerin ne kadar yaygın olduğunu ölçmek.
- Kayalık gezegen türlerinin çeşitliliğini kataloglamak.
- Güneş tipi G yıldızları (M, K ve F yıldızları dâhil) dışındaki yıldızların yörüngesinde kaç tane kayalık gezegenin bulunduğunun araştırmak.
- İkili yıldızların yörüngesinde dönen yaşanabilir gezegenler olup olmadığını öğrenmek.
- Uzak gezegenlerde yaşam kanıtı aramak.

Bu etkileyici ve kafa karıştırıcı bir liste! Listenin sonundaki maddenin astrobiyologlar açısından en ilginç olduğunu söylemek tam olarak doğru olma-

yabilir. Bazen halk dilinde tanımlandığı gibi, "ikinci bir dünya" arayışı heyecan verici bir olasılıktır. Bununla birlikte, eğer varsa, diğer yaşamın bulunduğu diğer gezegenlerin Dünyanın bir kopyası olması gerektiğine dair hiçbir neden olmadığını hemen belirtmek gerekir.

Yaşamın olduğu bir ötegezegen aramaya yönelik deneysel bir nedenimiz var. Bu, sonunda bize evrende yaşam olasılığı ve yaşamın kökeninin yaygın olup olmadığı hakkında bir şeyler söyleyecektir. Güneş sistemimizde yaşamın bağımsız ikinci bir kökenine dair kanıt bulduğumuz kuramsal bir senaryo varsayalım. Bu, önem arz etse de, yine de bilim insanlarının yalancı-replikasyona yol açtığı şey olurdu. Bizim özel ön gezegensel diskimizde olağandışı bir şey bulunmadığını asla bilemezdik. Belki de primordial gazda sentezlenen, evrende çok seyrek olarak yayılan ve gezegenler arasında dağılmış, birden fazla yaşam kaynağına neden olan bazı nadir karbon bileşiklerini içeriyordu. Böyle bir senaryonun olasılığı hakkında ne düşündüğümüzden bağımsız olarak, ilkesel nokta, kendi Güneş Sistemimizde yaşam bulmanın aynı ön-gezegen deneyini örneklemiş olmasıdır. Güneş dışı gezegenler bize bu sınırlamanın üstesinden gelme ve bağımsız ön-gezegen disklerinden oluşan gezegenlerde yaşam arama, sağlam deneysel replikasyon ve varsa örnek oluşturacak yabancı biyosferlerin istatistiksel bağımsızlığını sağlama imkânı sunar.

Bir anakol yıldızının etrafında keşfedilen ilk ötegezegen 51 Pegasi b idi (Şekil 19.1). Ötegezegen adları yıldız adıyla başlar ve ardından harfler gelir. Cenevre Gözlemevi'ndeki Michel Mayor ve Didier Queloz, gezegeni 1995 yılında, 51 ışık yılı uzaklıktaki Pegasus takımyıldızında Güneş benzeri 51 Pegasi'nin yörüngesinde dönerken keşfettiler. Bu cismin yıldızın yörüngesinde sadece 4,2 gün içinde, şaşırtıcı derecede kısa bir sürede ve Jüpiter'inkinin yarısı kadar minimum kütleye sahip olduğu bulundu. Bu olağanüstü yeni dünya, şimdi Sıcak Jüpiterler olarak bilinen ve devasa boyutlarıyla yakın yörüngeleri nedeniyle bu şekilde adlandırılan yeni bir cisim sınıfını tanımladı.



Şekil 19.1 Bir ana dizi yıldızının etrafında keşfedilen ilk ötegezegen olan 51 Pegasi b'nin sanatçı izlenimi (Kaynak: wikicommons, debivort).

19.2 Ötegezegenlerin Tespiti

Yakınlardaki yıldızlar için kullanılan modern teknoloji ve teleskoplar ilke olarak uzak bir gezegeni ayırmak ve tespit etmek için de kullanılabilir. Bir teleskopun uzamsal çözünürlüğü (atmosferin etkileri dikkate alınmadan) λ/D formülüyle verilir; burada D, teleskopun açıklığı (ana aynasının veya merceğin çapıdır) ve λ, kullanılan ışığın dalga boyudur. Uzamsal çözünürlük, radyan = $180°/\pi = 57{,}3°$ olmak üzere radyan cinsinden verilir. 10 m çapında bir teleskop düşünün. Spektrumun kırmızı bölgesinde 650 nm'de uzamsal çözünürlüğü $6{,}5 \times 10^{-7} / 10 = 6{,}5 \times 10^{-8}$ radyan olacaktır. Bu, 0,013" (yay saniyesi) değerine eşittir. Diyelim ki, 10 ışık yılı ($9{,}4 \times 10^{13}$ km) uzaklıkta bir yıldızın etrafında Satürn'ün ($1{,}43 \times 10^{9}$ km) yörüngesinde dönen gaz devi benzeri bir gezegen yaklaşık 3,14 yay saniyelik (teleskopun çözünürlüğünden daha yüksek) bir açısal ayrıma sahip olacaktır (basit trigonometri kullanarak), bu da onu tespit edilebilir kılıyor. Ancak bu, yalnızca birkaç on ışık yılı içindeki yakın yıldızlar için geçerlidir. Çoğu yıldız çok daha uzaktadır.

Sorun, yalnızca yüksek bir çözünürlük elde etmekten çok daha zordur. Bir diğer önemli sorun da, gezegenden yansıyan ışık miktarının yıldızdan gelen ışıkla karşılaştırıldığında çok küçük olmasıdır. Örneğin, Dünya boyutundaki bir gezegen tarafından yayılan ışık, dalga boyuna bağlı olarak ana yıldızdan yaklaşık 10 milyon ila 10 milyar kat daha azdır. Dış gezegenlerin doğrudan görüntülenmesi mümkün olsa da, bu dünyaları dolaylı olarak tespit etmenin başka yolları da var. Bu yöntemleri inceleyelim.

19.3 Ötegezegenlerin Tespitinde Transit Yöntemi

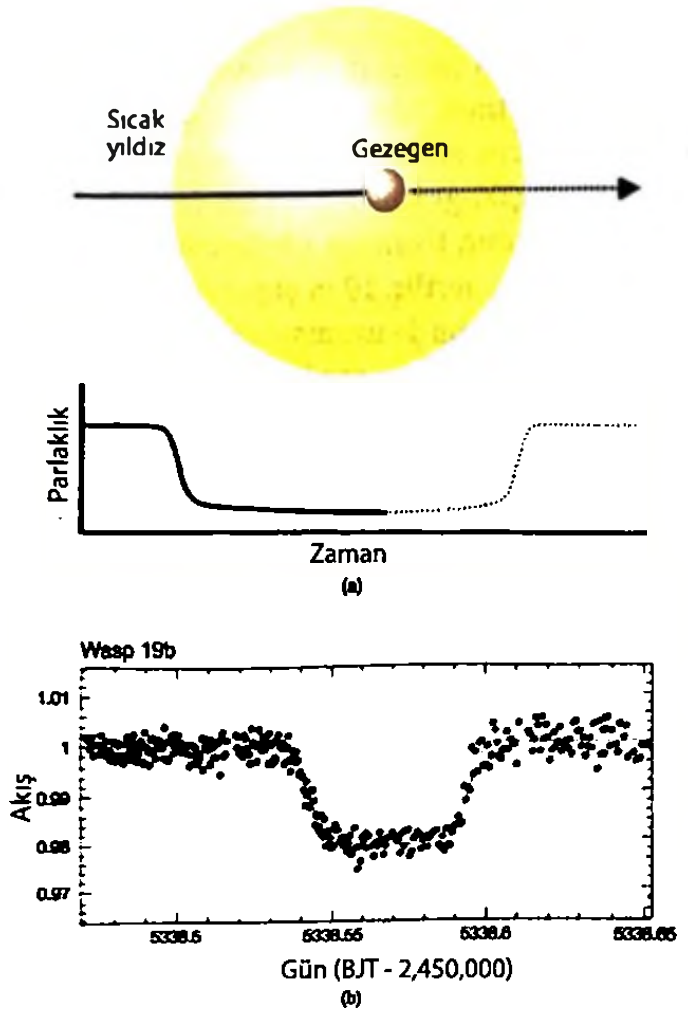
Bir gezegen yıldızının önünden geçtiğinde, yıldız ışığının bir kısmını engelleyecek ve arkasındaki yıldızın Dünyadan görülebilen parlaklığında bir düşüşe neden olacaktır. Parlaklıktaki düşüş, gezegenin yarıçapıyla orantılıdır. Bir gezegen bulmaya yönelik bu yaklaşıma transit yöntemi denir. Şekil 19.2, transit yönteminin ilkesini ve bir gezegen için tipik ışık eğrisini göstermektedir.

Bir gezegen bir yıldızın önünden geçtiğinde engellenen ışığın oranı, gezegenin enine kesit alanının yıldıza oranının bir fonksiyonu olacaktır.

$$\text{Engellenen ışık oranı} = \pi R^2_{\text{gezegen}} / \pi R^2_{\text{yıldız}} = R^2_{\text{gezegen}} / R^2_{\text{yıldız}} \qquad (19.1)$$

Parlaklığından çıkarılan yıldızın yarıçapını hesaplayabiliriz (Bölüm 8). Engellenen ışığın oranı, ölçülen ışık eğrisinden hesaplanır (Şekil 19.2), bu denklemi gezegenin yarıçapını hesaplamak için kullanmamıza olanak sağlar.

Yöntemin bir dezavantajı vardır. Gezegensel geçişler, yalnızca gözlemcinin neredeyse tam olarak görüş hattında bulunan gezegenler için gözlemlenebilir. Bir gezegen yörünge düzleminin bir yıldızın doğrudan görüş hattında olma olasılığı, yıldızın çapının yörüngenin çapına oranıyla bulunur. 1 AB'de Güneş benzeri bir yıldızın yörüngesinde dönen bir gezegen için geçiş olasılığı %0,47'dir.



Şekil 19.2 (a) Transit yönteminin prensibini gösteren şema. Gezegen, ev sahibi yıldızının önünden geçerken, ışığın bir kısmını bloke ederek yıldız ışığında bir kararmaya neden olur (Kaynak: Charles Cockell). *(b) Yaklaşık 18,932 saat olan bilinen herhangi bir gezegen gövdesinin en kısa yörünge periyotlarından birine sahip olan bir ötegezegen olan WASP-19b'nin bir ışık eğrisi (ışık eğrisi gün olarak, özellikle* Barisentrik Jülyen Günü; Kaynak: ESO). *1,15 Jüpiter kütlesine sahiptir, ancak çok daha büyük bir yarıçapa (Jüpiter'inkinin 1,31 katı) sahiptir ve bu da onu neredeyse düşük kütleli bir yıldız boyutunda yapar. Yaklaşık 815 ışıkyılı uzaklıktaki Vela takımyıldızındaki WASP 19a yıldızının yörüngesinde dönüyor.*

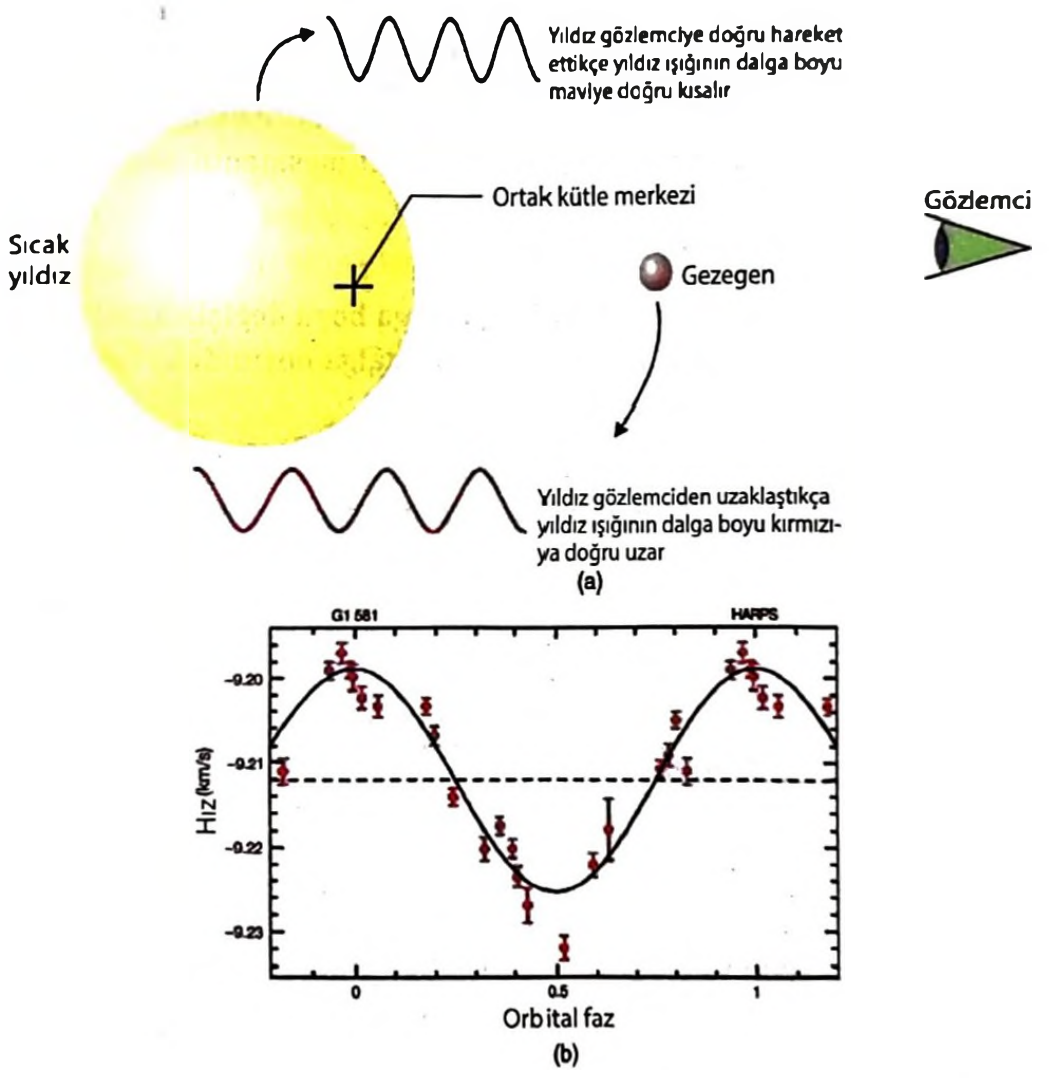
Bununla birlikte transit araştırmaları, yüz binlerce yıldız içeren galaksinin geniş alanlarını tarayarak yüksek oranda ötegezegen bulabilir. Uzay tabanlı CoRoT ve Kepler teleskop görevleri, yer tabanlı WASP aramasında olduğu gibi bu yaklaşımı kullandı.

Transit yönteminin ana avantajı, gezegenin boyutunu belirlemek için ışık eğrisinin kullanılabilmesidir. Bununla birlikte, parlaklıktaki herhangi bir değişikliğin diğer nedenleri (örneğin yıldızdaki **güneş lekeleri**) yanlış bir şekilde bir gezegenden kaynaklandığı şeklinde yorumlanabileceğinden, yöntem aynı zamanda yüksek oranda yanlış anlaşılmaya sahip olma eğilimindedir. Transit algılamalı bir yıldız, örneğin radyal hız yönteminden ek doğrulama gerektirir.

19.4 Ötegezegenlerin Tespitinde Doppler Kayması/Radyal Hız Yöntemi

Kesin olarak söylemek gerekirse, bir gezegen bir yıldızın etrafında dönmez. Gezegen ve yıldız, ortak kütle merkezlerinin (**barimerkez**) yörüngesinde dönerler. Gezegen genellikle yıldızdan çok daha az kütleye sahip olduğundan, yörüngesi daha belirgindir ancak yıldız, genellikle yıldızın içinde bulunan ortak kütle merkezinin yörüngesinde döner.

Bir yıldızda gezegenlerin neden olduğu yalpalama dolaylı olarak tespit edilebilir ve bunu yapmanın en başarılı yöntemlerinden biri, bir yıldızın **Doppler kaymasını** incelemektir. Bir yıldızın yalpalaması, ortak kütle merkezi etrafında bize doğru ve bizden uzaklaştıkça yıldız ışığında bir Doppler kaymasına neden olur. Yıldız gözlemciye doğru hareket ettikçe dalga boyu maviye, uzaklaştıkça kırmızıya doğru kayar. Bu, tayf çizgilerinde bir kayma olarak ölçülebilir ve buradan yıldızın bize doğru ve bizden uzaklaştığı radyal hız veya hız belirlenebilir (Şekil 19.3). Bir ana dizi yıldızı olan 51 Pegasi b'nin etrafında keşfedilen ilk ötegezegen bu yöntemle keşfedildi.



Şekil 19.3 Doppler ötegezegen tespit yöntemi. (a) Doppler yöntemi, gezegenin yıldızın hareketi üzerindeki etkisini saptamak için ışığın dalga boyunun değişmesine dayanır. Yıldızın konumunun fiziksel hareketi de astrometri yönteminin temelidir (Kaynak: Charles Cockell). *Alttaki görüntü (b), Terazi takımyıldızında Dünyadan yaklaşık 22 ışıkyılı uzaklıkta bulunan bir ana dizi M yıldızı olan Gliese 581'den alınan radyal hız verilerini göstermektedir* (Kaynak: ESO). *Veriler gezegen(ler)in varlığını gösterir.*

Radyal hız eğrileri, bir gezegenin yörüngesinin dış merkezliliğini belirlemek için kullanılabilir. Yörünge dairesel ise, radyal hız eğrileri mükemmel sinüzoid olacaktır. Yörünge dış merkezli ise, gezegen yıldıza yakınken hızlı, yıldızdan uzaktayken daha yavaş hareket edecektir. Bu durumda yıldızın radyal hız eğrisi mükemmel bir sinüzoidal eğri olmayacaktır. Gezegen yıldıza yakın olduğunda daha hızlı ve gezegen daha uzaktayken daha yavaş değişecek, bu da yörüngenin dış merkezliliğinin Kepler yasaları tarafından belirlenmesine izin verecektir.

Doppler kayması ölçülebilir. Bir gözlemciye doğru v hızıyla (radyal hız) hareket eden bir ışık kaynağı (bir yıldız) düşünün. Kaynak gözlemciye doğru hareket ettiğinden, her dalga boyunda ışık yayıldığında, yıldız gözlemciye biraz daha yaklaşır ve ışığın daha kısa dalga boylarına (mavi dalga boyları) "ezilmesine" neden olur. Kaynağın t zamanda hareket ettiği mesafe (d), basitçe hızın zamanla çarpımı veya $d = vt$ olarak verilir.

Zamanı, t'yi, ışığın dalga boyu (λ) bölü ışık hızı, c, veya $t = \lambda / c$ olarak hesaplanan, bir dalga boyundaki ışığı yaymak için gereken süre olarak seçebiliriz. O halde yıldızın bu kısa zaman aralığında kat ettiği mesafenin şöyle olduğunu söyleyebiliriz:

$$d = v\lambda / c \tag{19.2}$$

Şimdi yıldızın hareketinin neden olduğu dalga boyu değişikliğini düşünün. Gözlemci tarafından görülen dalga boyu λ_o ise, dalga boyundaki kayma şu şekilde hesaplanır:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_o \tag{19.3}$$

Kaynaktan gelen dalga boyu d mesafesi kadar kısaldığı için, bu şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$\Delta\lambda = \lambda - (\lambda - d) \tag{19.4}$$

Bu nedenle, d yukarıdaki gibi yazılır:

$$\Delta\lambda = \lambda - (\lambda - v\lambda / c) \tag{19.5}$$

ve Doppler denklemi türetilir:

$$\Delta\lambda c / \lambda = v \tag{19.6}$$

burada v yıldızın radyal hızıdır.

Bu denklem, hareketli bir kaynak (bir yıldız) ve sabit bir gözlemci için geçerlidir ve gözlemcinin ya Dünyaya sabitlendiği ya da Dünyanın üzerinde bir teleskop kullandığı ötegezegenlerin aranmasında kullanım için uygun denklem de budur.

Doppler Etkisini net olarak anlamak için, denklemin durağan bir kaynak ve hareketli bir gözlemci için farklı olduğunu ve şu şekilde hesaplandığını anlamalıyız:

$$\Delta\lambda = \lambda / (1 - c / v_o), \tag{19.7}$$

burada v_o gözlemcinin hızıdır.

Ayrıca, bu denklemi ve durağan gözlemci için türetilen denklemi (Denklem (19.6)) alabilir ve aşağıdaki şekilde verilen genel Doppler Kayması denklemini türetebiliriz:

$$\Delta\lambda = \lambda_s (v_s - v_o)/(c - v_o), \tag{19.8}$$

burada λ_s kaynağın dalga boyu, v_s kaynağın hızı ve v_o ise gözlemcinin hızıdır. Görüyorsunuz, eğer gözlemci sabitse (yani $v_o = 0$), o zaman Denklem (19.6)'ya geri geliyoruz.

Doppler yöntemi özellikle düşük kütleli yıldızlara uygundur, çünkü bunlar gezegenlerinin kütleçekimsel etkisinden daha fazla etkilenecektir. Düşük kütleli yıldızlar yavaş dönerler, bu da yıldızın kendi dönüşünün neden olduğu sinyalin yorumlanmasındaki karışıklığı azaltır. Ayrıca, düşük kütleli yıldızlar, daha seyrek tayf çizgilerine sahip yüksek kütleli yıldızların aksine, Doppler kaymasını ölçmek için kullanılabilecek gözlemlenebilir tayf çizgilerine sahiptir. Yöntem ayrıca yıldızlarına yakın yörüngede dönen çok büyük gezegenleri tespit etmede de iyidir. İyi hedeflere sahip olsa bile, yöntem yine de büyük hassasiyet gerektirir. Tipik Doppler kaymaları, çok yüksek kalite ve doğru ekipman gerektiren bir dalga boyunun 10^{-8} seviyesinde olabilir.

Radyal hıza sahip olduğumuzda gezegenin kütlesini hesaplamak mümkün mü?

Gezegenin kütlesi, lineer momentumun korunumu denklemi kullanılarak elde edilir:

$$m_{yıldız} v_{yıldız} = m_{gezegen} v_{gezegen} \tag{19.9}$$

Gezegenin hızının, $v_{gezegen}$'in, $2\pi a_{gezegen}/ p_{gezegen}$ kullanılarak, zamana bölünen mesafeyi bularak hesaplandığını biliyoruz, burada $2\pi a_{gezegen}$ bir yörüngenin toplam mesafesi, $a_{gezegen}$, gezegenin yıldıza olan ortalama yörünge mesafesi (yarı ana ekseni) ve $p_{gezegen}$, bir yörüngeyi tamamlaması için geçen süre olan yıldız periyotudur.

Böylece bir gezegenin kütlesi şu şekilde yazılabilir:

$$m_{gezegen} = m_{yıldız} v_{yıldız} p_{gezegen} / 2\pi a_{gezegen} \tag{19.10}$$

Denklemin sağ tarafında değerleri doldurabiliriz:

Yıldızların kütle-parlaklık ilişkisini kullanarak, tayf türünden veya parlaklığından yıldızın kütlesini ($m_{yıldız}$) hesaplayabiliriz:

$$L_{yıldız}/L_{Güneş} = (M_{yıldız}/M_{Güneş})a \tag{19.11}$$

Bölüm 8'de gösterildiği gibi, burada L parlaklık ve M kütledir; a, anakol yıldızları için genellikle 3,5 olarak alınan 1 ile 6 arasında bir değerdir. Yıldızın parlaklığı, görünen büyüklüğü (Dünyada gözlemlendiği şekliyle parlaklığı) ölçülerek ve uzaklığı dikkate alınarak geri kazanılabilir.

Yıldızın radyal hızı, $v_{yıldız}$, daha önce tartıştığımız Doppler ölçümlerinden elde edilir.

$P_{gezegen}$ değeri, yıldızın ortak kütle merkezi etrafında döndüğü periyotla aynıdır ve biz de ölçümlerimizde zaman ekseninden bu değere sahibiz. Yıldızın ortak kütle merkezi (sinüzoidin dalga boyu) etrafında bir dönüş zamanıdır.

Gezegenin yıldızından uzaklığı (a), Kepler'in üçüncü yasası (Bölüm 8) için şu denklem kullanılarak türetilebilir: $p_{gezegen}{}^2 = 4\pi^2 a^3 / GM_{yıldız}$.

Bu yöntemin bir sınırlaması, yalnızca bir gezegenin minimum kütlesini verebilmesidir. Bunun nedeni, gezegen yörüngesinin gözlemciye göre daha eğimli olması nedeniyle Doppler kaymasının daha az olmasıdır. Gezegenin gözlemlenen kütlesi, sin i'yle çarpılan gerçek kütle olacaktır; burada i, yörüngesinin görüş hattından eğim açısıdır. Genellikle bilinmiyor.

Ayrıca, Transit yönteminden elde edilen gezegenin yarıçapını bildiğimizden türetebileceğimiz gezegenin hacmine sahipsek, o zaman gezegenin yoğunluğunu (kütle/hacim) hesaplamak için Transit ve Doppler yöntemini birleştirebileceğimizi hatırlayacaksınız. Yoğunluk bize gezegenin bileşimi hakkında çok şey anlatır. Şimdiye kadar en iyi karakterize edilen ötegezegenler, bu yöntemlerin her ikisinin de uygulandığı gezegenler olmuştur.

19.5 Astrometri

Gezegenlerle ortak kütle merkezi etrafında dönerken yıldızdaki yalpalama ilke olarak astrometri kullanılarak ölçülebilir, bu sayede yıldızın gece gökyüzündeki konumu, yıldızın konumunun doğrudan ölçülmesiyle belirlenir. Yöntem, herhangi bir yörünge konfigürasyonunda gezegenleri tespit etmek için kullanılabilir (yıldızın bir çizgi hareketini oluşturan bir kenar yörüngeden, dairesel bir hareket üreten bir yüz yüze yörüngeye).

Astrometri tartışmalı bir geçmişe sahiptir. On sekizinci yüzyılda William Herschel, 70 Ophiuchi yıldızının yalpalamasının aslında ona eşlik eden ama görünmeyen bir cisimden kaynaklandığını iddia etti. Bununla birlikte, onun ve o zamandan beri pek çok kimsenin iddiası, çoğu gezegenin, yıldızın yörüngesinde, salt konumuna bakarak doğrudan ölçülecek kadar büyük bir bozulmaya neden olacak yeterli kütleye sahip olmadığından çürütüldü. Teleskopların, özellikle uzay teleskopları doğrulukları geliştikçe, astrometriyle gezegenleri güvenilir bir şekilde tespit etmek mümkün hale gelecektir.

19.6 Yıldızların Diğer Niteliklerindeki Çeşitlilikler

Yıldızların diğer nitelikleri, bir yıldızın hareketinde gezegenler tarafından indüklenen yalpalama nedeniyle değişebilir. Özellikle dikkate değer bir uygulama, bir pulsarın (hızla dönen bir nötron yıldızı) zamanlamasındaki değişikliklerin, bu tür yıldızların etrafında gezegenlerin varlığının kanıtı olarak saptanmasıdır. Nötron yıldızları, radyasyon ortamları aşırı olduğundan yaşam olan gezegenler için çok iyi adaylar oluşturmazlar, ancak bu yöntem gezegenlerin keşfine yol açmıştır.

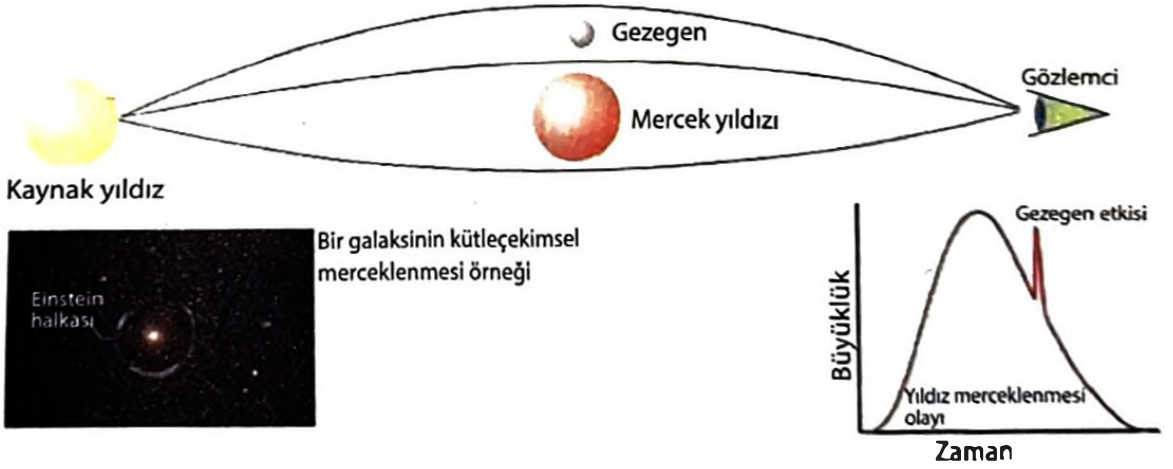
1992'de Aleksander Wolszczan tarafından pulsar PSR 1257+12 yörüngesindeki gezegenlerin keşfi, Güneş Sistemimizin dışındaki gezegenlerin ilk keşfiydi (yukarıda tartışıldığı gibi, bir anakol yıldızının etrafında bulunan ilk gezegen 51 Pegasi b idi). Yaklaşım, parlaklıklarında değişkenlik gösteren diğer yıldızlara uygulandı (değişken yıldız zamanlaması olarak adlandırılan bir şey).

19.7 Yörünge Parlaklığı Değişiklikleri

Ayın büyümesi ve küçülmesi gibi, gezegenler de ışığı yansıtır. Işığın bir yıldız sistemi tarafından verilen toplam ışığa bu değişen katkısı, bir gezegenin varlığını tespit etmek için kullanılabilir. Değişiklikler ayrıca yıldızın şeklindeki çarpıklıklardan da kaynaklanabilir. Yöntem, gerçekçi zaman dilimlerinde ışık değişimlerini tespit etmek daha kolay olduğu için, yıldızlarına yakın olan gezegenler için özellikle uygundur.

19.8 Kütleçekimsel Mercekleme

Einstein'ın Genel Görelilik Teorisi, büyük cisimlerin uzay-zamanı bükmesi nedeniyle, büyük cisimlerin ışığı çarpıtabilmesi gerektiğini öne sürer. Eğer iki yıldız gözlemciye hizalanırsa (Şekil 19.4), o zaman daha uzaktaki yıldız ışığı, bir mercek gibi yakındaki yıldızın etrafında bükülecek ve astronom tarafından gözlemlenen ve Einstein halkası olarak bilinen daireye yakın bir model yaratacaktır. Bu etki uzak galaksilerde de görülmektedir. Halkaya odaklandıkça ışıkta bir parlama meydana gelir (Şekil 19.4), ancak yalnızca mükemmel şekilde hizalanmışsa. Bir gezegenin varlığı etkiye katkıda bulunur ve alınan ışıkta daha fazla odaklanma (ve parlaklık) yaratır (Şekil 19.4).



Şekil 19.4 Mercekleme olayı sırasında elde edilen görüntü üzerinde bir gezegenin etkisini gösteren kütleçekimsel mercekleme (Kaynak: Charles Cockell). *Soldaki küçük resim, parlak kırmızı bir gökadanın kütleçekiminin çok daha uzak bir mavi gökadadan gelen ışığı kütleçekimsel olarak bozduğu yerde bir Einstein halkasının nasıl oluştuğunu gösteren kütleçekimsel merceklenme ilkesinin bir örneğidir* (Kaynak: Hubble Uzay Teleskobu).

Bu olaylar çok kısadır (olaylar on saniyeden günlere kadar sürer), bu da birçok yıldızın sürekli olarak izlenmesi gerektiği anlamına gelir. En büyük sorunlarından biri, yıldızların hizalanmasına bağlı olduğu için genellikle tekrarlanamamasıdır. Bariz bir avantajı, örneğin geçiş yönteminin aksine, gözlemciye bakan yörüngelerde bulunan gezegenleri bulmak için kullanılabilmesidir. Yıldızdan yaklaşık 1-10 AB yörüngede dönen gezegenlere karşı en hassastır. Bu komplikasyonlara rağmen, yöntem gezegenleri tespit etmede başarılı olmuştur.

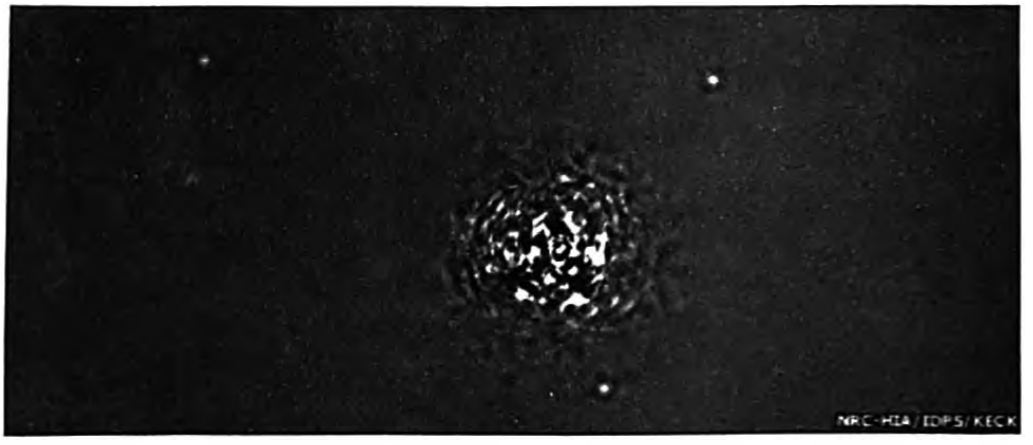
19.9 Doğrudan Tespit

Ötegezegenler doğrudan görüntülenebilir. Yöntem şu anda en iyi şekilde, çok sayıda kızıl ötesi radyasyon yayan, ana yıldızlarından iyi bir şekilde ayrılan ve Dünyaya oldukça yakın olan büyük kütleli sıcak gezegenlere uygulanmaktadır (Şekil 19.5).

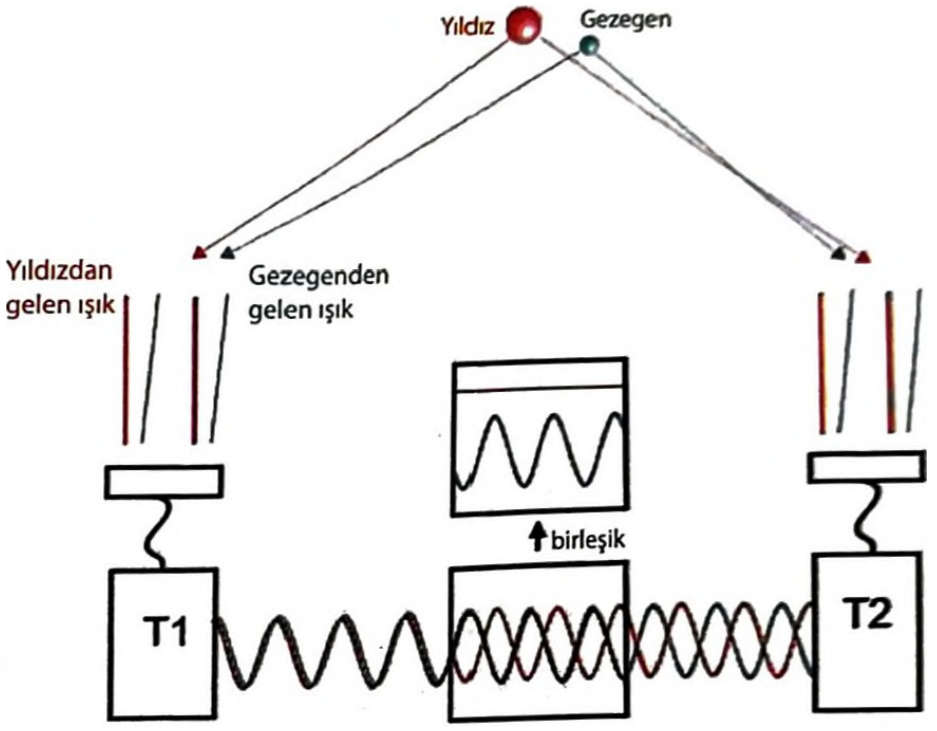
Doğrudan tespit, bir gezegen için kütle tahminleri yapmak konusunda pek iyi bir yöntem değildir. Bununla birlikte, Kahverengi cüceler gibi cisimleri doğrudan algılamak ve hatta atmosferdeki sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan değişiklikler gibi atmosferik özelliklerdeki değişiklikleri doğrudan haritalamak için başarıyla kullanılmıştır.

Yöntem, ana yıldızdan (esas olarak koronadan, bir yıldızı çevreleyen plazmanın aurasından ve ışığının birincil kaynağından gelir) yayılan ışığı engelleyen bir koronagraf kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Doğrudan tespit yerden yapılırsa, atmosferik koşullardaki bozulmalara karşı çok hassastır. Görüş hattında bulunan atmosferdeki bozulmaları gerçek zamanlı olarak düzelten, yer tabanlı teleskoplara uyarlanabilir optik cihazlar eklenebilir. Bu, atmosferik değişiklikleri bölmek için optik cihazları bir teleskopla değiştirmek için kullanılan pertürbasyonları gökyüzüne lazerler ateşleyerek elde edilir. Bu ince değişiklikleri ortadan kaldırarak, görüntüde uzak



Şekil 19.5 Üç gezegenin doğrudan görüntülenmesi. 129 ışık yılı uzaklıkta genç bir yıldızın (HR 8799) yörüngesinde dönen üç ötegezegen, kızıl-altı uyarlanabilir optiklerin yakınında Keck Gözlemevi kullanılarak görüntülendi (Kaynak: NASA).



Şekil 19.6 *Sıfırlama interferometrisi nasıl çalışır? İki teleskop, uzaktaki bir yıldızdan (kırmızı huzme) gelen ışık, T1 ve T2 olarak etiketlenen her teleskopa aynı anda çarpacak şekilde kurulur. Işık demetleri birleştirilmeden önce, bir teleskoptan gelen demet, elektronik veya optik kullanılarak yarım dalga boyu kadar geciktirilir. Yıldız ışığı demetleri bir araya getirildiğinde, bir teleskoptan gelen tepe noktaları diğerinden gelen oluklarla hizalanır ve böylece iptal edilir (düz kırmızı çizgiyle temsil edilir), yıldız ışığı bırakmaz. Ancak, bir gezegen (yeşil ışın) gibi yakındaki bir nesneden gelen ışık iki farklı açıdan gelir. Bu, teleskoplardan birine çarpan gezegen ışığında bir gecikmeye neden olur. Bu nedenle, kirişlerden birinde yarım dalga boyu değişikliğinden sonra bile, birleştirildiklerinde mükemmel bir şekilde yok olmazlar, ancak takviye edilirler (büyük yeşil dalgalarla temsil edilir)* (Kaynak: Charles Cockell).

gezegenleri tespit etmek için yeterli olan kararlılık elde edilebilir. Yine başka bir yaklaşım, interferometriyi sıfırlamaktır (Şekil 19.6). Bu yöntem ışığı böler (veya iki teleskoptan toplar) ve dalga boyunda yarım dalga boyunda bir kayma oluşturur, böylece birleştiğinde sinyaller birbirini iptal eder, yıldız ışığını ortadan kaldırır ve gezegen ışığını incelemeye bırakır.

19.10 Ön Gezegensel Diskleri İncelemek için Doğrudan Tespiti Kullanma

Ötegezegen arama yöntemleri sadece gezegenleri bulmak için kullanılmaz. Ayrıca, erken yıldızların etrafında oluşan gezegenlere sahip sistemlerde ön gezegensel diskleri veya toz disklerini incelemek için de kullanılabilirler. Toz diskleri çok dağınık olabilir, ancak geniş yüzey alanları, algılanmak için yeterince büyük miktarda kızıl-altı radyasyon yaydıkları anlamına gelir. Bu disk-

ler Güneşe yakın yıldızların %15'inde gözlemlenmiştir ve bize gezegen oluşum koşulları ve bu süreç gerçekleştiğinde arta kalan malzeme hakkında önemli bilgiler vermektedir.

19.11 Ötegezegen Özellikleri

19.11.1 Genel Özellikler

Ötegezegen arayışı hızla ilerleyen bir çalışma alanıdır. Yapılan keşifleri güncel bir bilgi kümesi olarak sunmaya çalışmanın faydası olmayacaktır. Bu kitabı satın alıp okuduğunuz zaman, keşfedilen çok daha fazla gezegen olacak ve bunların özellikleri de ortaya çıkarılmış olacak. Hatta keşfedilen yeni gezegen türlerinin aileleri bile olabilir. Bu da sizi en son bilgileri araştırmaya sevk eder. Tüm bilgimizi özetlemeye çalışmak yerine, burada bulunan başlıca gezegen türlerinden bazılarını gözden geçireceğim ve tespit edilen nesnelerin çeşitliliği hakkında bazı genel gözlemler yapacağım.

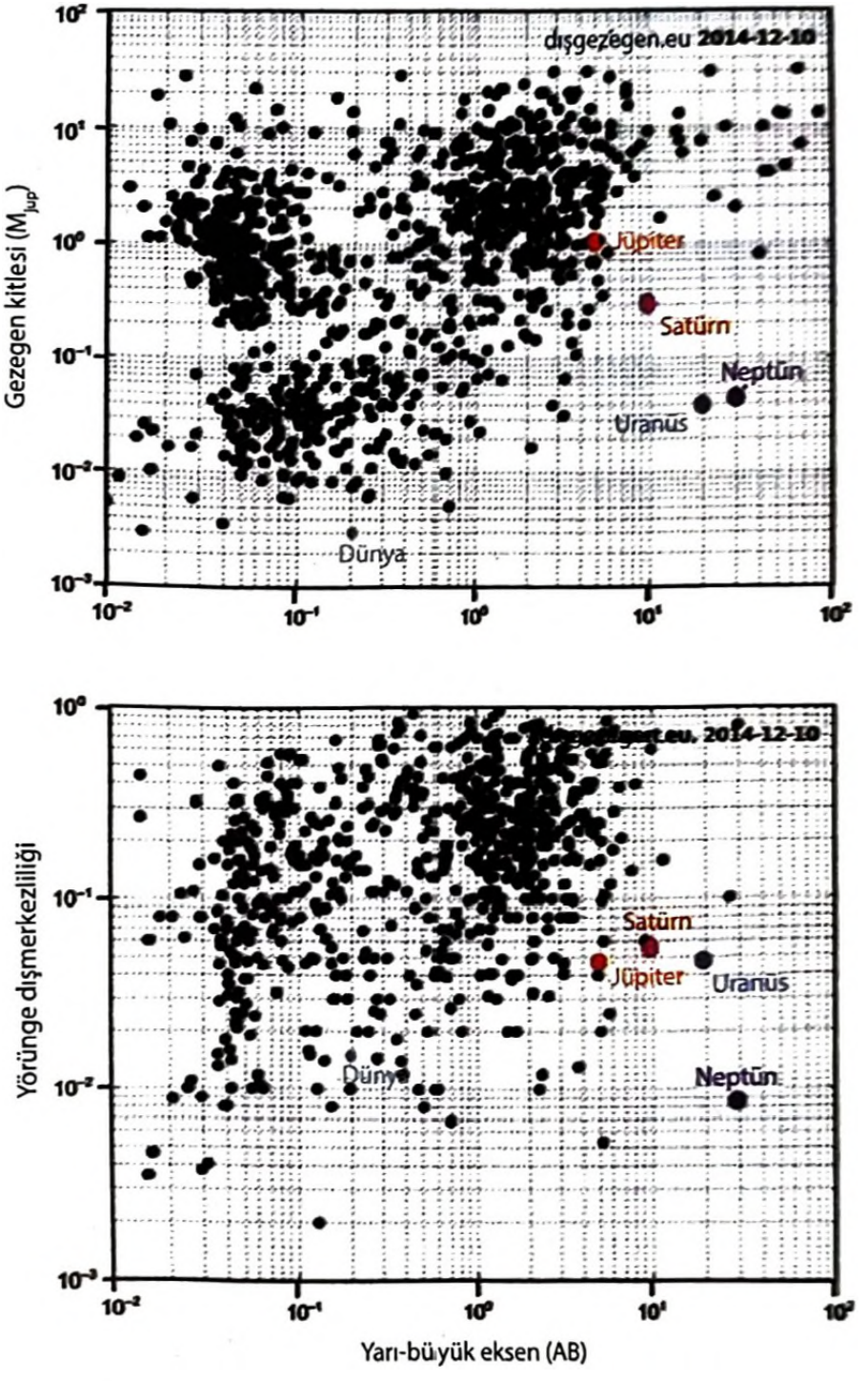
Öğreneceğimiz, büyük olasılıkla zamana direnecek, genel dersler varsa şunları içerebilir: (i) Güneş sistemimiz tipik değildir. Hemen hemen her boyutta, çeşitlilikte, yörüngede ve dış merkezliliğe sahip gezegenler tespit edilmiştir. Güneş sistemlerinin çeşitliliğinin nasıl meydana geldiği hakkında öğrenecek çok şeyimiz var (ii) Kayalık gezegenler yaygındır ve biyo-belirteçlerini tespit etmeye çalışacağımız birçok adayımız olacaktır.

Bu çalışma alanının hızla değişmesine karşın şimdiye dek tespit edilen gezegen türlerini göstermek önemlidir (bu, 2014 yılı itibarıyla gösterilmiştir). Şekil 19.7'de buna ilişkin bir diyagram bulunmaktadır. Büyük bir yarı-ana eksene sahip gezegenlerin daha az sayıda olmasının yalnızca geçiş ve radyal hız yöntemlerinden kaynaklanan bir tercih olmadığını, ayrıca 1990'larda ötegezegen araştırmalarının başlamasından bu yana, gerçek gezegenlerin diğer yıldızların yörüngesinde dönen Jüpiter benzeri gezegenlerin büyük yörünge dönemlerini tespit etmek için çok az zaman olduğunu belirtmekte fayda vardır.

Bazı ötegezegenler, Güneş Sistemimizdeki gezegenler hakkında bildiklerimize dayanarak beklenenden çok daha yüksek dışmerkezliliğe sahiptir. Yüksek dışmerkezlilik, ilk oluştuğunda bir yıldız sisteminde bulunan birden fazla gezegen arasındaki dinamik etkileşimlerden kaynaklanabilir. Bazı gezegenler sistemden atıldığında, kalan gezegenlerin oluştukları zamankinden daha yüksek dışmerkezliliğe sahip olarak devam ettikleri düşünülmektedir.

19.11.2 Sıcak Jüpiterler ve Neptünler

Jüpiter kütlesine sahip pek çok ötegezegen, ana yıldızlarına Merkür'ün Güneşe olduğundan daha yakın yörüngede döner. Bunlar Sıcak Jüpiterler olarak bilinir. Geniş anlamda, Sıcak Jüpiter, Jüpiter'inkine kabaca benzer bir kütleye ve 0.1 AB içinde bir yörüngeye sahip bir nesnedir. Sıcak Jüpiterler, yıldızlarına



Şekil 19.7 Ötegezegen özelliklerinin çeşitliliğini gösteren şemalar. Aralık 2014 itibariyle Jüpiter'in kütlesinin katları olarak ölçülen kütleye karşı gezegen yarı büyük ekseni (üstte) ve bilinen ötegezegenlerin dışmerkezliliğine karşı yarı büyük eksen (altta). Bu rakamlar, sürekli olarak güncellenmesine rağmen (ve dolayısıyla siz bunu okuduğunuzda geçerliliğini yitirmiş olsa da), ötegezegen kütlelerinin ve dışmerkezliklerin, çoğu durumda kendi Güneş Sistemimizdeki gezegenlerden çok farklı, çok çeşitli değerlere sahip olduğuna dair genel gözlemi göstermektedir. Bunlar güncelliğini yitirmeyecek genel noktalardır.

yakın olmaları nedeniyle keşfedilen ilk ötegezegenlerdi ve bu nedenle radyal hız yöntemiyle tespit edilebilirler (aynı zamanda geçiş yöntemiyle daha kolay tespit edilirler). Pek çok bilim insanını şaşırttılar çünkü keşfedilene kadar, dev gezegenlerin bir yıldız sisteminin dış sınırlarında yörüngede, kayalık gezegenlerinse kendi Güneş Sistemimizdeki gibi daha yakın yörüngede döndüğü bir paradigma olarak benimsenmişti. Yapılan modellemeler, Jüpiter benzeri gezegenlerin ana yıldızlarına yakın bir yerde oluşamayacağını, çünkü yüksek sıcaklıkların toz taneciklerinin üzerinde buz oluşmasını engelleyerek uçucu maddelerin çoğunu kaybedeceğini gösteriyor.

Jüpiter benzeri gezegenlerin kar çizgisinin ötesinde oluştuğu düşünülmektedir. Üç olası mekanizmayla yer değiştirebilirler: (i) Jüpiter gezegeni ile öngezegen diski arasındaki gelgit etkileşimlerini içeren gaz diski göçü, (ii) gezegenin, gezegenimsilerin kalıntılarıyla etkileşime girdiği gezegenimsi disk göçü ve (iii) yörüngedeki diğer gezegenlerle etkileşimlerden kaynaklanan gezegen saçılması. Bazı durumlarda, Sıcak Jüpiter olmak üzere iç diske göç edebilirler, ancak elbette bir durma süreci olmalı, yoksa ev sahibi yıldız tarafından yutulurlar. Bazı gezegenlerin akıbeti böyle olabilir ancak durmayı sağlayacak bazı mekanizmalar vardır. Örneğin, bir yıldızın erken T-Tauri evresi sırasında şiddetli rüzgârlar, yıldızın etrafındaki bir bölgeyi tozdan temizleyebilir ve daha fazla içe göç için etkili bir bariyer oluşturabilir.

Sıcak Neptünler olarak bilinen daha küçük bir sıcak gaz gezegen sınıfı vardır. Bir Sıcak Neptün, yıldızına yakın bir yörüngede bulunan ve Uranüs veya Neptün'ünkine benzer bir kütleye sahip bir ötegezegendir (Şekil 19.8). Keşfedilen ilk sıcak Neptün, 50,6 ışıkyılı uzaklıktaki Mu Arae c (veya HD 160691 c) idi.

19.11.3 Süper Dünyalar ve Okyanus Dünyaları

Bir gezegenin yarıçapı ve/veya kütlesi Dünya ile Neptün'ünkinin arasındaysa, o zaman gezegenin Dünya gibi kayalık mı yoksa Neptün gibi bir uçucu madde ve gaz karışımından mı oluştuğu sorusu gündeme gelir. Öyle görünüyor ki, belirli bir yarıçapın üzerindeki gezegenler gazlı bir yapıya sahiptir. Dünyanın yaklaşık 1,5 katı bir yarıçap, bahsettiğimiz iki tür gezegen arasında olası bir ayrım çizgisidir.

200 ışıkyılı uzaklıkta, Dünya kadar kütlesi olan düşük yoğunluklu gezegen KOI-314c'nin keşfi, hem kayalık gezegenlerin hem de düşük yoğunluklu gezegenlerin dâhil olduğu örtüşen bir kütle aralığı olduğunu göstermektedir. Bu gezegenler hidrojen atmosferi kalıntısına sahip ya da buhar atmosferli sıcak gezegenler ya da hidrojen-helyum atmosferli mini Neptünler olan okyanus gezegenleri veya süper dünyalar olabilir. Düşük kütleli düşük yoğunluklu gezegenler için diğer olasılıklar, büyük karbon monoksit, karbon dioksit, metan veya nitrojen atmosferlerine sahip gezegenlerdir. Düşük kütleli bir nesnenin bir hidrojen atmosferini nasıl tutabileceğini açıklamak zordur.

Odak: Astrobiyologlar. Debra Fischer.



Hangi alanda çalışıyorsunuz? Benim işim diğer yıldızların yörüngesindeki gezegenleri tespit etmek ve ötegezegen sistemlerinin doğasını anlamak.

Nerede çalışıyorsunuz? Amerika Birleşik Devletleri, New Haven'daki Yale Üniversitesinde profesörüm.

Üniversitede hangi bölümde okudunuz? İlk diplomamı hemşirelik bölümünden aldım. Okula tıp öncesi anadal olarak döndüğümde, matematik ve fiziği sevdiğimi keşfettim, bu yüzden bir sonraki alanım fizik oldu.

Hangi bilimsel sorularını ele alıyorsunuz? Hangi yakın yıldızlarda Dünyamıza benzeyen gezegenler var? Yaşanabilir dünyalar için en iyi ev sahipleri ne tür yıldızlar olabilir? Çoğu yıldızın birçok gezegen sistemi var mı? Dış gezegen atmosferlerinde hangi biyolojik izler tespit edilebilir? Son on yılda ekibim, ötegezegenleri tespit etmek için kullanılan araçları geliştirmek için çalışıyor. Bir gezegenin kütlesini bulmak için Doppler ölçümleri kullanıyoruz. Ev sahibi yıldızların önünden geçen gezegenlerin boyutunu belirleyebilir ve genel yapısının nelerden oluştuğunu bulabiliriz.

Astrobiyoloji alanında ilginizi çeken şey nedir? Diğer dünyalardaki potansiyel biyolojik izlerin keşfinin önümüzdeki 20 yıl içinde gerçekleşeceğini düşünüyorum. Diğer yıldızların etrafında gezegenlerin nadir olup olmadığını merak ederken artık hemen hemen her yıldızın gezegenlere sahip olduğunu öğrendiğimiz gibi, insanlık başka yerlerde yaşamın nadiren ortaya çıkıp çıkmadığını veya birçok yıldızın etrafında yaşanabilir ve yaşanmaz özellikte gezegenler bulunup bulunmadığını öğrenecektir.

Bir **okyanus gezegeni** (bazen su dünyası olarak da adlandırılır), kütlesinin önemli bir kısmı sudan oluşan bir gezegen türüdür (Şekil 19.9). Okyanus gezegenine iki aday, GJ 1214 b (yaklaşık 42 ışıkyılı uzaklıkta) ve Kepler-22b (620 ışıkyılı uzaklıkta) ötegezegenleridir. Bu varsayımsal dünyaların oluşumu göç yoluyla gerçekeleşmiş olabilir. Yapısında buz bulunan gezegenler, buzlarının eriyerek sıvıya dönüştüğü yörüngelere hareket ettiğinde okyanus gezegenlerine dönüşebilirler. Bu tür gezegenlerin yüzeyi, Dünya okyanuslarından çok daha derin olan, yüzlerce kilometre derinliğinde bir su okyanusuyla tamamen kaplanabilir. Atmosfer kalınsa, o zaman basınç ve sıcaklık, kritik üstü miktarda sıvı su meydana getirmek (Bölüm 2) ya da sera etkisi yeterliyse bir buhar atmosferi oluşturmak için yeterli olabilir. Bu okyanusların dibindeki basınçlar, yüksek basınçlı buz formlarından oluşan bir manto oluşumuna yol açabilir.

Başka bir kayalık dünya türü ise **süper-dünyadır**. Böyle bir dünyanın kütlesi 1 ile 10 Dünya kütlesi kadar olabilir. İlk süper dünyalar, 1992 yılında, yaklaşık 980 ışıkyılı uzaklıkta, pulsar PSR B1257+12 çevresinde keşfedildi. Sistemin iki dış gezegeninin kütlesi, Dünyanınkinin yaklaşık dört katıdır ki bu da onların gaz devleri olamayacak kadar düşük kütlelere sahip olduklarını göstermektedir.

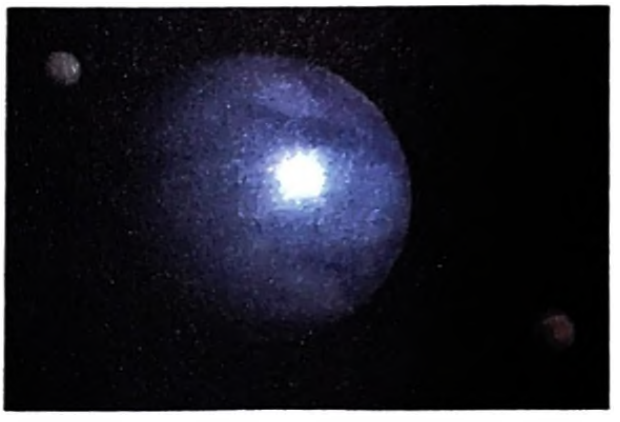
Bir anakol yıldızının etrafındaki ilk süper-dünya, 2005 yılında keşfedilen Gliese 876 d'dir. Süper-dünya, 15,3 ışıkyılı uzaklıktaki Gliese 876'nın yörüngede dolanmaktadır. Tahmini kütlesi Dünyanın 7,5 katı kadardır ve yaklaşık iki günlük bir yörünge periyoduna sahiptir. Ev sahibi olan yıldızı kırmızı bir cücedir ve ~450–650 K olası bir yüzey sıcaklığına sahiptir.

2007 yılında, Gliese 581 yıldızının yaşanabilir bölgesinin kenarında, 20.3 ışıkyılı uzaklıkta iki süper-dünyanın bulunduğu bildirilmiştir. Gliese 581 c'nin kütlesi dünyanın en az beş katı kadardır ve Gliese 581'den 0.073 AB kadar küçük bir yörünge mesafesinde döner. Bu da onun konumunun yaşanabilir bölgenin iç kenarına yakın bir yerde olması anlamına gelmektedir. Venüs gibi kaçak sera etkisine maruz kalabilir. Yıldızın yaşanabilir bölgesi içinde, yörüngesi 0,22AB ve kütlesi de dünyanın 7,7 katı kadar olan Gliese 581 d adlı bir gezegenin bulunduğu da bildirilmiştir. Bununla birlikte, verilerin daha sonraki analiz sonuçları, böyle bir gezegenin var olmadığını ve manyetik bölgeler değil de yıldızla birlikte dönen güneş lekeleri benzeri görüntülerin sahte radyal hız ölçümlerine sebep olduğunu göstermektedir. Keşfedildikten sonra Gliese 581 d'nin yol açtığı heyecan göz önüne alındığında, bu gözlemler, ötegezegen verilerini incelerken ve yeniden doğrularken dikkatli olunması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Süper-dünyalar, Dünyadakine benzeyen jeokimyasal ve hidrolojik döngülere sahip yaşanma potansiyeli barındıran dünyalar olabilir. Burada cevabı verilememiş bir soru, bu gezegenlerin levha tektoniğine ne kadar dayanabileceğidir. Çok büyük süper-dünyalar, merkezlerinde erimiş kayayı daha viskoz hale getirecek, daha az konveksiyon ve daha az verimli plaka tektoniği anlamına gelen yüksek basınçlara sahip olacaktır. Buna karşılık, okyanus dünyaları gibi su bakımından daha zengin litosferler daha verimli bir şekilde işleyen levha tektoniği sağlayabilir. Süper-dünyaların sahip olduğu levha tektoniği rejimi, Dünyaya benzer şekilde manto viskozitesi, su miktarı ve kabuğun kalınlığı gibi çeşitli faktörlerin karmaşık bir etkileşimini içerebilir (Bölüm 16).



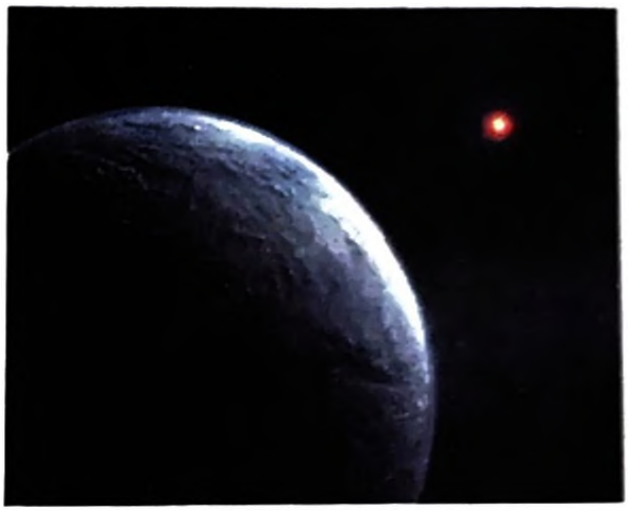
Şekil 19.8 Bir sanatçının Sıcak Neptün çizimi (Kaynak: NASA JPL)



Şekil 19.9 Bir sanatçının iki uyduya sahip okyanus dünyası çizimi (Kaynak: wikicommons, Anynobody)

19.11.4 Yaşanabilir Bölgedeki Kayalık Gezegenler

Astrobiyologların en çok ilgilendiği alanlar, yaşanabilir bölgedeki gezegenlerdir. Hâlihazırda, sayıları neredeyse kesinlikle artacak olan çeşitli adaylar vardır (Şekil 19.10). Yaşanabilir bölgedeki doğrulanmış gezegen keşifleri arasında Güneş benzeri bir yıldızın yaşanabilir bölgesinde bulunan ilk süper-dünya olan Kepler-22b ve yukarıda gördüğümüz gibi olası bir okyanus dünyası yer almaktadır.



Şekil 19.10 Bir sanatçının, başka bir yıldızın etrafında dolanan kayalık bir gezen çizimi (Kaynak: ESO)

Dünyadan 49 ışıkyılı uzaklıkta, kırmızı cüce Gliese 163'ün yörüngesinde dönen bir gezegenin (Gliese 163 c) kütlesi, Dünyanın kütlesinin yaklaşık 6,9 katıdır ve Dünyadan daha sıcak olmasına rağmen yaşanabilir bölge içinde olduğu kabul edilir. Kepler-62 (yaklaşık 1200 ışıkyılı uzaklıkta) ve Kepler-69 (yaklaşık 2700 ışıkyılı uzaklıkta) sistemleri, muhtemelen okyanuslarla kaplı süper-dünyalar olan yaşanma potansiyeline sahip gezegenlere (Kepler-62 e, Kepler-62 f ve Kepler-69 c) ev sahipliği yapmaktadır.

Bu adayların sayısının fazla olması, yıldızların yaşanabilir bölgesinde Dünya büyüklüğünde bir gezegene ev sahipliği yapma olasılığının istatistiksel bir değerlendirmesine olanak vermektedir. Kepler verilerine dayanarak, galaksimizde bulunan Güneş benzeri yıldızların %5,7'sinin, yaşanabilir bölgelerinde Dünya büyüklüğünde olan ve 200-400 günlük yörünge periyoduna sahip gezegenlere ev sahipliği yaptığını hesaplanmıştır. Kırmızı cücelerin etrafındaki yaşanabilir bölgelerin yarısında Dünya büyüklüğünde gezegenler olabilir. Bu sayılar, kayalık gezegenlerin oluşumu istatistikisel olarak daha iyi anlaşıldıkça iyileştirilecektir.

Yaklaşık 490 ışıkyılı uzaklıkta bulunan Kepler-186f, yaşanabilir bir bölgede keşfedilen gerçek Dünya büyüklüğündeki ilk gezegendi (Şekil 19.11). Bu, kırmızı cüce Kepler-186'nın yaşanabilir bölgesinde yer alan ve Dünya yarıçapının 1,1 katı büyüklüğüne sahip bir gezegendir. Kepler 452b, Güneşe benzer bir G yıldızının yörüngesinde bulunan, Dünya büyüklüğüne sahip ilk gezegendi. Kuğu takımyıldızındaki bu gezegen 1400 ışıkyılı uzaklıktadır. Çapı, Dünyanınkinden %60 daha büyüktür ve 6 milyar yaşındadır.

19.11.5 İkili ve Çoklu Yıldız Sistemlerindeki Gezegenler

Bilinen gezegenlerin çoğu tek bir yıldızın yörüngesinde döner. Yakın zamana kadar ikili yıldız sistemlerinin gezegenler için pek de iyi yerler olmayacağı var-

sayılıyordu. Öte yandan, artık bir ikili yıldız sisteminin bir üyesinin veya her iki üyesinin yörüngesinde dönen gezegenler olabildiği keşfediliyor ve Kepler sonuçları, ikili yıldız gezegen sistemlerinin oldukça yaygın olduğunu gösteriyor. Bu gezegenlerin incelenmesi, kararlı yörüngeleri ortaya çıkaracak dinamikleri nelerin belirleyebileceğine dair kısıtlamalar getirebilir.

Üçlü yıldız sistemlerinde dahi yaşanma potansiyeline sahip gezegenler olduğu tespit edilmiştir. 22,1 ışıkyılı uzaklıktaki kırmızı cüce, Gliese 667C'de (Şekil 19.12), yaşanabilir bölgesinde en az iki süper-dünya bulunmaktadır (Gliese 667 Cb, Gliese 667 Cc). Bu yıldız, iki K yıldızı (Gliese 667A ve B) içeren ikili bir sistem tarafından yörüngede döndüğü ilginç bir üçlü yıldız sisteminin parçasıdır.

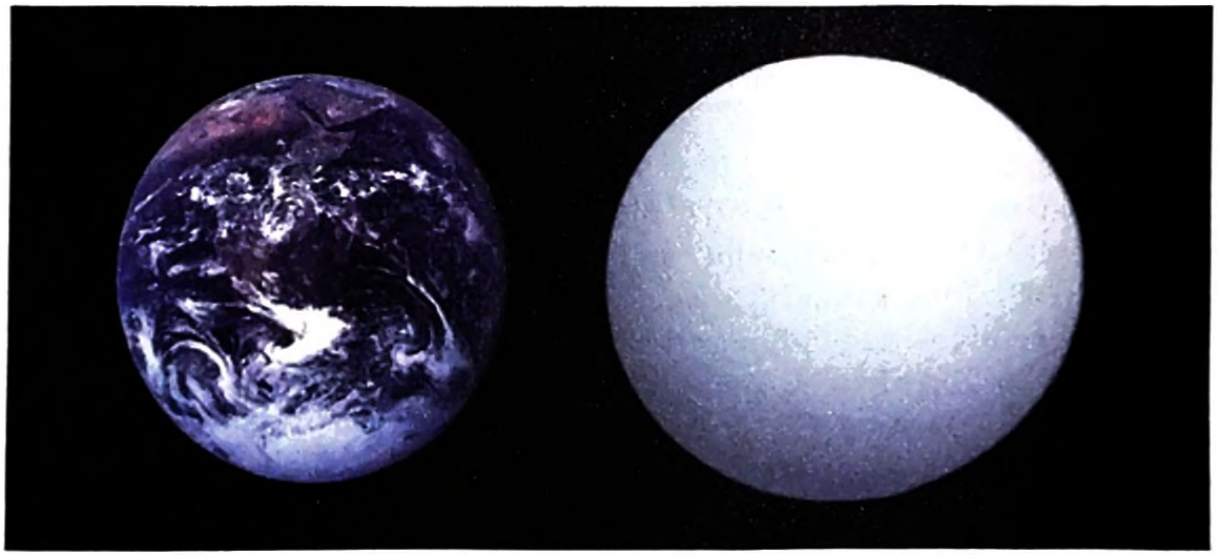
Dörtlü yıldız sistemlerinde de gezegenlerin varlığı keşfedilmiştir. Dünyadan yaklaşık 5000 ışıkyılı uzaklıkta bulunan Kepler-64 böyle bir sistemdir ve ikili çiftlerden birinin yörüngesinde dönen, kütlesi Dünyanınkinin yaklaşık 20-55 katındaki Neptün boyutunda bir gezegen olan Kepler-64b'yi içerir (Şekil 19.13).

Bu sonuçların tümü önemlidir, çünkü yıldızların yaklaşık %60'ının ikili olduğu ve diğerlerinin çoğunun da üçlü yıldız sistemleri gibi çoklu sistemlerde bulunduğu tahmin edilmektedir. Kendi Güneşimiz gibi yıldızlar, birden fazla yıldız sisteminden ayrıldıktan sonra yalnız hale gelebilir ve bu da onları kuraldan ziyade istisnai bir durum haline getirmektedir.

19.11.6 Garip Dünyalar

Güneş sistemimizdeki hiçbir gezegene benzemeyen çeşitli garip dünyalar da mevcuttur. Bunlar gezegenlerin oluşumunda izlenen yollardaki muazzam çeşitliliği ortaya koymaktadır.

Gözlemlenen bazı gaz devleri, mevcut durumda bildiğimiz Sıcak Jüpiterlerden bile oldukça farklıdır. Geniş yarıçaplı ve çok düşük yoğunluğa sahip



Şekil 19.11 Dünyayla karşılaştırılırak tespit edilen ilk yaşanabilir bölge ötegezegeni Kepler-186f'nin boyutunu gösteren şema (Kaynak: NASA).

gaz devlerine kabarık gezegenler denir. Kabarık gezegenler genellikle yıldızlarına yakın yörüngede dönerler, burada yıldızdan gelen yoğun ısı ve gezegen içindeki ısınma gezegenin atmosferini şişirir. Geçiş yöntemi kullanılarak WASP-12b (871 ışıkyılı uzaklıkta), WASP-17b (yaklaşık 1000 ışıkyılı uzaklıkta) ve Kepler-7b (yaklaşık 1000-1400 ışıkyılı uzaklıkta) dâhil olmak üzere birkaç geniş yarıçaplı düşük yoğunluklu gezegen tespit edilmiştir. Bu gezegenlerin oluşum mekanizması tam olarak kesin değildir, ancak akla yatkın bir mekanizma yıldız rüzgârını kapsar. Buna göre genişleme, yıldız rüzgârı ile gezegenin manyetosferi arasındaki etkileşimin, gezegenin her tarafını ısıtan ve atmosferinin genişlemesine neden olan bir elektrik akımı üretmesinden kaynaklanır. Bir yıldız manyetik olarak ne kadar aktif olursa, yıldız rüzgârı o kadar büyük ve elektrik akımı o kadar büyük olur, bu da gezegen atmosferinin daha fazla ısınmasına ve genişlemesine yol açar. TrES-4, Dünyadan yaklaşık 1400 ışıkyılı uzaklıkta bulunan Jüpiter'in yaklaşık 1,7 katı büyüklüğündeki kabarık bir gezegendir. Ana yıldızının yörüngesini sadece üç buçuk günde tamamlar.

Bu gezegen sınıfındaki dikkat çekici bir gezegen HAT-P-1'dir. 453 ışıkyılı uzaklıktadır, kütlesi Jüpiter'in kütlesinin %52'siyken çapı ondan %23 daha büyüktür ve yıldızının yörüngesini 4,47 günde döner. Yoğunluğu sudan düşüktür. Bu gezegen keşfedildiği sırada, bulunan en düşük yoğunluklu ötegezegendi (Şekil 19.14).

Kahverengi cüceler, çok sayıda keşfedilmiş olan başka bir gök cismi türünü oluşturur. Bunlar, Jüpiter'in yaklaşık 15 ila 80 katı kütle aralığına sahip nesnelerdir. Yaklaşık 80 Jüpiter kütlesinin üzerine çıkıldığında hidrojen füzyonu başlar ve bu cisimler yıldız olur.

Olağandışı dünya türleri gaz devlerinden ibaret değildir. Kayalık gezegenler, Güneş Sistemimizde aşina olduğumuzdan çok farklı dünya sınıflarını içerir. Bunların en tuhaflarından biri karbon gezegenleridir. Bir karbon gezegeni, oksijenden daha fazla karbon içeren bir gezegen türüdür. Öngezegen diski karbon bakımından zengin ve oksijen bakımından fakir ise, karbon gezegenleri (Şekil 19.15) oluşacaktır.

Böyle bir gezegen muhtemelen Güneş Sistemimizin karasal gezegenleri gibi demir veya çelik bakımından zengin bir çekirdeğe sahip olacaktır. Bunu çevresinde de erimiş silisyum karbür ve titanyum karbür bulunur. Yeterli basınç varsa, bunun üzerinde de muhtemelen kalın bir elmas tabakası içeren grafit şeklinde bir karbon tabakası olabilir. Volkanik patlamalar sırasında, iç kısımdaki elmasların yüzeye çıkarak elmas ve silisyum karbür dağları oluşturması mümkündür. Yüzey, Titan'a benzer şekilde donmuş veya sıvı hidrokarbonlar içerebilir.

Demir gezegense, demir açısından zengin bir çekirdeğe sahip, çok az mantosu olan veya hiç olmayan bir gezegen türüdür. Bu gezegenler aynı zamanda güle gezegenleri olarak da bilinir. Bunlar, tıpkı Dünya gibi, devasa çarpma olay-



Şekil 19.12 En üstte, bir sanatçının arkada üç yıldızlı sistemin iki yıldızının bulunduğu Gliese 667 Cb çizimi. Altta, sistemin kırmızı cüce bileşeninin yörüngesinde dönen 667Cc'nin yüzeyinde nasıl olabileceğine dair bir çizim vardır. Gökyüzünde üçlü gün batımını görebilirsiniz! (Kaynak: ESO/L. Calçada).

ları sonucunda kaya yapısındaki örtüleri sıyrılan normal metal ve silikat kayalık gezegenlerin kalıntıları olabilir. Yakın yörüngelerde veya öngezegen diskinin demir açısından zengin malzeme içerdiği büyük yıldızların çevresinde oluşurlar.

Son olarak, yaşanabilir özellikte öte-aylar bulunma olasılığı da vardır. Bölüm 18'de, kendi Güneş Sistemimizdeki gaz devi gezegenlerin buzlu uydularında yaşanabilir koşulların bulunup bulunmama olasılığını tartışmıştık. Ötegezegenler, kendi Güneş Sistemimizin buzlu uydularına benzeyen veya onlardan daha büyük uyduları barındırabilir. Bu bölümde açıklanan yöntemler kullanılarak tespit edilebilir ancak küçük uyduların tespiti özellikle hassas yöntemlerin kullanılmasını gerektirmektedir.

19.12 Yaşam Varlığının Tespit Edilmesi

19.12.1 Biyoişaretçi Gazlar

Ötegezegen araştırmalarının uzun vadeli amacı, Dünya benzeri ötegezegenlerden yayılan ışığın spektrumunu ölçmektir.

Bir ötegezegenin atmosferindeki yaşamın spektroskopik tespiti, metabolik gazların tespit edilebildiği bir soğurma spektrumu (Bölüm 2) sağlamak üzere canlılar tarafından gerçekleştirilen metabolik süreçlerle (Bölüm 5) ilişkili gazların yeterli birikimine bağlıdır. Bu yaklaşım zorunlu olarak Dünyadaki yaşam hakkında bildiklerimizle sınırlıdır, ancak karasal atmosfer, bir dizi aday biyoişaretçi gaz hakkında bilgi sağlar.

Dünyanın görünür ve kızıl ötesi bölgeleri kapsayan bir spektrumunu incelersek, karasal atmosferin bileşenlerinden kaynaklı olduğu söylenebilecek bazı büyük soğurmaları fark ederiz. Şekil 19.16, bu özelliklerden bazılarını ve ayrıntılarını göstermektedir.

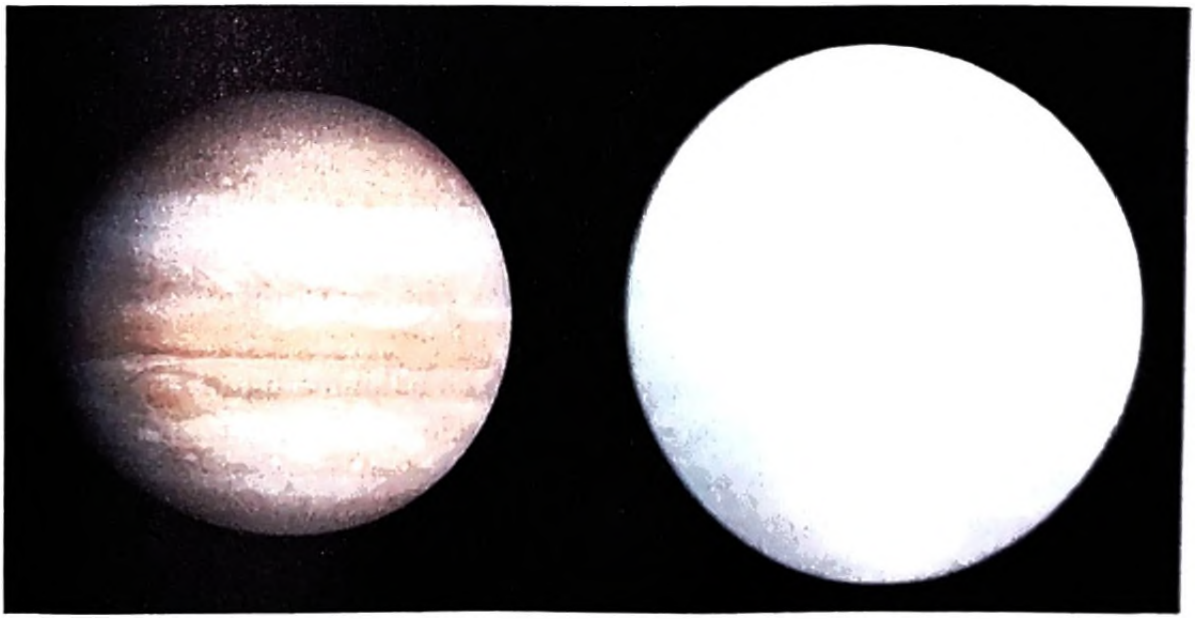
Bu özellikler, 1990 yılında Jüpiter'e yaptığı yolculuk sırasında yapılan dâhiyane bir deneyde, uzay aracının yaşamı tespit edip edemeyeceğini görmek

için Dünyaya döndürüldüğü sırada Galileo uzay aracı tarafından tespit edildi. Uzay aracındaki yakın kızıl ötesi spektrometre, ozon gazı varlığını başarıyla tespit etti. Ozon (O_3), stratosferde O_2'nin UV radyasyonuyla fotolizi sonucunda oluşur. Ozon gazı, kızıl-altı bölgedeli 9,6 μm dalga boyunda güçlü ve belirgin bir soğurmaya sahiptir. Atmosferimizdeki O_3 varlığı Şekil 19.16'da açıkça gösterilmektedir. Bu O_3'e aynı zamanda ayrıca, uzaylı astronomlara su bulutlarının, muhtemelen bir hidrolojik döngünün ve yaşanabilir koşulların varlığını düşündürecek güçlü bir H_2O belirtisi de eşlik etmektedir.

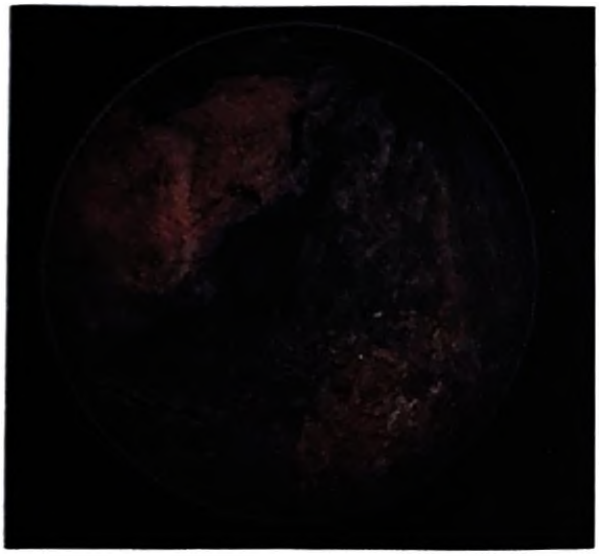


Şekil 19.13 Kepler 64b, dörtlü bir yıldız sisteminin parçası olan ikili yıldızların yörüngesinde dönen Neptün boyutunda bir gezegendir (Kaynak: NASA/JPL-Caltech/T. Pyle, SSC).

Biyoişaretçi gazların ömrü, radyasyon varlığından güçlü bir şekilde etkilenir. Örneğin, M yıldızlarının etrafındaki gezegenler, ara sıra meydana gelen parlamalara rağmen, genellikle daha düşük, son derece kısa dalga boylu UV radyasyonuna maruz kalırlar. Bunun atmosferdeki serbest radikallerin üretimini azaltması ve biyoişaretçi gazların yaşam süresini ve potansiyel konsantrasyonunu artırması beklenebilir.



Şekil 19.14 HAT-P-1 kabarık gezegeninin Jüpiter'e kıyasla boyutunu gösteren şema (Kaynak: NASA).



Şekil 19.15 Bir karbon gezegeninin bir sanatçı tarafından çizilmiş resmi (Kaynak: NASA).

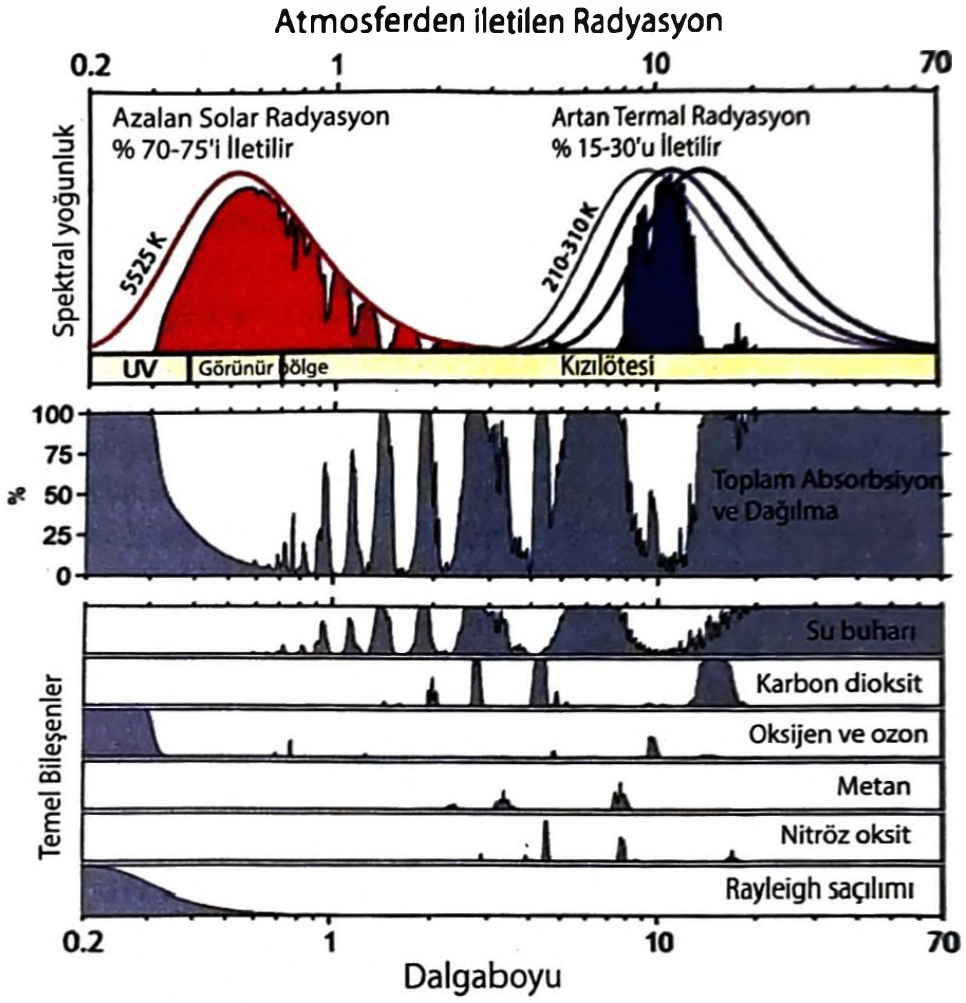
Abiyotik bir atmosferde O_2 oluşumunu modellemek için pek çok girişimde bulunulmuştur. Özellikle jeolojik süreçlerle verimli bir şekilde uzaklaştırılmazsa, bol su içeren bir atmosferde fotolitik reaksiyonlarla yüksek konsantrasyonlarda O_2 oluşabilir. Ancak karasal bir atmosferde yüksek konsantrasyonlarda O_2 üretimini sağlayan tek mekanizmanın fotosentez olduğu düşünülmektedir. Bu, yaşamın güçlü bir belirtecidir. Bununla birlikte, yaşamın "yanlış pozitif" denen tespitine olanak veren koşulların tanımlanması, biyo-belirteç arayışı için çok önemlidir. Bilim insanları, ötegezegen atmosferlerinde farklı gazların nasıl birikebildiğini ve abiyotik süreçlerle biyolojik olarak önem arz eden gazların birikmesine olanak verebilecek farklı gezegensel atmosferik ve kimyasal süreçleri anlamak için önemli çaba sarf ediyorlar.

Atmosferdeki dengesizlikler biyolojik aktivitenin güçlü bir göstergesidir. Bir atmosferde önemli konsantrasyonlarda O_2 ve CH_4'ün varlığı, denge dışı koşullara yol açan biyolojik süreçleri düşündürür. Yaşam varlığına dair Galileo'dan gelen başka bir kanıt, CH_4'ün yüksek konsantrasyonlarda saptanmasından gelmiştir zira O_2 varlığında CH_4'ün yüksek konsantrasyonlarda olması beklenmez. Yabancı atmosferlerde biyo-belirteçleri tespit etmenin bir yolu olarak dengesizliğin kullanımı ilk olarak çevre bilimci James Lovelock tarafından kabul edilmişti.

Atmosferik soğurma spektrumumuzdaki bir diğer çok güçlü nitelik de CO_2'dir. Bu gaz, Venüs ve Mars atmosferinde de gözlenmektedir (Şekil 19.17). Bu gezegenlerin atmosferlerinin her birinde konsantrasyonlar farklıdır, ancak belirtisi, ~400 ppm'lik karasal konsantrasyonlar için bile güçlüdür. Ayrıca Venüs ve Mars'taki CO_2'nin varlığının yanında, Dünyada var olan O_3 biyo-belirtecinin eksik olduğunu fark edeceksiniz.

Biyo-belirteç eksikliğinin bir gezegende yaşamın bulunmadığını kanıtlamadığını anlamak önemlidir zira bu gezegen, özellikle sınırlı spektral çözünürlüğe sahip bir alet tarafından tespit edilebilir bir belirti vermeyen çok düşük biyokütleye sahip olabilir.

Galileo deneyi, yaşamın uzaktan saptanabilirliği ilkesinin basit bir gösterimiydi. 1992'de bir uzay aracı ayın benzer bir analizini yaptığında, bu kontrol deneyinde şaşırtıcı bir şekilde herhangi bir biyolojik belirteç saptanmadı.



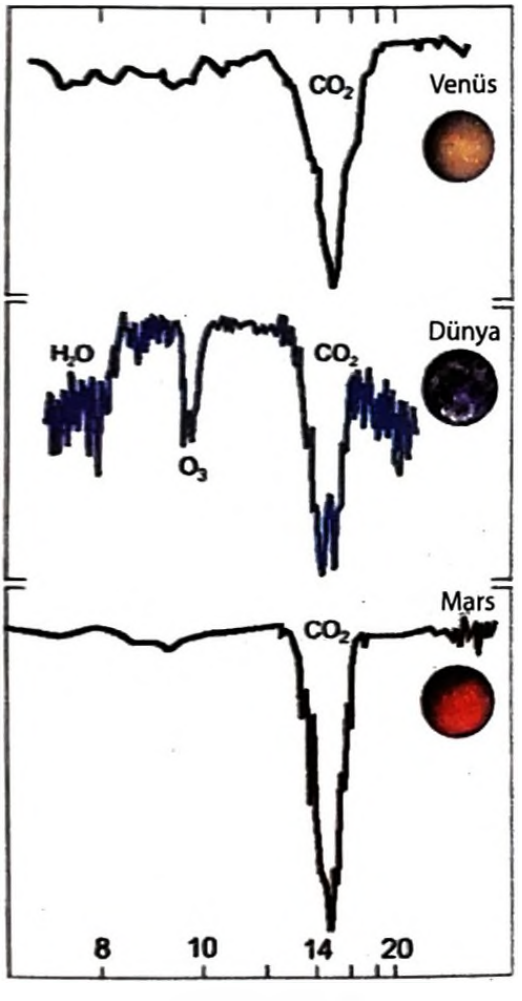
Şekil 19.16 Dünyanın soğurma spektrumu. En üstte, Dünyanın Güneşten aldığı radyasyon 0,2-70,0 μm (morötesinden kızıl ötesi dalga boyuna) dalga boyu aralığında gösterilir. Bunun üzerine, 5525 K'da bir kara cisim radyatöründen gelen radyasyonu gösteren düz kırmızı bir eğri yerleştirilmiştir. Gezegen tarafından yayılan enerji (yükselen termal radyasyon) sağ tarafta gösterilmektedir ve çok daha düşük sıcaklıktaki bir kara cisme eşdeğerdir (Bölüm 16). Farklı eğriler (mor, mavi ve siyah), eşdeğer kara cisim sıcaklığının, radyasyonun gezegenin neresinden yayıldığına bağlı olduğunu göstermektedir. Kara cisim eğrilerinin altında, Dünyanın toplam soğurma (saçılma dâhil) spektrumu bulunur. Grafiğin alt kısmında, atmosferdeki saçılmanın neden olduğu radyasyon kaybının yanı sıra bazı önemli farklı atmosferik bileşenlerin soğurması gösterilmektedir (Rayleigh Saçılması) (Kaynak: wikicommons, Robert A. Rohde).

Biyolojik belirteçler bakımından makul bir hedef olarak önerilen O_2'ye alternatif adaylar vardır. Bir denitrifikasyon ürünü olan N_2O (nitröz oksit) atmosferde kısa süre bir kalır (~110 yıl) ve atmosferdeki varlığı, üretimi için biyolojik bir mekanizma varlığını düşündürür.

Organizmalar tarafından üretilen kükürt gazları, başka bir olası biyolojik belirteç sınıfı olarak kabul edilmiştir. Dimetil sülfür (CH_3SCH_3 veya DMS) ve dimetil disülfid ($CH_3S_2CH_3$ veya DMDS), biyojenik kükürt gazlarının örnekleri-

dir. Modelleme çalışmaları, bu gazların konsantrasyonlarının uzaktan tespit edilebilir seviyelere yükselebileceğini ancak bunun yalnızca onları yok etme eğiliminde olan düşük UV radyasyon akıları altında mümkün olabileceğini göstermektedir. Bu, düşük aktiviteli bir M yıldızının yaşanabilir bölgesinde meydana gelebilir. Organik kükürt gazlarının, biyolojinin varlığının dolaylı işaretleri olabilecek etan (C_2H_6) gibi diğer gazların konsantrasyonunu arttırdığı düşünülmektedir.

Teknolojik olarak üretilmiş gazların bile biyolojik belirteç olduğu öne sürülmüştür. Kloroflorokarbonlar (CFC'ler) çözücü ve soğutucu olarak kullanılır ve ozonun delinmesine ("ozon deliği" olarak adlandırılır) katkılarını önlemek amacıyla uluslararası olarak yasaklanmıştır. Güçlü spektroskopik soğurmaya sahiptirler ve konsantrasyonlarının yüksek olması gerekse de uzaylı gökbilimciler tarafından tespit edilebilirler. İnsan uygarlığına gelince, zeki uzaylıların atmosferlerinde çok yüksek konsantrasyonlarda biriken bu bileşikleri sınırlamaya çalışması muhtemel görünüyor.



Şekil 19.17 Venüs, Mars ve Dünyanın görünür bölgeden kızıl-altına dek olan soğurma spektrumu, özellikle Dünya atmosferinde, atmosferdeki yüksek oksijen konsantrasyonlarının neden olduğu 9,6 μm dalga boyundaki ozon biyo-belirtecine ilişkin ayrıntıyı göstermektedir.

N_2O zaten teknolojik olarak üretilmiş bir gazdır. Dünyadaki konsantrasyonu 320 ppb'nin üzerindedir. Gaz, tarım, endüstriyel faaliyet ve fosil yakıt yakma yoluyla antropojenik olarak üretilir (Şekil 19.18). Sera gazı olan CO_2'den yaklaşık 300 kat daha etkilidir, bu nedenle atmosferdeki konsantrasyonu büyük ilgi görmektedir.

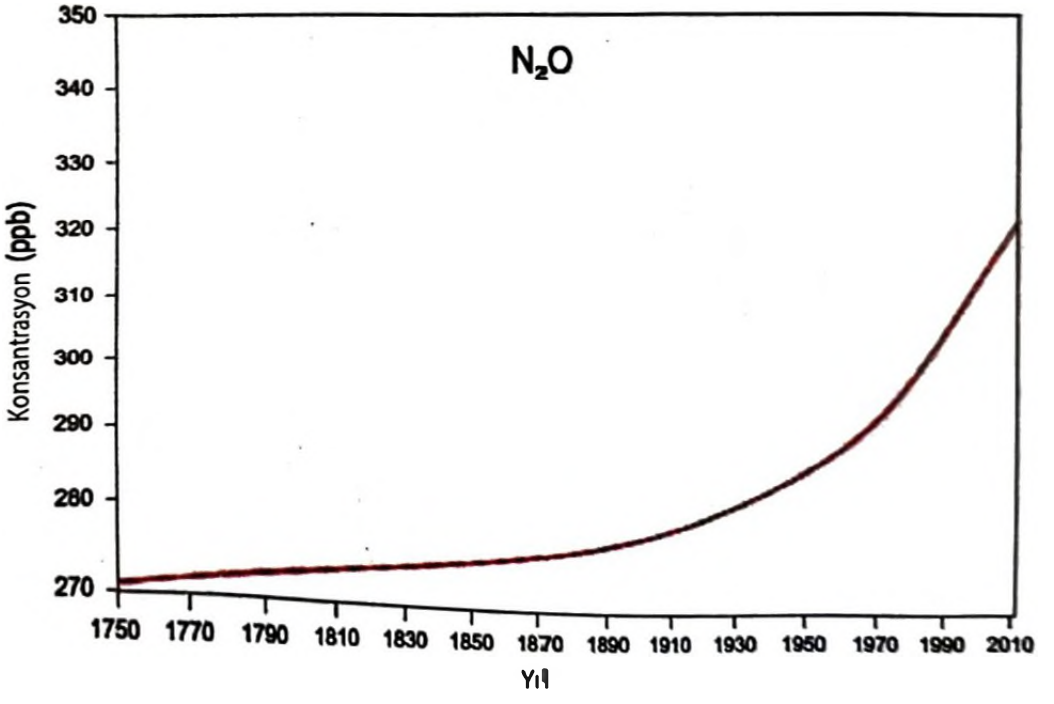
Atmosferimizde bulunan gazların jeolojik zaman dilimlerinde değiştiğini unutmamalıyız. Büyük Oksidasyon Olayından önce (Bölüm 14), atmosferde önemsiz miktarda O_2 vardı. Biyolojik üretimden kaynaklanan CH_4'ün varlığı saptanabilir olsa da, bu belirteç, jeolojik süreçlerle üretilebildiğinden, kendi başına bulunduğunda, O_2'den daha kuşkuludur. Ulaşılan konsantrasyonlara bağlı olarak, uzaylı bir astronomun bunun biyolojik mi yoksa jeolojik mi olduğunu kesin olarak söylemesi mümkün olmayabilir. Büyük Oksidasyon Olayının ~2,4

Ga önce gerçekleştiği göz önüne alındığında, bu, gezegen tarihimizin yaklaşık yarısının O_2 biyo-belirteci olmadan geçtiği anlamına gelir.

Dünya kütlesine sahip gezegenlerin spektrumlarını çözmek için yeterli ışık toplamanın yöntemleri olarak bir dizi görev ve yaklaşım üzerinde düşünülmektedir. Bu bölümde daha önce tartışılan geçiş yöntemi, bir gezegenden gelen ışığa bakmanın ve böylece atmosferin bileşimi hakkında spektroskopik veriler elde etmenin bir yoludur. Gezegen yıldızın önünde olduğunda, hem yıldızdan hem de gezegenden gelen ışık spektrumuna sahip olurken, gezegen yıldızın arkasındayken (ikincil geçiş olarak adlandırılır), yalnızca yıldızın spektrumuna sahip oluruz. Bu spektrumları çıkararak gezegenin atmosferik spektrumu hakkında bilgi toplayabiliriz.

Biyo-belirteçleri tespit etmek için önerilen bu geçiş yöntemleri, CO_2, H_2O, CO ve CH_4 gibi gazlar da dâhil olmak üzere, Sıcak Jüpiter'in atmosferlerindeki gazları araştırmakta zaten çok başarılı olmuştur ve yöntemin Dünyaya benzeyen gezegenlerin uzaktaki atmosferlerini incelemek için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Değerlendirilen diğer teknolojiler, ana yıldızdan gelen ışığı fiziksel olarak engelleme ve yörüngedeki gezegenlerin ışığını tespit etme yöntemleri olan koronagraflar ve Güneş kırıcılardır (Şekil 19.19).



Şekil 19.18 Modern dönemde atmosferdeki N_2O'nun milyar başına parça (ppb) cinsinden konsantrasyonları. Atmosferdeki N_2O, genel bir biyo-belirteç olmanın yanı sıra teknolojik bir uygarlığın biyo-belirteci haline de gelmiştir.

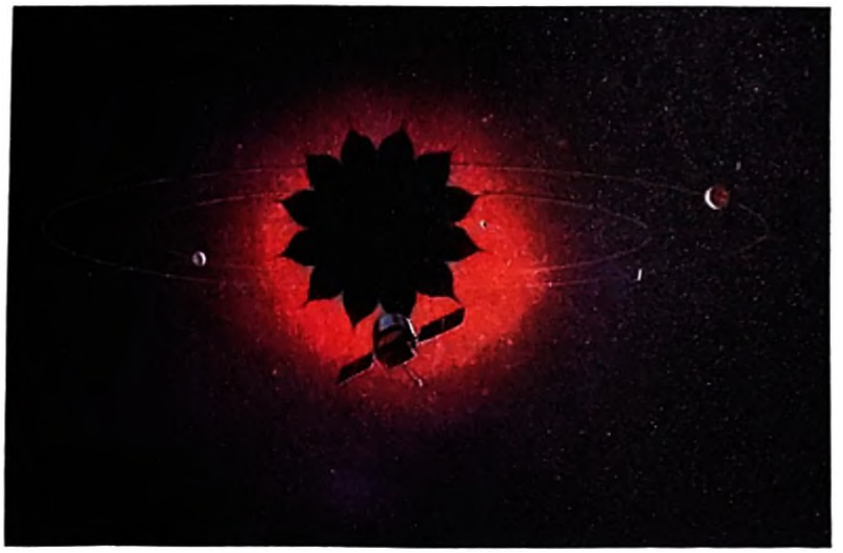
19.12.2 Yüzey Biyo-belirtçeleri

Yaşam sadece gazları değil, belirli uyarlanımsal ve metabolik aktivitelerin karakteristik özelliği olan yüzey pigmentlerini de üretir. Bunlar da ötegezegenlerde yaşamı bulmada kullanılabilecek bir yol olarak önerilmiştir.

Bu olası belirteçlerin en iyi biçimde araştırılmış olanı **kırmızı kenar bitki örtüsüdür** (vegetation red edge) (Şekil 19.20). Kırmızı kenar, spektrumun kırmızı bölgesindeki fotosentetik molekül olan klorofil (Bölüm 5) tarafından soğurmadan kaynaklanır. Bu soğurma durumu, kızıl ötesi bölge içindeki güçlü yansımaya tezat oluşturur. Özellikle fotosentetik bitkiler kızıl ötesi bölgede güçlü bir yansımaya sahiptir ve bu da muhtemelen, soğrulan kızıl-altı radyasyon nedeniyle metabolik bakımdan tehlike arz eden aşırı ısınmayı önleyen evrimleşmiş bir mekanizmadır. Bu, yüksek kızıl-altı yansıtmanın, fotosentez sürecinde evrimleşen fotosentetik organlardaki yapıların çıkan bir özelliği olma olasılığına işaret eder.

Yeryüzündeki bitki örtüsünün kırmızı kenarı, yüzeyden yansıyan radyasyonun uydu ölçümlerinde o kadar belirgindir ki bitki örtüsünü haritalamak için kullanılabilir.

Birkaç grup, Dünyanın ışığının tam bir disk spektrumunu elde etmek üzere, bir ötegezegenden elde edilene benzer şekilde, ayın karanlık tarafından yansıyan Güneş ışığını kullanan Earthshine tekniğiyle Dünya spektrumunu ölçtü. Earthshine ölçümleri, Dünyanın bitki örtüsüyle kaplı kenarının tespitinin mümkün olduğunu, ancak geniş, esasen özelliksiz spektrumu ve bulutların engelleyici etkileri nedeniyle ölçümün zor olduğunu göstermiştir. Dünyanın uzamsal olarak çözülmemiş bir yarım küresi üzerinden ortalaması alındığında, bu spektral özelliğin ek yansıtıcılığı ancak küçük bir yüzde tutar.



Şekil 19.19 Bir sanatçının yıldız ışığını engellemek ve yörüngedeki gezegenlerin tespitine yardımcı olmak için kullanılan bir koronagraf (merkezdeki yıldız şeklindeki nesne) çizimi. Gezegenler ölçekli değildir, ancak kavramı açıklamak için gösterilmiştir (Kaynak: NASA).

Tartışma Noktası: Bir biyobelirteç tespit edildikten sonra ne olur?

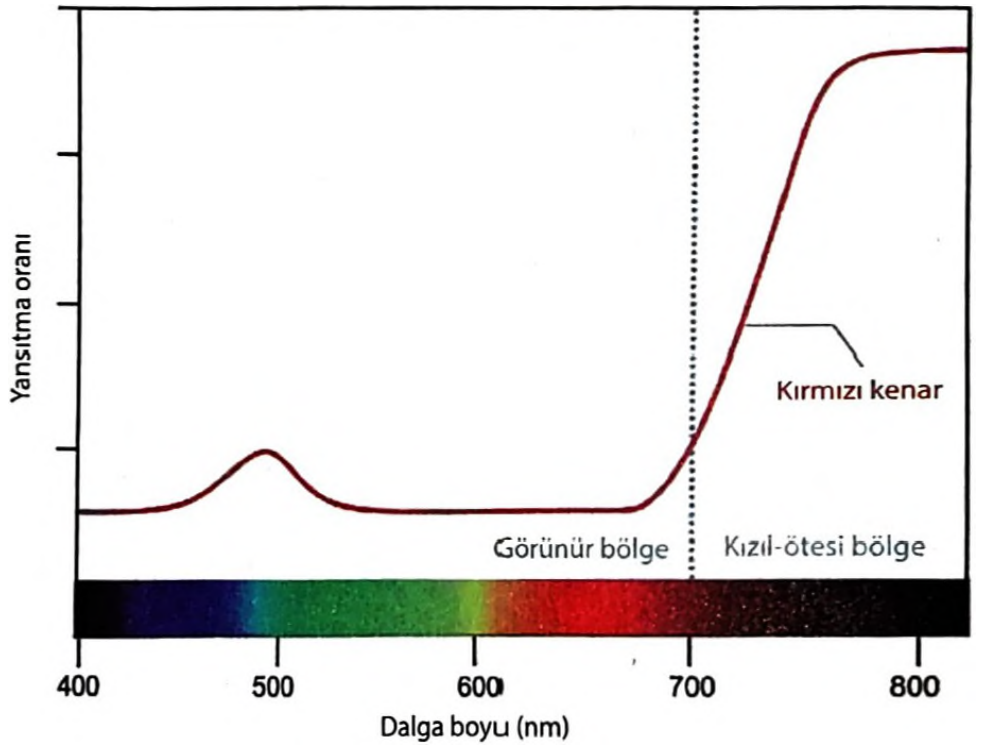
Bir ötegezegen üzerinde bir biyo-belirteç arayışına odaklanmak kolaydır ve böyle bir olay, genel olarak astrobiyoloji ve bilim için kesinlikle çok büyük önem arz edecektir. Ancak, tartışılması gereken açık bir soru, böyle bir belirteç bulduğumuzda ne yapacağımız sorusudur? Bir örneğin alınıp getirilmesi görevini ciddi olarak tartışabilir miyiz? Böyle bir gezegenin yüzlerce, muhtemelen binlerce ışıkyılı uzaklıkta olduğunu varsayarsak, böyle bir görev, ışık hızında seyahat eden bir sondayla bile nesiller sürecek bir görev olacaktır. Öncelikle yapılacak işlerden biri, yaşamın ürettiği biyolojik imzalara ev sahipliği yapan yaşanabilir bölgedeki gezegenlerin sayısının istatistiksel olarak sağlam bir tahminini elde etmek için biyo-belirtece sahip daha fazla gezegen aramak olabilir. Ancak, bu görev bile bir kez başarıldığında, daha sonra ne yapılabilir? Ötegezegen biliminin biyolojik belirteçlerin saptanmasının ötesinde bir geleceği var mı? Spektroskopik kenarın tam dalga boyu ve gücü, bitki türlerine ve çevreye bağlıdır. Başka bir yerdeki herhangi bir varsayımsal fotosentetik yaşam formunun tayf belirteçleri, ana yıldızın tayf çıktısına göre değişebilir. Diğer yıldızlar için oldukça farklı spektrumlar önerilmiştir. Örneğin, tayfın kırmızıya kaydığı ve yoğunluğun düşük olduğu M yıldızlarının çevresinde, bitkilerin tüm dalga boyu aralığında mümkün olduğunca fazla enerji toplaması gerekebilir. Bu koşullar altında bitkiler siyah olabilir. Daha mavi radyasyon yayan F yıldızlarının yörüngesindeki gezegenlerdeki bitkiler, mavi bölgeye doğru kaymış soğurmalara sahip olabilir ve bu da onlan yeşil, sarı ve hatta kırmızı olarak gösterebilir. Bunlar fazlasıyla spekülatif çıkarımlar, ancak karasal yaşamı bir standart olarak kullanırken arayabileceğiniz biyolojik belirteç türleri hakkında varsayımlarda bulunurken dikkatli olmanın önemini vurgulamaktadırlar. Tüm pigmentler fotosentezle ilgili değildir. Serbest oksijen radikallerini ortadan kaldırmak gibi bir dizi işlevde rol oynayan ve her yerde bulunan renkli pigmentler olan karotenoidler, çoğu abiyotik malzemelerden farklı olan belirgin soğurma pikleri ve kenarları da üretir. Bunlar da biyolojik aktiviteye yönelik bir belirteç sağlayabilir.

19.12.3 Bu Belirteçlerle Karşılaşma Olasılığı Ne Kadardır?

Güneş sistemi dışında fotosentezin ve gaz belirteçleri ve yüzey yansıtma spektrumu gibi diğer biyobelirteçlerin araştırılması, diğer gezegenlerde yaşamın ortaya çıkışının yaygın olması, (Dünyada oksijenli fotosentezin sadece bir bakteri soyu tarafından yapıldığı bilinoyerken) başka yerlerde fotosentezin evrimleşme olasılığının yüksek olması ve atmosferin fotosentetik yaşam tarafından değiştirilmesinin uzaktan saptanabilecek kadar çok gaz belirteçleri üreteceği varsayımlarını, daha doğrusu ön-varsayımlarını, içerir. Bununla birlikte, biyo-belirteç arayışı, bu olaylar dizisinin yaygın mı yoksa nadir mi olduğu hipotezini test etme isteğinden kaynaklanmaktadır. Nadir olduklarının keşfi, başlı başına oldukça önemli bir sonuç olacaktır. Öte yandan, bu sonuçlara varabilmemiz, farklı gazların üretimine olanak veren abiyotik koşulları ve dolayısıyla yanlış-pozitif yaşam tespiti yapma potansiyelimizin farkında olmamızı gerektirir.

19.13 Sonuçlar

Diğer yıldızların etrafındaki gezegenlerin tespiti, astrobiyolojiyi bilimin ampirik alanına sağlam bir şekilde dâhil etmiştir. Aday gezegenleri bulmak amacıyla ayrı ayrı ve kombinasyon halinde çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Bu yöntemlerin başarısı, Dünyanın kütlesine sahip olan gezegenlerin saptanmasına olanak sağlamıştır. Bu tür dünyalara ait bir katalogla, şimdi bu gezegenlerden yansıyan ışık spektrumlarını toplamak ve böylece onların atmosferik bileşimlerini ortaya çıkarmak üzere teleskoplar inşa edebilecek durumdayız. Astrobiyolojinin amacı, bu gezegenleri biyo-belirteçler, özellikle de oksijen, bakımından araştırmaktır. Nihayetinde, bu görev, tüm evrene dağılmış yaşam barındıran başka gezegenlerin olduğu hipotezini test etmemize olanak sağlayacaktır.



Şekil 19.20 Bitki örtüsünün kırmızı kenarını gösteren şematik yansıma spektrumu. Tam spektrum farklı organizmalar için değişir. (Kaynak: Charles Cockell).

İleri Okumalar

Kitaplar

Casoli, F., Encrenaz, T. (2007) *The New Worlds: Extrasolar Planets*. Springer Praxis, New York.

Seager, S. (2010) *Exoplanets*. Arizona Üniversitesi Yayınları, Tucson.

Yayınlar

Arnold, L., Bréon, F.-M., Brewer, S. (2009) The Earth as an extrasolar planet: The vegetation spectral signature today and during the last Quaternary climatic extrema. *International Journal of Astrobiology* 8, 81–94.

Borucki, W.J., Koch, D.G., Batalha, N. *et al.* (2012) Kepler 22b: a 2.4 Earth-radius planet in the habitable zone of a Sun-like star. *Astrophysical Journal* 745, doi 10.1088/0004-637X/745/1/120.

Burrow, A.S. (2014) Spectra as windows into exoplanet atmospheres. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 12601–12609.

Cockell, C.S. (2014) Habitable worlds with no signs of life. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 372, 20130082.

Des Marais, D.J., Harwit, M.O., Jucks, K.W., Kasting, J.F., Lin, D.N.C., Lunine, J.L., Schneider, J., Seager, S., Traub, W.A., Woolf, N.J. (2002) Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets. *Astrobiology* 2, 153–181.

Elkins-Tanton, L.T. (2010) Formation of early water oceans on rocky planets. *Astrophysics and Space Science* 332, 359–364.

Kaltenegger, L., Jucks, K., Traub, W. (2007) Spectral evolution of an Earth-like planet. *Astrophysical Journal* 658, 598–616.

Kiang, N.Y., Siefert, J., Govindjee, B., Blankenship, R.E. (2007a) Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms. *Astrobiology* 7, 222–251.

Kiang, N.Y., Segura, A., Tinetti, G., Govindjee, B., Blankenship, R.E., Cohen, M., Siefert, J., Crisp,

D., Meadows, V.S. (2007b) Spectral signatures of photosynthesis. II. Coevolution with other stars and

the atmosphere on extrasolar worlds. *Astrobiology* 7, 252–274.

Léger, A., Fontecave, M., Labeyrie, A., Samuel, B., Demangeon, O., Valencia, D. (2011) Is the presence of oxygen on an exoplanet a reliable biosignature? *Astrobiology* 4, 335–341.

Lovelock, J.E. (1975) Thermodynamics and the recognition of alien biospheres. *Proceedings of the Royal Society of London B* 189, 167–181.

Petigura, E.A., Howard, A.W., Marcy, G.W. (2013) Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 19273–19278.

Sagan, C., Thompson, W.R., Carlson, R., Gurnett, D., Hord, C. (1993) A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature* 365, 715–721.

Seager, S., Turner, E.L., Schafer, J., Ford, E.B. (2005) Vegetation's red edge – possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants. *Astrobiology* 5, 372–390.

Seager, S., Deming, D. (2010) Exoplanet atmospheres. *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 48, 631–672.

Segura, A., Meadows, V.S., Kasting, J.F., Crisp, D., Cohen, M. (2007) Abiotic formation of O2 and O3
in high-CO2 terrestrial atmospheres. *Astronomy and Astrophysics* 472, 665–679.

Tinetti, G., Meadows, V.S., Crisp, D., Fong, W., Fishbein, E., Turnbull, M., Bibring, J.-P. (2006) Detectability of planetary characteristics in disk-averaged spectra. I: The Earth model. *Astrobiology* 6, 34–47.

Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., Levison, H.F. (2005) Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature* 435, 459–461.

Wolstencroft, R.D., Raven, J.A. (2002) Photosynthesis – likelihood of occurrence and possibility of detection on Earth-like planets. *Astrobiology* 157, 535–548.

Woolf, N.J., Smith, P.S., Traub, W.A., Jucks, K.W. (2002) The spectrum of Earthshine: A pale blue dot
observed from the ground. *Astrophysical Journal* 574, 430–433.

20

DÜNYA DIŞI ZEKÂ ARAYIŞI

Öğrenme Çıktıları

- Drake denklemini ve bileşen faktörlerini anlamak.
- Radyo ve optik DDZA'da kullanılan yöntemlerden bazılarını açıklamak.
- DDZA'nın tarihçesini ve kullanılan bazı yöntemleri anlamak.
- Fermi Paradoksu ve olası çözümlerinden bazıları hakkında bilgi edinmek.
- Bir medeniyet için önerilen sınıflandırma şemalarından bazılarını anlamak.
- DDZA'nın politika çıkarımlarından bazılarını anlamak.

20.1 Dünya Dışı Zekâ Arayışı

İnsanların Dünyanın ötesindeki yaşamı merak etmeye başlar başlamaz, bu yaşamın zekâ sahibi olup olmadığını da sorgulamaya başlamaları kaçınılmazdı. Tüm bilimsel alanlarda olduğu gibi, bu soru da ancak test edilebilir hipotezler kurulabilirse deneysel hale gelebilir. Aksi takdirde, ilgi çekici ama sınırsız bir spekülasyon âlemi içinde kalır.

Hipotezlerden biri şöyle olabilir: 'Dünyanın ötesinde akıllı yaşam var'. Bununla birlikte, kozmik arka kapımızda mesajlarını almamızı bekleyen bazı uzaylılar bulacak kadar şanslı değilsek, hipotez test edilemez hale gelebilir. En yakın iletişimsel uygarlık uzak bir gökadadaysa, milyonlarca ışık yılı uzakta olabilirler. Bu, tüm pratik amaçlar için, en azından erişimimiz olan ve öngörülebilir gelecekte sahip olacağımız teknolojiyle, hipotezi test edilemez hale getirecektir. Eğer iletişim veya seyahat hızı, zannettiğimiz gibi, kaçınılmaz olarak ışık hızına (c) ayarlanmışsa, o zaman farklı insan uygarlıklarının yaşam süreleriyle uyumlu gerçekçi zaman dilimleri üzerinden iletişim asla mümkün olmayabilir.

Daha izlenebilir hipotezlerden biri şudur: 'Şu anda bizim için erişilebilir olan akıllı uygarlıklardan gelen mesajlar var'. Bu hipotez, tamamen makul bir bilimsel hipotezdir. Kolayca test edilebilir ve çürütülebilir. Teleskopları ve di-



Şekil 20.1 Dünya Dışı Zekâ Arayışı, evrende iletişim halinde olan başka zekâların olup olmadığını bulmaya çalışır. Bu görüntü, DDZA programlarında kullanılan Batı Virginia'daki Green Bank radyo teleskopunu göstermektedir (Kaynak: NRAO/AUI).

ğer aparatları gökyüzüne çevirebilir ve birçok ilginç uzaylı bilgisiyle dolu herhangi bir sinyal alıp almadığımızı görebiliriz. Onları bulursak hipotezi kabul eder ve bulamazsak hipotezi reddederiz (boş hipotezi kabul ederiz).

Geriye dönüp bakıldığında ve bugüne kadar bu tür sinyallerin aranmasının sonuçsuz kaldığı göz önüne alındığında, bu hipoteze gülüp geçmek kolay. Ama altmış yıl önce, bunu kim biliyordu? Belki de uzayın radyo ve optik frekansları, bağlantı kurmaya çalışan hüsrana uğramış uzaylılardan gelen sinyallerle doluydu. Sadece en azından bu tür sinyalleri arayarak hipotez test edilebilir (Şekil 20.1).

Dünya Dışı Zekâ Arayışı (DDZA) yeryüzü tabanlı yan ürünlere sahip olabilir. Örneğin, büyük miktarda verideki sinyalleri aramak için geliştirilen karmaşık algoritmalar, bilgisayar teknolojisi ve iletişim teknolojisinin geliştirilmesinde, örneğin birçok dar dalga bandı kanalında bilgi işlemede daha geniş bir kullanıma sahiptir.

Bununla birlikte, bu çaba için hiçbir mazerete ihtiyacımız yok, çünkü insanın bilimsel girişiminin temel sorularından birini ele alıyor: Bu uçsuz bucaksız evrende yalnız mıyız?

20.2 Drake Denklemi

Evrende kaç tane akıllı iletişim uygarlığı var? Bu soruyu cevaplayacak hiçbir verimiz yok, ancak soruyu cevaplayabilmek için tam olarak ne bilmemiz gerektiğini öğrenecek şekilde soruyu çözmeye çalışabiliriz. Bunu yapmak için ilk girişim 1961'de Frank Drake tarafından yapıldı. Ünlü matematiksel ilişkisi, galaksideki bu tür uygarlıkların sayısını belirtmek için tasarlanmış basit bir ifadedir (ancak galaksinin ötesindeki ölçeklere uygulanabilir). Denklem aşağıda gösterilmiştir:

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

buradaki koşullar şu şekildedir:

N = gökadamızdaki iletişimin mümkün olabileceği uygarlıkların sayısı;
R^* = gökadamızdaki ortalama yıldız oluşum hızı;
f_p = gezegenleri olan yıldızların oranı;
n_e = yıldız başına yaşamı potansiyel olarak destekleyebilecek ortalama gezegen sayısı;

f_l = yaşamı destekleyebilecek ve yaşamı geliştirebilecek gezegenlerin oranı;
f_i = bir uygarlık geliştirmeye devam eden yaşam içeren gezegenlerin oranı;
f_c = varlıklarının algılanabilir işaretlerini üreten bir teknoloji geliştiren uygarlıkların oranı;
L = bu tür uygarlıkların bu sinyalleri uzaya saldığı süre.

Elbette bu denklemi eleştirmek kolay. F_l'yi düşünün. Bir uygarlığı geliştirecek yaşam içeren gezegenlerin sayısını hiç bilebilir miyiz? Bu tahmin edilemez ve muhtemelen sadece birçok yaşam taşıyan gezegenin deneysel gözlemiyle belirlenebilir. Denklem, diğer bir ilgili faktörün, diğer uygarlıkların mevcut uygarlığımızla uyumlu teknolojiyle iletişim kurup kurmadığını hesaba katmaz. Kendi teknolojimiz zaman içinde önemli ölçüde değişti. İki yüz yıl önce radyo iletişimimiz yoktu ve önümüzdeki 200 yıl içinde ortaya çıkabilecek radikal iletişim yöntemlerinin kapsamı olup olmadığını bilmiyoruz. Başka bir deyişle, temas kesiti önemlidir. Tabii ki denkleme bizim uygarlığımızla uyumlu iletişim yöntemlerine sahip uygarlıkların oranını hesaba katan bir terim ekleyebiliriz.

Bununla birlikte, denklemin iyi kullanımları vardır. Problemi çözmemize ve ne yaptığımızı ve ne bilmediğimizi düşünmemize izin verir. Örneğin, son bölümde gördüğümüz gibi, Güneş Sistemi dışındaki gezegenlerle ilgili verileri kullanarak, 40 yıl önce tahmin edilmesi imkansız bir faktör olan f_p'yi tahmin edebiliriz (Şekil 20.2). Denklem, Dünyanın ötesinde yaşama sahip olan gezegenlerin ve uygarlıkların sayısını ölçme arayışımızda astronomik ilerlemeyi izlememize izin veriyor. Astrobiyologların gökadadaki uygarlıkların sayısını tahmin edip edemeyeceğimizi ve bu sorunun hangi bölümlerinin izlenebilir olduğunu düşünmeleri için bir çerçeve sağlar. Bunun dışında, gerçek kullanımlarını merak ediyor olsanız bile, eğitim amaçlı kullanımı muazzamdır.



Şekil 20.2 Güneş Sistemi dışındaki kayalık gezegenleri aramak, Drake denkleminde f_p'yi kısıtlamamıza olanak verir (Kaynak: NASA).

Tartışma Noktası: Drake Denklemi

Frank Drake, Drake Denklemini ilk önerdiğinde, N'yi galakside 10.000 uygarlık bulunduğu tahminini yansıtacak şekilde kullandı. Bu tahminden bu yana, gezegenleri olan yıldızların sayısını ve yaşanabilir bölgelerdeki gezegenlerin sayısını tahmin etmemizi sağlayan Kepler Uzay Teleskobu verilerine sahibiz. N'nin değeri hakkında bilinçli bir tartışma yapmak için Drake Denklemini kullanın, uygarlıklar sosyolojisine bağlı olan

ve asla tahmin edilemeyecek faktörleri ve deneysel belirlemeye açık olan faktörleri tanımlayın. Ötegezegenlerin incelenmesinde ve yaşamın spektroskopik işaretlerinin araştırılmasında gelecekteki gelişmeler, eğer gerçekten yapabilirlerse, *N*'nin tahminini nasıl iyileştirebilir? Argümanlarınızı tanımlayarak ve tahmininizdeki belirsizlikleri ölçerek kendi *N* değerinizi tahmin etmeye çalışabilirsiniz.

20.3 Dünya Dışı Zekâ Arayışında Kullanılan Yöntemler

İnsanlar uzun zamandır uzaylı uygarlıkların var olma olasılığını düşünmekteler. Percival Lowell'ın teleskobuna baktığını, Mars'ın kutup buzullarından suyu kanalize etmeye çalışırken kendilerini umutsuzca kurtaran, ölmekte olan ve kurumuş bir uygarlık tarafından inşa edilen Mars'a ait kanallarla ilgili haritalama yaptığını ve bolca yazdığını görmek için son yüzyıllarda bile 20. yüzyılın başlarından daha geriye gitmemize gerek yok.

Bununla birlikte, radyo dalgalarını kullanarak Dünya dışı varlıklardan bir sinyal almaya yönelik ilk ciddi girişim, 1960 yılında Frank Drake'in öncülük ettiği (Şekil 20.3) ve Greenbank Teleskobuyla (Şekil 20.1) yürütülen Ozma Projesiydi. Güneş benzeri yıldızlar Tau Ceti ve Epsilon Eridani'yi incelemek için yaklaşık 150 saatlik toplam gözlem süresi harcandı. Hemen hemen aynı zamanda, 1959'da Cocconi ve Morrison tarafından yayınlanan bir makale, uzaylı sinyalleri bulma olasılığını savundu. 1960'larda Sovyet bilim insanları da çeşitli projeler başlattı. O zamandan beri, Berkeley'deki California Üniversitesi tarafından başlatılan bir proje olan SERENDIP* (Yakındaki Gelişmiş Akıllı Popülasyonlardan Dünya Dışı Radyo Yayınımlarını Arama) dâhil olmak üzere başka çabalar geliştirildi. Bu projelerin hiçbiri herhangi bir sinyal bulamadı.



Şekil 20.3 DDZA araştırmalarının öncüsü ve Project Ozma'nın yaratıcısı Frank Drake (Kaynak: Science Picture Library).

Bugün çoğu DDZA projesi ya radyo-teleskoplarla boşa zaman harcıyor ya da SERENDIP gibi, daha geleneksel diğer radyoastronomi yapılırken veri topluyorlar. Veri analizine yönelik akıllı yaklaşımlar, insanların özel evlerindeki kişisel bilgisayarların radyo-teleskoplar tarafından toplanan büyük miktarda bilgiyi toplu olarak analiz etmek için internet üzerinden birbirine bağlandığı SETI@Home ve SETILive'ı içeriyor.

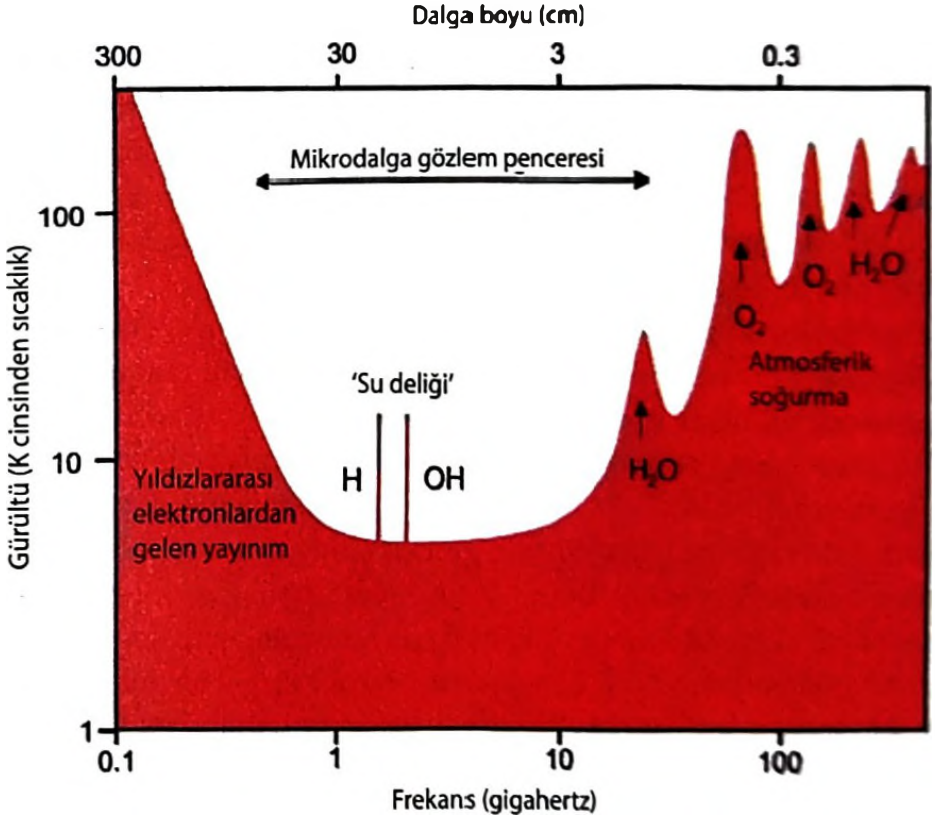
Yeni teleskoplar DDZA için

* [İng.] Search for Extraterrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations –çn.

başka olanaklar sunuyor. Kilometre Kare Dizisi (SKA*), Güney Afrika ve Avustralya'da bir kilometre karelik etkin toplam radyo çanak boyutuna sahip çok sayıda çanak olarak önerilmektedir. Tesis, medeniyetimizin yaydığına benzer bir radyo sızıntısı için 300 ışık yılı içinde arama yapan DDZA için kullanılabilir.

DDZA topluluğunun ilk günlerinden beri karşılaştığı bir soru, hangi sıklıkta arama yapmaları gerektiğidir? Elektromanyetik spektrum oldukça geniştir ve tüm spektrumu aynı anda dinlemek zordur.

Tercih edilen arama konumlarından biri 1420 MHz'de (21 cm dalga boyu) olmuştur. Bu, Ozma Projesinde kullanılan dalga boyuydu. Hidrojen atomlarının bir protonu ve bir elektronu vardır. Kabaca, iki gezegene benzer şekilde, dönüşleri aynı veya zıt yönde olabilir. Bir durumdan diğerine geçtiklerinde 1420 MHz'de bir foton yayınlanır. Hidrojen evrende yaygındır, bu nedenle uzay astronomlarının o bölgeye bakmak isteyebileceklerini varsayıyoruz. Bu frekansa yakın bir yerde, hidroksil radikali (OH) yayınımıyla ilişkili frekans (1640 MHz) bulunur. OH'la birleşen hidrojen, su (H_2O) üretir. Tıpkı hayvanların çöldeki su birikintisinde toplanması gibi, analojide iletişim halinde olan uygarlıkların da bu kozmik



Şekil 20.4 Hidrojen ve hidroksil frekansları, elektromanyetik spektrumda ("su deliği") uzaylı sinyalleri aramak için girişimlerin yapıldığı bir yer sağlar. Bu bölge aynı zamanda Dünya üzerindeki gözlem için nispeten şeffaftır. Turuncu, burada atmosferin neden olduğu soğurma olarak kabul edilebilecek 'gürültüyü' ifade eder. Eksenler logaritmik ölçeklerdir.

* [İng] Square Kilometer Array –çn.

radyo dalgası "su deliğinde" toplanmasını bekleyebiliriz (Şekil 20.4). Atmosfer bu frekanslara nispeten şeffaftır, bu da onları oldukça tespit edilebilir kılar. Uzay teleskopları bu avantajın teorik önemini ortadan kaldırsa da pahalıdırlar. Bu dalga boyu birçok DDZA aramasında kullanılmıştır, ancak hiçbir şekilde arama yapmak için tek mantıklı yer değildir. Bir permütasyon, hidrojen frekansını π gibi sabitlerle bölerek veya çarparak elde edilen frekanslarda arama yapmaktır, çünkü π diğer zekâlar tarafından bilinebilecek evrensel bir sayıdır.

DDZA araştırmasında bir sorun var, çünkü uygarlıkların düzenli olarak ve güçlü belirteçlerle iletişim kurduğunu varsayıyor. Bir uygarlık olarak, yabancı uygarlıklara yönelik bilinçli aktarımlarımız çok sınırlıyken neden diğer toplumlardan farklı bir şey bekleyelim? Radyo ve TV sinyalleri gibi istemeden gönderdiğimiz sinyaller, yıldızlararası mesafelerde başarılı bir iletim amacıyla tasarlanmadıkları için çok güçlü olmamıştır. İlk büyük küresel televizyon yayını 1936'daki Berlin Olimpiyat Oyunlarıydı, bu nedenle uzaylı uygarlıkların son derece güçlü alıcıları olsa bile, 2015 itibarıyla hala yalnızca 79 ışık yılı mesafeye ulaşabilmiş bulunuyoruz.

Daha yakın zamanda yapılan aramalar, bizim yönümüzde lazer darbeleriyle iletilmiş olabilecek sinyalleri toplamaya çalışan "optik DDZA"ya döndü. Harvard Üniversitesi böyle bir program başlattı. İnsan uygarlığı, Güneşten yaklaşık 5000 kat daha fazla parlaklığa ulaşabilen son derece güçlü lazerler inşa etti. Belki de diğer uygarlıklar mesaj göndermek için bu tür teknolojileri kullanıyorlardır. Optik DDZA'nın karşılaştığı bir problem, spektrumun optik bölgesinde çok fazla gürültü olmasıdır. Daha yeni fikirler, yıldızlararası ortamda toz emmeye daha az eğilimli olan kızıl ötesi DDZA'yı içeriyor.

Çok yakın bir zamana kadar tüm bu araştırmalar, gezegen sistemleri hakkında herhangi bir bilgiye bakılmaksızın, gezegenler için makul ortamlara sahip olabilecek yıldızlar üzerinde yapıldı. Ötegezegen araştırmaları (Bölüm 19) DDZA'da incelenmeye değer gezegenlerin sayısını sınırlamamızı sağladığından, ötegezegen araştırmasıyla DDZA arasında bir yakınsama vardır. Zekâ sahibi canlıların ortaya çıkışı için oksijenin gerekli olduğu varsayımını yaparsak, oksijen biyo-belirteçlere sahip, Dünya kütlesindeki kayalık gezegenlerin araştırılması, potansiyel DDZA hedeflerinin daha da daraltılmasını sağlayacaktır.

Bazı bilim insanları, belki de tüm uzaylıların gezegenlerinde çok büyük yıldızlararası mesafeler boyunca iletişim kurmaya çalıştıklarını varsaymamamız gerektiğini düşündüler. Belki de bizi gözlemlemek veya bizimle iletişim kurmak için Güneş Sistemimize bir sonda göndermişlerdir. Dünya Dışı Eserler Arayışı (SETA*) başka bir durumdur, ancak daha az ilgi çekici değildir. Bu yaklaşımın arkasındaki fikir, kendi Güneş Sistemimizde uzay sondaları aramaya başlamamız gerektiğidir. Bu tür nesnelerin, elektromanyetik tayfın çoğunda son derece küçük ve muhtemelen çok karanlık olması beklenir, bu da tespit edilmelerini

* [İng] The Search for Extraterrestrial Artefacts -çn.

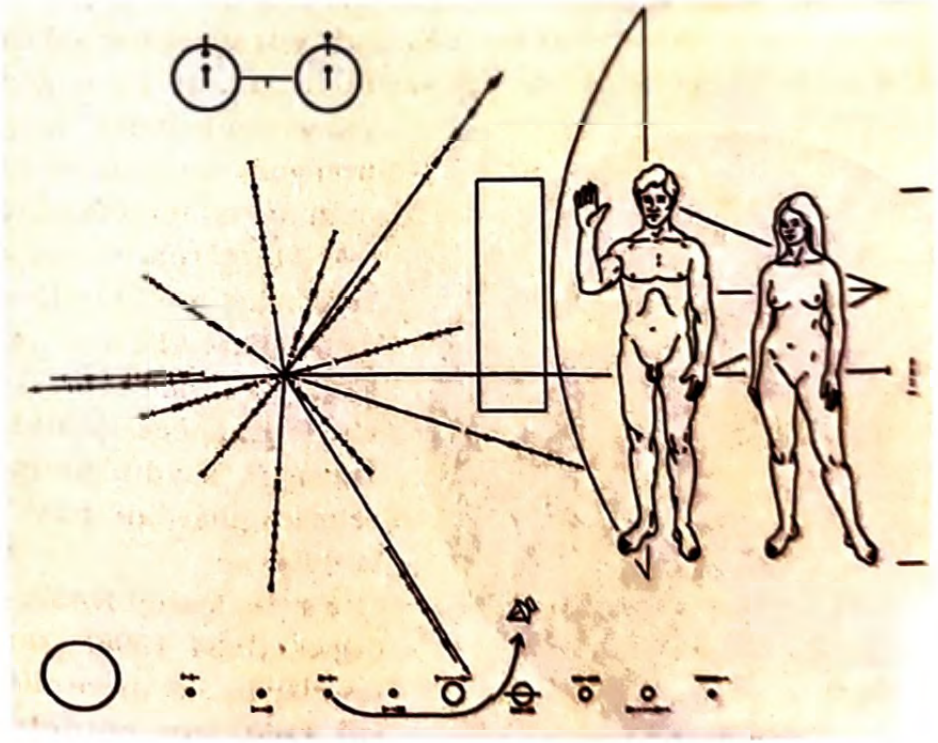
oldukça zorlaştırır. Optik ve kızıl ötesi aramalar ve örneğin Kuiper Kuşağı içinde çok yoğun aramalar uygulanabilir.

20.4 Dünya Dışı Zekâyla İletişim

Diğer tüm uygarlıkların mesaj göndermesini beklemek, ancak bunu yapmak için hiçbir çaba göstermemek bir uygarlığın ihmalkarlığıdır. Toplumumuz çok konuşkan olmasa da, herhangi bir potansiyel alıcıya mesaj göndermek için geçici çaba sarf ettik. Dünya Dışı Zekâyla İletişim (DDZİ) konusundaki çabalarımız genel olarak iki kategoriye ayrılabilir: fiziksel materyaller ve elektromanyetik tayftaki mesajlar.

Fiziksel materyalleri mesaj olarak göndermek için kayda değer iki girişimde bulunuldu. Jüpiter ve Satürn'e gönderilen Pioneer 10 ve 11 uzay araçlarının her ikisi de yanlarına 23 cm genişliğinde ve 15 cm yüksekliğinde altın anodlu alüminyum birer levha aldı (Şekil 20.5). Bu gemiler artık Dünyadan 80 AB daha uzaktadır.

Levha birkaç öğeyi tasvir ediyor. Levhanın sol üst köşesinde, daha önce tartışılan hidrojenin dönüş geçişinin şematik temsili yer almaktadır. Bu sembolün altında, ikili basamak 1'i temsil eden küçük bir dikey çizgi bulunur. Bir hidrojen atomunun elektron halinden elektron hali dönüşüne kadar olan bu döndürme-çevirme geçişi, bir uzunluk birimi (dalga boyu 21 cm) ve bir zaman birimi (frekans 1420 MHz) belirtebilir. Her iki birim de diğer sembollerde ölçü olarak kullanılır.



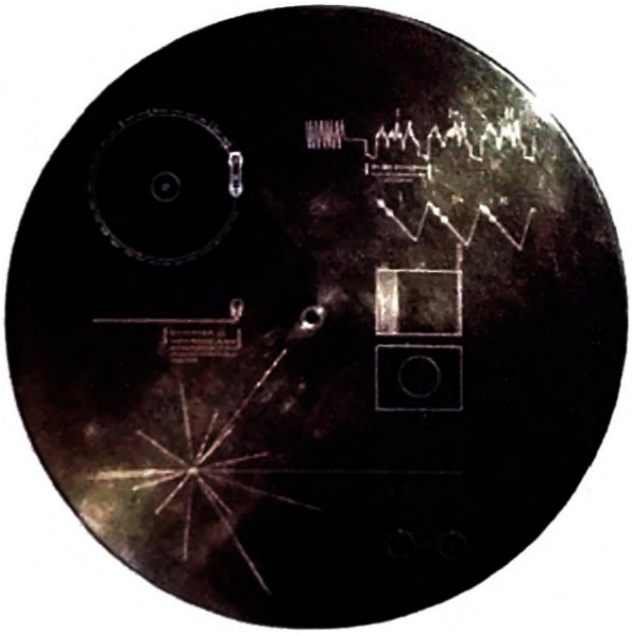
Şekil 20.5 Pioneer uzay aracı levhaları (Kaynak: NASA).

Sağda, türümüz hakkında ölçek ve bilgi vermek için uzay aracının silüetinin üzerine yerleştirilmiş bir erkek ve kadının görüntüsü var. Levhanın solundaki radyal desen, aynı orijinden çıkan 15 çizgiyi gösterir ve bu, sondanın gönderildiği konumu belirtir. Çizgilerin uzunlukları, pulsarların Güneşe göre mesafelerini gösterir. Her satırın sonundaki bir onay işareti, galaktik düzleme dik olan Z koordinatını verir. 15. sıra, insanların arkasında, en sağda uzanır. Çizgi, Güneşin galaktik merkeze göre mesafesini gösterir. 14 pulsarın konumunun verilmesi artıklık sağlar, böylece yalnızca bazı pulsarlar bilinse bile orijin konumu belirlenebilir. Çizgilerin on dördü, birim olarak hidrojen döndürme-çevirme geçiş frekansını kullanarak pulsarların darbelerinin (periyotlarının) zamanını temsil eden karşılık gelen ikili sayılara sahiptir. Bu süreler zamanla değişeceğinden (pulsar dönüşleri azalacağından) uzay aracının fırlatılma süresi de hesaplanabilir.

Levhanın altında, aracın Güneş Sistemimizdeki hangi gezegenden geldiğini gösteren bir Güneş Sistemi haritası gösterilmektedir.

Maddeleri mesaj olarak göndermek için ikinci bir girişim, 1977'de Voyager 1 ve 2 sondalarına 30 cm çapında iki altın kaplama bakır kayıt eklendiğinde yapıldı; bunların her ikisi de dış Güneş Sistemini keşfetmeye ve sonunda Güneşi terk etmeye mahkûm edildi. Sistemin tamamı (Şekil 20.6). Voyager uzay aracı 1977'de fırlatıldı. Voyager 1 1990'da Plüton'un yörüngesini geçti ve 2013'te Güneş Sisteminden ayrıldı. Yaklaşık 40.000 yıl içinde Voyager 1, Camelopardalis takımyıldızında bulunan Gliese 445 yıldızına, Voyager 2 Andromeda takımyıldızında bulunan yıldız Ross 248'e yaklaşmış olacak. Her ikisi de bu yıldızların yaklaşık 1,5 ışık yılı içinde gelecek.

Her iki kayıtta da radyometrik tarihlendirmeye izin vermek için ultra saf bir uranyum-238 örneği var (Bölüm 13). Kayıtla karşılaşan bir uygarlık, kaydın yaşını belirlemek için kalan uranyum ile yan elementlerin oranını kullanabilecektir. Kayıttaki 116 görüntü analog olarak kodlanmış ve 512 dikey çizgiden oluşuyor. Kaydın geri kalanı seslidir ve dakikada 16,66 devirde çalınacak şekilde tasarlanmıştır. Kaydın önünde nasıl çalınacağına dair bazı talimatlar bile var.



Şekil 20.6 Voyager kaydı (Kaynak: NASA).

Kaydın içeriği NASA için Carl Sagan (1934–1996) tarafından tasarlandı. Sagan ve meslektaşları kayıt için görüntüleri bir araya getirdi. Görüntüler siyah

beyaz ve renkli olanları içeriyordu. Matematiksel ve fiziksel nicelikler, Güneş Sistemi ve gezegenleri, DNA'nın yapısı ve insan anatomisi hakkındaki bilgileri içeriyorlardı. Manzara, bitki, böcek ve diğer hayvanların resimleri dâhil edildi. İnsanlık görüntüleri, insanların yaşamlarını sürdürdüğünü gösteriyor ve yemek ve mimari görüntüleri var. Kayıt, rüzgâr, sörf, gök gürültüsü, balinalar ve kuşlar dâhil olmak üzere hayvanların sesleri gibi çeşitli sesler içeriyordu. Müzik seçimi Mozart, Bach, Beethoven, Stravinsky, Chuck Berry ve Dünyanın dört bir yanından diğer müzikal seçimleri içeriyordu. Amerika Birleşik Devletleri Başkanı Jimmy Carter ve Birleşmiş Milletler Genel Sekreteri Kurt Waldheim'dan 55 eski ve modern dilde selamlar ve basılı mesajlar vardı. Pioneer uzay aracıyla gönderilen hidrojen molekülü diyagramı ve pulsar haritası, herhangi bir alıcının nereden gönderildiğini anlayabilmesi için kaydın ön yüzüne dâhil edildi.

Elektromanyetik bir mesaj iletmek için en belirgin girişim Arecibo mesajıydı. 16 Kasım 1974'te 23.000 ışık yılı uzaklıktaki küresel yıldız kümesi M13'e 1000 kW'lık bir mesaj gönderildi ve 2380 MHz'te iletildi. Mesaj üç dakikalık bir süre boyunca gönderildi ve 1679 ikili basamaktan oluşuyordu. Bu sayı, 23 ve 73 asal sayılarının benzersiz ürünü olduğu için seçilmiştir. İkili gösterim, bilgi iletmenin en basit yolu olarak kullanılır. Mesaj bu şekilde bölündüğünde (Şekil 20.7) bize ve medeniyetimize dair bir dizi bilgi sağlar. Mesajın üstten başlayarak sıralı anahtar bileşenleri şunlardır: (i) birden ona kadar olan sayılar, (ii) DNA'yı oluşturan hidrojen, karbon, azot, oksijen ve fosfor elementlerinin atom numaraları, (iii) DNA'nın nükleotidlerindeki şekerler ve bazlar için formüller, (iv) DNA'daki nükleotid sayısı ve DNA'nın çift sarmal yapısının bir grafiği, (v) ortalama bir insanın boyu, bir insanın grafik şekli ve Dünyadaki insan nüfusu, (vi) mesajın hangi gezegenlerden geldiğini gösteren Güneş Sistemi grafiği ve (vii) Arecibo radyo teleskopunun grafiği ve verici anten çanağının çapı.

Mesajın kat etmesi gereken mesafe, onu bir sohbet başlatmak anlamında gerçek bir girişim olarak pratik kılmaz, ancak bu tür mesajları göndermek için bir radyo teleskopu kullanma yeteneğini ortaya koyar.

Dünya dışı zekâyla iletişimde her zaman gayet açık bir problem söz konusudur, bu da iletişimde hangi dilin kullanılacağıdır. Evrensel bilgi nedir? Birçok insan matematiğin iletişim kurmanın açık bir yolu olduğunu ileri sürmüştür. Muhtemelen herhangi bir radyo-teleskop veya lazer yapımı evrensel matematiği kullanır. Örneğin, π gibi sabitlerle ilgili rastgele olmayan bilgiler içeren bir mesaj, uzaylı zekâsına dair bir işareti düşündürür. Yine de, bilginin, onu yıldızlararası gürültüden ayrılabilir kılmak için nasıl yapılandırılacağı önemli bir soru olarak karşımızdadır?

Odak Noktası: Astrobiyologlar: Jill Tarter



Hangi konu üzerine çalışıyorsunuz? Ekibim, Dünyanın ötesindeki diğer teknolojik uygarlıkların kanıtlarını tespit etmeye çalışmak için radyo teleskopları kullanıyor. ETİ'yi arıyoruz.

Nerede çalışıyorsunuz? Şimdi emekliyim, ancak kariyerimin çoğunu Mountain View, California'daki kar amacı gütmeyen DDZA Enstitüsünde çalışarak geçirdim.

İlk uzmanlık alanınız neydi? Fizik mühendisliği.

Hangi bilimsel sorulan ele alıyorsunuz? Kadim "yalnız mıyız?" sorusuna cevap vermeye çalışıyoruz. Özellikle, teknolojiyi istihbarat için bir araç olarak kullanıyoruz ve diğer uzak, akıllı medeniyetleri keşfetmeye çalışıyoruz. Optik ve radyo teleskoplarını kapsayan kendi yirmi birinci yüzyıl teknolojilerimizi kullanarak, doğal biçimde yayılan değil de tasarlandıklarını düşündüren özelliklere sahip sinyalleri arıyoruz. Bu, henüz icat etmediğimiz çok ileri teknolojilerin kanıtlarını muhtemelen gözden kaçıracağımız anlamına gelir. Tasarlayamadığımız bir şeyi bilinçli olarak arayamasak da, belki başka bir şey ararken bazı kanıtlara rastlayabiliriz.

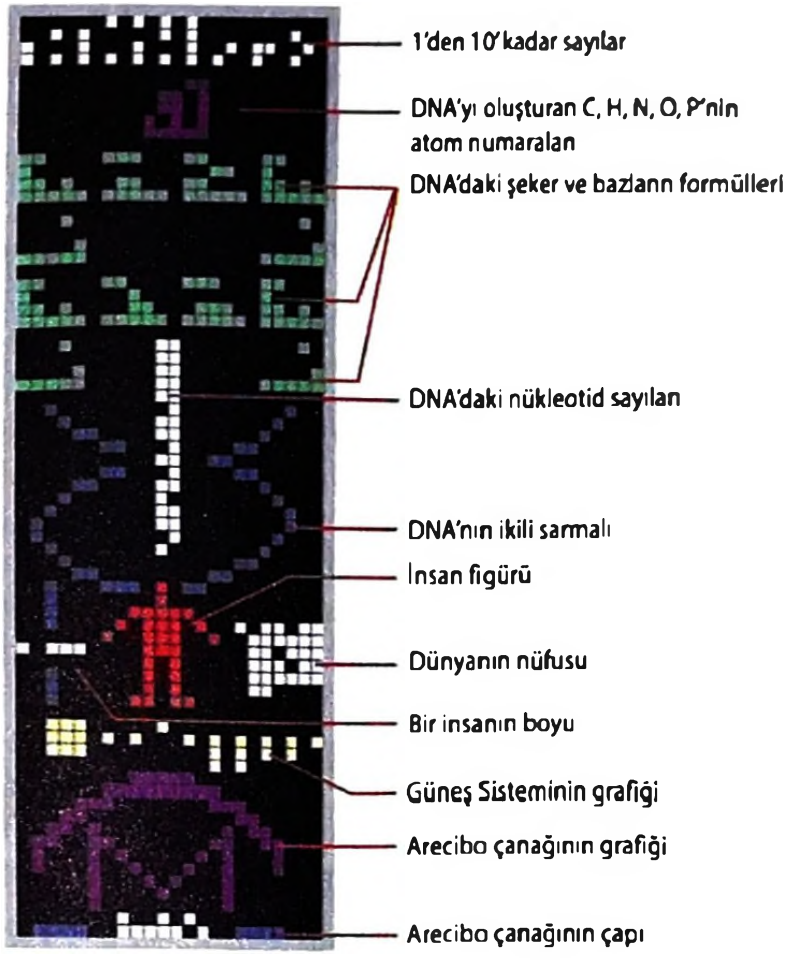
Astrobiyoloji alanında sizi heyecanlandıran nedir? Kayıtlı tarih boyunca evrendeki yerimizi merak ettik. Gerekli araçları geliştiren ve bunları büyük bir keşif başlatmak için kullanan yeni bir bilime şimdi katılmak heyecan verici. Şimdi anladığımız şekliyle kimya ve fizik yasaları aslında Dünyanın ötesinde yaşama mı yol açtı? Bildiğimiz gibi yaşam, galaksimizde benzersiz mi, nadir mi yoksa oldukça yaygın mı? Bilim insanları ve mühendisler artık gerçekte ne olduğunu araştırmak için öncülük edebilirler.

20.5 Fermi Paradoksu

Diğer uygarlıklardan gelecek bir sinyal arayışı henüz olumlu bir yanıt vermedi. Bu durumu basitçe reddetmek kolaydır, ancak bu fizikçi Enrico Fermi (1901–1954) tarafından kabul edilen çok şaşırtıcı bir sorunu ortaya çıkarmaktadır. Belki 100 milyardan fazla gökadadan oluşan bir evrende yaşıyoruz. Kendi gökadamızda 200 milyar yıldız var. Hem kendi gökadamızda hem de başka yerlerde Güneşimizden çok daha yaşlı birçok yıldız var. Dolayısıyla, bu istatistiklerin salt niteliksel bir değerlendirmesinden, yaşamın kökeninin makul bir sıklıkta başka bir yerde meydana geldiğini varsayarsak, yalnızca başka uygarlıkların var olmayacağının, aynı zamanda bazılarının bizimkinden daha yaşlı olma olasılığının yüksek olduğu varsayılabilir. Yarım milyon yıldan daha kısa bir sürede Afrika'daki Büyük Rift Vadisi'nden uzay gemileri inşa etmeye vardık. Bu uygarlıklardan bazıları birkaç milyon yıl daha yaşlı olsaydı, kesinlikle galaksiyi dolaşıyor olacaklardı? O halde neden uzaylılarla temas günlük ve oldukça sıradan bir olay değildir?

Fermi Paradoksuna çok sayıda yanıt verilmiştir. Burada hepsini listelemeye çalışmanın faydası yok. Bu itirazlardan bazıları makul görünürken bazıları

da en hafif tabirle tuhaftır. Bunlardan birkaçına bakalım. Paradoksun çözümünün ne olduğuna karar verebilirsiniz.





Şekil 20.7 Yukarıda: 1974'te gönderilen Arecibo mesajı. Aşağıda: Mesajı gönderen Porto Riko Arecibo çanak gözlemevi (Kaynak: NAIC – Arecibo Gözlemevi, Ulusal Bilim Vakfı, ABD'nin bir tesisi).

20.5.1 Uygarlıklar Uzayda Çok Uzaktalar

Bu yanıtla başlıyorum çünkü bu en makul cevap gibi görünmektedir. En yakın yaşanabilir gezegenlerin on ila binlerce ışık yılı uzaklıkta olduğunu Kepler Uzay Teleskobu verilerinden biliyoruz. Zekâ sahibi uygarlıklara ev sahipliği yaptıkları varsayılacak olsa bile, onları fiziksel olarak ziyaret etmek şöyle dursun, onlarla iletişim kurma çabaları ve onların bizi ziyaret etmesi, yüzyıllardan bin yıllara uzanan süreler alacaktır. Işık hızı seyahat hızımızın sınırıysa (şu anda, solucan delikleri ve diğer varsayımsal araçlar aracılığıyla uzay-zaman arasında makroskobik bir uzay gemisi sıçraması yapabileceğimizi ikna edici bir şekilde gösteren iyi bir fizik yok), hiçbir iyimserlik ve teknoloji bu zaman ölçeklerini daha mantıklı hale getiremez. Işık hızına yaklaştıkça uzay aracındaki bireyler için zaman genişlemesi, onlar için görünen yolculuğun süresini kısaltacaktır, ancak bu etkiyi pratikte kullanışlı hale getirmek için ışık hızına yeterince yaklaşabileceğimiz net değildir. Ayrıca, uygun teknolojiyi geliştirebilsek bile, bu yolculuklara dayanabilecek ve yıldızlararası uzayın engin boşluğunda ve yalnızlığında uzun zaman sürelerinde yaşayabilecek insan veya toplum gruplarını bir araya getirebileceğimiz kesin değildir. Uzaylıları ziyaret etme ve onların bizi ziyaret etme yeteneği, basitçe evrensel olan teknolojik ve psikolojik bir sınırı temsil edebilir.

Sorun, bireylerin ve mesajların bu tür iletimi düşünmek için bile, uygarlıkların, kendisi çok nadir olabilecek, teknolojik gelişmenin karşılaştırılabilir aşamalarında olması gerektiği gerçeğiyle daha da karmaşıklaşıyor. Uzaylılar sadece beş milyon yıl önce gelmiş olsaydı, oldukça iletişimsiz bir grup maymunla karşılaşırlardı (ancak hızlı yıldızlararası uçuş yeteneğiniz varsa, birkaç bin yıl sürse bile tekrar geri dönmeniz yeterince kolay görünür).

Bu görüş içerisinde yıldızlar arasında seyahat etmenin, tıpkı kendi siyasi ve ekonomik gündemimizin üst sıralarında olmaması gibi, yabancı uygarlıklar için de fazla masraflı olması dâhil olmak üzere çeşitlilikler var.

20.5.2 Başka Uygarlıklar Ortaya Çıkmadı ya da Çok Azlar

Eğer yaşamın başlangıcı nadir görülen bir olaysa, o zaman ya başka uygarlıklar yoktur ya da çok ender ve çok geniş aralıklarla yerleşmişlerdir. Çoğu o kadar uzakta ki, pratik anlamda bizi ziyaret edemiyorlar. Alternatif olarak, bu nadirlik, yaşamın başlangıcıyla zekânın ortaya çıkışı arasındaki herhangi bir yerde nadir olaylardan kaynaklanabilir. Belki de oksijenin artışı olağandışıdır, belki de okyanuslardan karaya geçiş kaçınılmaz değildir, belki de çok hücreli yaşamın ortaya çıkması nadirdir. Muhtemelen zekânın ortaya çıkışı çok nadirdir (15. Bölümdeki akıllı dinozorlar hakkındaki düşünce deneyimizi hatırlayın). Zekâ ortaya çıksa bile, her zaman yıldızlararası uzay gemileri inşa etme arzusu mu geliştirir? Bu kitap boyunca tartıştığımız kendi uygarlığımızın ortaya çıkışında birçok evrimsel dallanma noktası olmuştur. Bunlardan hangisinin

kaçınılmaz olduğunu ve varsa hangilerinin nadir biyolojik tesadüflere bağlı olduğunu bilmiyoruz.

Tartışma Noktası: Fermi Paradoksu bilimsel bir hipotez midir?

Bir problemin bizim "iyi bilim" fikrimize uyması için deneysel olarak izlenebilir olması ve test edilebilir, çürütülebilir hipotezler kurarak incelemenin mümkün olması gerekir. Fermi Paradoksunun görünen "çözümlerinden" herhangi biri deneysel olarak izlenebilir mi? Burada sunulanları listelemek, başkalarını düşünmek veya bakmak isteyebilirsiniz. Bu fikirleri test etmek için yapılabilecek kontrollü deney türlerini listeleyerek, test edilebilen ve test edilemeyen çözümlerin bir listesini sistematik olarak tasarlayın. Bu analize dayanarak, bilimsel olarak test edilebilirliklerine göre sıralanmış bir dizi çözüm geliştirin. Şu soruyu düşünün: En test edilebilir fikirler aynı zamanda mevcut bilgimize dayanarak en makul olanlar mıdır?

Webb, S. (2002) *Where is everybody? Fifty Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life*. Copernicus, New York.

20.5.3 Akıllı Yaşam Kendi Kendini Yok Eder

1950'ler ile 1990'ların başları arasındaki Soğuk Savaş döneminde tanık olduğumuz gibi, Dünyadaki her büyük şehri birkaç kez yok etmeye yetecek kadar nükleer silah varken, uygarlıklar kendi kendini yok etme düzeyine ulaşabilir (Şekil 20.8). Belki de medeniyetlerin kendilerini yok etmeleri kaçınılmazdır. İnsanları uzaya götürmek için kullanılan roket teknolojisinin gezegen yüzeyinde bombalar fırlatmanıza olanak vermesi biraz ironik bir durumdur. Uygarlıkların gezegen ölçeğinde kendi kendini yok etme eğilimleri geliştirmeden uzayda yolculuk yapma kapasitesine ulaşamayacak olmaları her zaman mümkündür. Savaş buradaki tek zorluk değildir. Kaynakların tükenmesi, kitlesel yok oluş, aşırı nüfus ve hastalıklar da diğer zorluklar arasında yer alır. Ayrı ayrı veya bir arada, streslerin bir uygarlığı yok etmesinin veya periyodik olarak onu ileri bir uzay yolculuğu yeteneği geliştiremeyecek şekilde geriletmesinin birkaç olası yolu vardır.



Şekil 20.8 Uygarlıkların kaderi kendilerini yok etmek midir? (Kaynak: wikicommons).

Darwinci bir bakış açısından, kendi kendini yok etme, evrimin talihsiz bir sonucu olabilir. İnsan evrimi boyunca kıt kaynaklar için rekabet sırasında gelişen psikoloji, türleri saldırgan, iç-

güdüsel dürtülere maruz bırakmış olabilir. Bunlar, insanlığı kaynakları tüketmeye ve toplumun genişlemesine ve gelişmesine yol açan faktörleri yeniden üretmeye zorlar. Bununla birlikte, bu durumun Fermi'nin paradoksuna yeterli bir yanıt oluşturması için, neredeyse evrensel olarak geçerli olması gerekir.

20.5.4 Yaşam, Doğal Olaylar Tarafından Periyodik Olarak Yok Edilir

Bir önceki cevaba paralel olarak, bir başka olasılık da çoğu uygarlığın göktaşı ve kuyruklu yıldız çarpmaları gibi doğal olaylar tarafından yok edilmiş olmasıdır. 15. Bölüm, bunun makul olduğunu göstermek için bol miktarda kanıt sağlamalıdır. Bir uygarlığın yok olmadan önce yıldızlararası kolonizasyon kapasitesine ulaşması bir şans meselesi olabilir. Bu şans da son derece nadir olabilir.

20.5.5 Diğer Medeniyetleri Yok Etmek Akıllı Yaşamın Doğasında Vardır

Bu, Fermi'nin sorununa verilen en karanlık yanıttır ve kendi saldırgan eğilimleri göz önüne alındığında uygarlıkların, diğer uygarlıkları yok edeceğini varsayar (Şekil 20.9). Alternatif olarak, belki orada öfke duymayla ilgili bir durum söz konusudur. Sonuç olarak, medeniyetler ya yok olur ya da çok sessiz kalırlarsa hayatta kalırlar. Sessizlik için kozmik bir seçilim baskısı vardır. Bir başka ürpertici olasılık da, oldukça zaman alıcı ve sıkıcı bir iş olan bu kötü işi kendileri yapmaktansa, medeniyetlerin diğer medeniyetleri yok etmek için otomatik roketler göndermesidir. Bu roketler, gönderici medeniyet yok olup gittikten çok sonra yok etme işini yapabilir. Henüz bekleme listesinin başına geçmedik. Sorulması gereken ilgili bir soru, bu güdülerin gerçekçi olup olmadığıdır.



Şekil 20.9 Mars'ın yerlileri, H.G. Wells'in Dünyalar Savaşı'nda Dünyaya saldırır. Alvim Correa'nın 1906 Fransız baskısından bir illüstrasyon. Belki de tüm uygarlıklar yıkıcıdır (Kaynak: wikicommons).

Yabancı bir uygarlık, bizim için ya da onlar için, ziyaret etmenin sosyolojik olarak çok tehlikeli olduğunu düşünebilir. Çok farklı ve daha önce izole edilmiş medeniyetler Dünyada bir araya geldiğinde, sonuçlar genellikle şu ya da bu taraf için felaket olmuştur. Aynı şey yıldızlararası temas için de geçerli olabilir.

20.5.6 Varlar, Ama Onlarla İlgili Hiçbir Kanıt Görmüyoruz

Bu, test edilmesi zor bir yanıttır. Uzaylılar orada olabilir, ama biz onlarla iletişim kuramayız ya da karıncaların muhtemelen bizim varlığımızdan pek haberdar olmadığı şekilde onları tanıyamayız.

20.5.7 Yerel Alandalar, Ama Temas Kurmaya Çalışmak Yerine Bizi Gözlemliyorlar

Bazen hayvanat bahçesi hipotezi olarak adlandırılan fikir, onların Güneş Sistemimizde veya yakınlarda oldukları ve bu özel evrimsel deneyden büyülenerek Dünyayı izledikleridir (Şekil 20.10). Bu fikrin varyasyonları arasında, etik sağduyu –müdahale etmeme ilkesi– nedeniyle daha fazla yaklaşmamaları yer alır. Alternatif olarak, belki de onları korkutuyoruzdur. Birbirlerinin şehirlerine bomba atan bir türle tanışsanız, onlarla ikindi çayı içmeye can atar mıydınız? Bu hipotezin bir eleştirisi, hegemonik bir gücün olmadığı bir evrende, bağımsız ilkelere sahip rastgele uygarlıkların, büyük olasılıkla temas kuracak olmalarıdır.

20.5.8 Çok Meşguller

Diğer uygarlıklar sadece keşif yapmaya karşı ilgilerini yitirmiş olabilir. Yorgun, alaycı ve kedilerin veya onların uzaylı eşdeğerlerinin internetteki fotoğraflarına bakmakla meşgul olan eski uygarlıklar keşfetme konusunda pek başarılı olmazlar. Belki de herhangi bir gelişmiş toplum, gelişmiş uzay yolculuğu yapabilme kapasitesinden önce daha çok eğlenme biçimlerini geliştirmiştir. Bu sosyal olanakların çekiciliği, uzay araştırmaları gibi pahalı çabalara yönelik her türlü arzuyu aşabilir. Bu fikir tamamen tuhaf değil. Bizler keşif yapmanın değeri hakkında



Şekil 20.10 Belki tıpkı bizim safari parklarında hayvanları gözlemlediğimiz gibi bizim gezegenimiz de gözlemleniyor ama West Midland Safari Park'taki (Worcestershire, İngiltere) bu zürafaların aksine bizler bizi izleyen meraklı gözlerin farkında değiliz (Kaynak: wikicommons, Robek).

tartışıyoruz ve insanlarla ilgili işlerden önce Mars'a ve diğer gezegenlere robotik elçiler göndermeyi tercih ediyoruz. Yıldızlararası maceralarla ilişkilendirilebilecek tehlike ve can kaybı, diğer uygarlıklar için cezbedici olmayabilir. Bunu kendi başımıza yapacak kadar nedenimiz olup olmadığı pek de açık değildir.

20.5.9 Onlar Burada

Uzaylılar burada veya kendilerini çok iyi saklıyorlar ya da bize benzemeyi başarıyorlar. Bu popüler bir bilimkurgu kinayesidir, ancak tanım gereği uzaylılar kendilerini tespit edilemez kıldığı için test edilebilir bir hipotez formüle etmek çok zordur.

20.5.10 Kanıt Baskılanıyor

Uzaylılar burada, hükümet bunu biliyor ama bize söylemiyorlar. Devlet kurumları harika işler yapabilir ve bazı şaşırtıcı şeyleri saklayabilirler, ancak uzaylıları ve uzay gemilerini hangarlarda bu bilgi sızdırmadan saklamak genellikle onların işi değildir.

Bu fikirlerden birkaçıyla devam edebiliriz, ancak entelektüel getiri giderek daha az olur. Anlaşılması gereken asıl nokta, Fermi Paradoksuna verilen çeşitli yanıtların olduğudur. Bazıları, ne yazık ki, bu ilginç fikirleri ortaya çıkaran deneysel testlere uygun değildir. Bununla birlikte, kapsamlı tartışmalar da boşuna sayılmaz. Uzaylılara ilişkin hiçbir kanıt görmememiz ve bu olgunun kesin nedenini bulmamız gerektiği gerçeği hala karşımızda duruyor.

20.6 Uygarlıkların Sınıflandırılması

Diyelim ki, Fermi Paradoksu ne olursa olsun, uygarlıklar orada. Bizden nasıl farklı olabilirler? Uygarlıkları sınıflandırmak için birçok girişimde bulunulmuştur. Kardashev ölçeği, kullanabileceği enerji miktarına dayalı olarak bir uygarlığın teknolojik ilerleme seviyesini ölçme yöntemidir. Ölçekte Tip I, II ve III uygarlıklar olmak üzere üç kategori bulunmaktadır. Ölçek ilk olarak 1964 yılında Rus astronom Nikolai Kardashev tarafından önerilmiştir.

Bir Tip I uygarlığı, kendi gezegenindeki mevcut tüm kaynakları, erişebildiği yaklaşık 10^{12} W'lık bir enerjiyle kullanır. İnsan toplumu, hala gelişmekte olan bir Tip I uygarlığıdır.

Tip II uygarlık, yıldızının tüm enerjisini kullanır ve ona Güneşimizin parlaklığına eşdeğer, yaklaşık 10^{26} W, enerjileri kullanma kapasitesi verir. Bir uygarlığın Tip II statüsüne ulaşmasının bir yöntemi, bir **Dyson küresi** inşa etmektir. Dyson küresi, başlangıçta fizikçi Freeman Dyson tarafından tanımlanan, bir yıldızı tamamen çevreleyen ve enerji çıktısının çoğunu veya tamamını yakalayan dev bir varsayımsal yapıdır. Daha egzotik diğer fikirler arasında, gelişmiş bir uygarlığın bir yıldızın maddesinin önemli bir bölümünü kontrollü bir şekilde çıkaracağı bir süreç olan "yıldız kazma" yer alır.

Tip III bir uygarlık, gökadasında mevcut tüm enerjiyle, yaklaşık 10^{37} W, başa çıkmayı başarmıştır. Bu kapasiteyi, bir gökadadaki birçok yıldızın etrafına Dyson küreleri inşa ederek elde edecek veya daha çarpıcı bir şekilde, çoğu galaksinin merkezindeki süper kütleli kara deliklerden salınan enerjiden faydalanabilecekti.

Kardashev ölçeğinde birçok değişiklik yapıldı. Bunlardan biri, ölçeğin tüm evreni kontrol eden veya kullanan IV. Tip uygarlıkları ve hatta evren koleksiyonlarını kontrol eden Tip V uygarlıkları (başka evrenler olduğu varsayılarak) daha da genişletmeyi önerdi.

Kardashev ölçeği yalnızca enerji kullanımına odaklanmıştı. Bununla birlikte, diğer insanlar bunun makul bir ölçü olmasına rağmen, bir uygarlıkları değerlendirmenin tek yolunun bu olmadığını öne sürdüler. Carl Sagan, ilerleme düzeyini ölçmenin bir yolu olarak bir uygarlığa sunulan bilgileri eklemeyi önerdi. A harfini 10^6 benzersiz bilgi bitini temsil etmesi için atadı (bu, herhangi bir kayıtlı insan kültüründen daha azdır). Her ardışık harf, bilgideki bir büyüklük sırasını temsil edecek şekilde uygulandı, böylece Z seviyesi bir uygarlığın 10^{31} biti olacaktı. 1973'te Sagan ölçeği formüle ettiğinde Dünya, 10^{13} bit bilgiye erişimi olan bir H uygarlığıydı.

Robert Zubrin, bir uygarlığın ne kadar yaygın olduğunu belirtmek için Kardashev ölçeğini uyarladı. Bir Tip I uygarlığı gezegenine yayılmışken, Tip II uygarlık yıldız sisteminde geniş ölçekte yayılmıştır. Tip III ise tüm gökadasına dağılarak yerleşim gösterir.

20.7 Politik Etkiler

Bir uzaylı zekâsıyla uzaktan bağlantı kurma olasılığı bile çok çeşitli soruları gündeme getiriyor. Bu sorulardan bir tanesi şudur: İletişim durumunda Dünyayı kim temsil etmelidir?



Şekil 20.11 Uzaylı temasına yanıtı kim koordine etmelidir? Birleşmiş Milletler mi yoksa diğer insan temsilcileri mi? (Kaynak: wikicommons, Yann Forget).

Bu soruyu düşünmek ve tartışmak isteyebilirsiniz. Güçlü bir ulus mu olmalı? Bir milletler bloğu mu olmalı (AB gibi)? Bir grup bilim insanı mı olmalı ve eğer öyleyse, kim? Sivil toplum kuruluşu olmalı mı? Yoksa halkın rastgele seçilmiş üyeleri mi olmalı? Bu önerilerin hepsinin kendi avantajları ve dezavantajları vardır (Şekil 20.11). Ancak temas olursa, bunlardan birinin seçilmesi gerekecektir.

İlk mesajlarımızın veya sinyallerimizin ne olması gerektiği de belirsizdir. Onlara iyi niyetli bir selam göndermek talihsizlik olabilir zira belki de onlara sadece hepsini yemeyi planladığımızı söylemiş oluruz. Kültürel yanlış anlamalar Dünyada çok yaygın olarak görülmektedir. Evrensel mesajlar nelerdir? Pioneer levhaları ve Voyager kayıtları için mesajlar icat etme konusunda biraz deneyime sahip olduğumuzu zaten gördük, peki ya doğrudan temas?

Bir organizasyonun "serseri mayın" gibi hepimiz için üzücü olabilecek bir mesaj iletmesini önlemek amacıyla herkes tarafından kabul edilen bir protokol yapmak iyi bir fikir olabilir. Şimdiye kadar, iletilen mesajlar daha geniş bir istişare olmaksızın salt belirli bir amaç için yapılmıştı. Şimdiye kadar hiçbir kötü sonuç olmadı, ancak bu yine de, yabancı uygarlıklara mesaj iletme konusunda uluslararası anlaşmaların olması gerekip gerekmediği sorusunu gündeme getiriyor.

Dünya dışı zekâlara dair kanıtlar henüz bulunmadığı için, bu tartışmaları abartılı ve çocukça bularak reddetmek kolay olabilir, ancak birkaç günlük tartışma, her ihtimale karşı en azından bir protokole sahip olmaya değer.

Uluslararası Uzay Bilimleri Akademisi, Dünya dışı uygarlık tespiti sonrasında ne olması gerektiğine dair önerilen bir protokol taslağı hazırladı. İlk adımın, şaşırtıcı olmayan bir şekilde, sinyalin gerçek olduğundan emin olmak için titiz bir şekilde test etmek ve ardından, onu doğrulamak ve incelemek için sinyali takip edebilen mümkün olduğunca çok sayıda bilimsel grubu bilgilendirmek olduğunu şart koşuyor. Bu durumda tüm ulusal makamlar (esas olarak hükümetler) Birleşmiş Milletler Genel Sekreter aracılığıyla bilgilendirilecek ve ardından da kamuoyu bilgilendirilecektir.

20.8 Sonuç

Dünya Dışı Zekâ Arayışı artık eski bir çabadır. Şimdiye kadar, yabancı uygarlıklara dair hiçbir işaret veya kanıt bulunamamıştır. Yine de, Dünya dışı uygarlıkların olasılığı, merak eden her insanın zihnini kurcalamalıdır. Diğer tüm bilimler gibi DDZA de eleştirel analize tabi tutulmalı ve deneysel olarak test edilebilir kısımları öncelikli olmalıdır. Fermi Paradoksu ve onun çeşitli çözümleri, test edilebilir olan ve olmayan hipotezlerin çözülmesindeki karmaşıklıkları iyi bir şekilde ortaya koymaktadır. İzlenebilir bir bilimsel çaba olmanın yanı sıra, insan türünün meraklı doğasının bir ifadesi ve evrendeki yerini tam olarak kavrama arzusunun bir ifadesi olarak başka zekâ arayışlarının peşine düşmekten ve açıkça desteklemekten kimse çekinmemelidir.

İleri Okumalar

Kitaplar

Davies, P. (2011) *The Eerie Silence: Renewing Our Search for Alien Intelligence.* Mariner Books, Chicago.

Shklovskii, I.S., Sagan, C. (1966) *Intelligent Life in the Universe.* Holden Day, San Francisco.

Yayınlar

Almár, I., Race, M.S. (2011) Discovery of extra-terrestrial life: assessment by scales of its importance and associated risks. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 369, 679–692.

Baum, S.D., Haqq-Misra, J.D., Domagal-Goldman, S.D. (2011) Would contact with extraterrestrials benefit or harm humanity? A scenario analysis. *Acta Astronautica* 68, 2114–2129.

Brin, G.D. (1983) The great silence – the controversy concerning extraterrestrial intelligent life. Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society 24, 283–309. Cocconi, G., Morrison, P. (1959) Searching for interstellar communications. *Nature* 184, 844–846.

Drake, F.D. (1961) Project Ozma. *Physics Today* 14, 140–143.

Drake, F.D., Sagan, C. (1973) Interstellar radio communication and the frequency selection problem. *Nature* 245, 257–258.

Dyson, F.J. (1960) Search for artificial stellar sources of infra-red radiation. *Science* 131, 1667–1668.

Freitas, R.A., Valdes, F. (1980) A search for natural or artificial objects located at the Earth–Moon libration points. *Icarus* 42, 442–447.

Galloway, J.F. (1996) An international relations perspective on the consequences of SETI. *Space Policy* 12, 135–137.

Harrison, A.A. (2011) Fear, pandemonium, equanimity and delight: human responses to extraterrestrial life. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 369, 656–668.

Othman, M. (2011) Supra-Earth affairs. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 369, 693–699.

Race, M.S., Randolph, R. (2002) The need for operating guidelines and a decision-making framework applicable to the discovery of non-intelligent extraterrestrial life. *Advances in Space Research* 30, 1583–1591.

Tartar, J.C. (2001) The search for extraterrestrial intelligence (SETI). *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 39, 511–548.

Tartar, J.C., Agrawal, A., Ackermans, R., Backus, P., Blair, S.K., Bradford, M.T., Harp, G.R., Jordan, J., Kilsdonk, T., Smolek, K.E., Richards, J., Ross, J., Shostak, G.S., Vakoch, D. (2010) DDZA turns 50: five decades of progress in the search for extraterrestrial intelligence. *Proceedings of SPIE* 7819, 781902.

Turbull, M.C., Tartar, J.C. (2003) Target selection for SETI. I. A catalog of nearby habitable stellar systems. *Astrophysical Journal Supplement Series* 145, 181–198.

Vakoch, D.A. (2011) The art and science of interstellar message composition: A report on international workshops to encourage multidisciplinary discussion. *Acta Astronautica* 68, 451–458.

21

UYGARLIĞIMIZ

Öğrenme Çıktıları

- İnsan evriminin tarihini anlamak.
- Zekâ sahibi bir uygarlığa yönelik bazı tehditleri anlamak
- İdeal roket denklemini, yörünge dinamiklerini hesaplamada nasıl kullanılabileceğini ve uzay araştırmaları ve yerleşimi için önemini anlamak.
- Diğer gezegenimsilerde kalıcı bir insan varlığı kurmanın bazı zorluklarını detaylandırabilmek.
- Yaşam destek sistemleri için bazı gereksinimleri tanımlayabilmek.
- Çoklu gezegen türü olmanın, bir türün evrimsel biyolojisinde neden önemli bir adım olduğunu anlamak.

21.1 Astrobiyoloji ve İnsan Uygarlığı

Astrobiyoloji, yaşamın kökeni, evrimi ve geleceğiyle ilgilenir. Kitlesel yok oluşların meydana geldiği süre boyunca biyosferi nasıl etkilediğini bu kitapta zaten gördük. Sera etkisinin bir milyar yıldan fazla bir süre içinde Dünyadaki tüm yaşamı yok edeceği çok uzak bir geleceği de tartıştık.

Dolayısıyla, yanıtlayamadığımız tek bir soru kaldı: İnsan uygarlığının geleceği nedir? Astrobiyoloji araştırmamızı, bilimsel açıdan daha belirsiz olan bu soruya bir giriş yaparak sonlandırıyoruz.

Bu araştırma alanı son derece dar görüşlü, insan merkezli (**antroposentrik**) ve hatta benmerkezci görünebilir. Ne de olsa insanlar, tarihi boyunca yeryüzünde var olan milyonlarca türden sadece bir tanesidir. Ancak geleceğimizle ilgili bu sorunun astrobiyoloji açısından bizi ilgilendirmesinin üç nedeni var:

1. Yeryüzünde ortaya çıkmış ve kendi gezegenini terk etme yeteneğine sahip tek zekâ sahibi canlılar biziz (en azından bilinçli biçimde terk edebilecek; zira Bölüm 17'de gördüğümüz gibi, mikroplar çarpmaların etkisiyle yeryüzünden fırlatılan kayalarla burayı çoktan terk etmiş olabilir). Bu, kozmosta yaşamın potansiyel yayılımı açısından önemli bir gelişmedir.

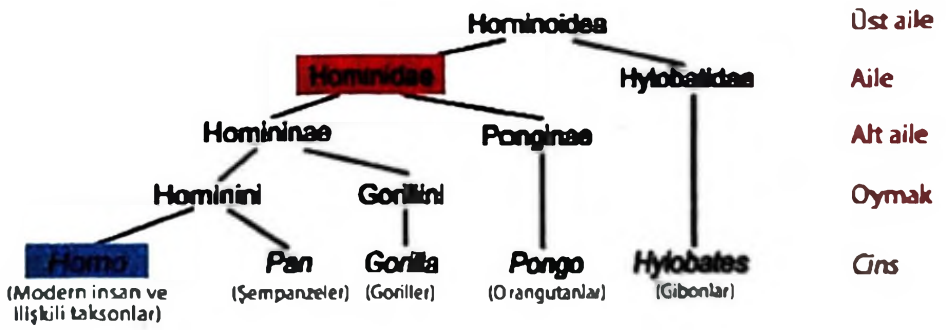
2. İnsan uygarlığı, bir gezegende zekânın nasıl ortaya çıktığını, onun jeolojisini ve biyolojisini nasıl etkilediğini düşünmemiz için bize bir veri noktası sağlar. Evrendeki zekâ hakkında, eğer başka bir yerde varsa, kendimizi inceleyerek genel çıkarımlar yapabiliriz.
3. Hayatta kalmak ve genel yok olma eğilimine karşı koymak istiyorsak, geleceğimizi neyin tehdit edebileceğini düşünmek için zekâmızı kullanmalıyız.

21.2 İnsan Toplumunun Ortaya Çıkışı

Bölüm 13'te, ilk karasal hayvanların ortaya çıkışını ve memelilerin atasının kökenini araştırdık. Araştırmamıza, tüm ara aşamaları da işin içine katarak, kendi türümüzün kökenine doğru daha ayrıntılı bir yolculukla devam edebiliriz. Bunun yerine, buradaki amaçlarımız doğrultusunda, primat Hominidae ailesinin gibonlardan ayrıldığı yaklaşık 15–20 milyon yıl önceki hikâyeden başlayabiliriz (Şekil 21.1). Hominidae veya büyük maymunlar, kuyruksuz büyük bir primat grubudur. Yaklaşık 14 milyon yıl önce, bu aileden orangutanlar (Ponginae) adı verilen yeni bir grup ortaya çıktı. Yaklaşık 2–3 milyon yıl önce, aynı zamanda Hominidae'nin de üyeleri olan goril ve şempanzeler (*Pan*) onları takip etti.

Modern soyumuzun başlangıcı tartışmalıdır. Australopitesinler yaklaşık 4 milyon yıl önce ortaya çıkmış gibi görünüyor ve *Homo* cinsinin ataları olabilirler. Fosil kayıtlarında en iyi temsil edilen australopitesin, *Australopithecus afarensis*'tir. Ünlü 'Lucy' ile Güney Afrika ve Kenya'daki fosiller de dâhil olmak üzere Kuzey Etiyopya'da bulunan 100'den fazla fosil mevcuttur. Bu fosiller, gelişmiş iki ayaklılık için kanıt sunuyorlar, ancak bu atalar hala maymunların beyin boyutuna (yaklaşık 410 santimetre küp) sahiplerdi.

Cinsimizin ilk üyesinin yaklaşık 2,3 milyon yıl önce ortaya çıktığı düşünülüyor –*Homo habilis*. Yaklaşık olarak bir şempanzeyle (yaklaşık 630–700 santimetre küp) aynı büyüklükte bir beyne sahipti, ancak sonraki bir milyon yıl boyunca bu iki katına çıktı ve o sıralarda ortaya çıkan iki tür olan *Homo erectus* (yaklaşık 820–1100 santimetre küp beyin büyüklüğüne sahip) ve *Homo*

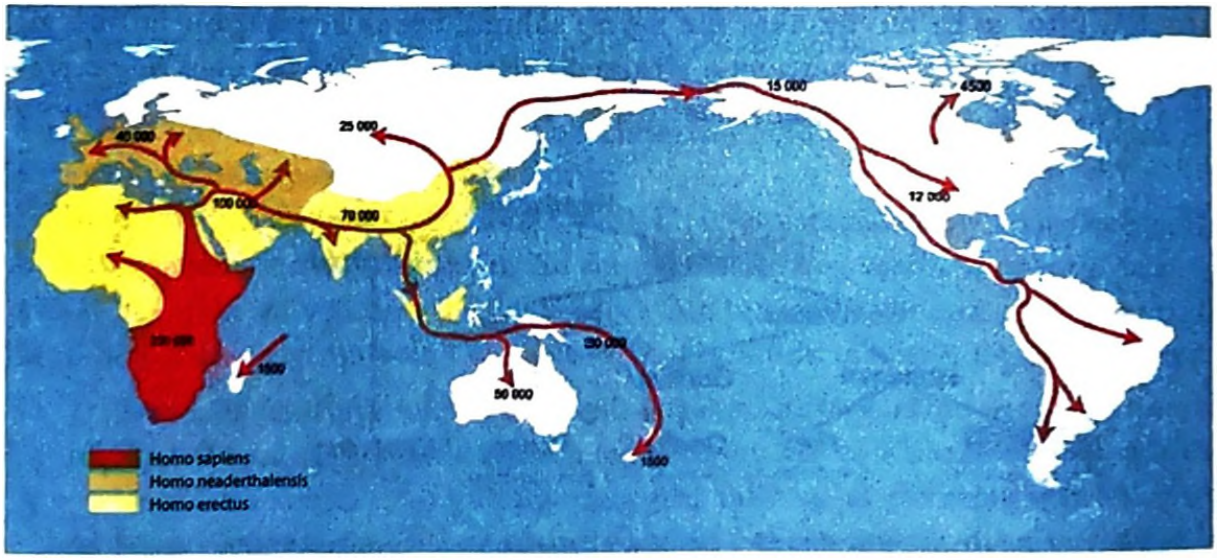


Şekil 21.1 Basit bir filogenetik aile ağacı –Hominidae (kırmızı) ve Homo *(mavi) cinsinin ortaya çıkışı.* Homo *olmayan en yakın akrabalarımız şempanzelerdir* (Kaynak: wikicommons).

ergaster'in yaklaşık 1,8 milyon yıl önce Afrika'nın Rift Ovalarından Asya ve Avrupa'ya olan yolculuğuna başladığı düşünülüyor.

Bu göçlerin kesin doğası tam olarak anlaşılamamıştır. Bazı araştırmacılar, *Homo sapiens*'in modern insan popülasyonlarının Afrika'yı daha yakın zamanda, 100.000–50.000 yıl önce (Şekil 21.2) terk ettiğini ve *Homo heidelbergensis* gibi türlerden geldiğini öne sürüyorlar. *Homo sapiens*, beyin boyutu bakımından ortalama 1360 santimetre kübe ulaşan bir başka sıçramayı temsil ediyordu. Bu modern popülasyonlar daha sonra mevcut *Homo erectus* popülasyonlarının ve *Homo neanderthalensis* dâhil türlerin yerini aldı (Şekil 21.3). Dikkat çekici bir şekilde, günümüz Afrikalı olmayan insan DNA'sı, bu türün kemiklerinden elde edilen Neandertal DNA kalıntılarının dizilenmesiyle belirlenen, %6'ya kadar Neandertal DNA'sı içerir. Bu, erken atalarımızın sadece öncü türlerini değiştirmekten daha fazlasını yapmış olabileceğini göstermektedir. Arkeolojik kanıtların, atalarımızın yaklaşık 5000 yıl boyunca Neandertallerle birlikte yaşamış olabileceğini gösterdiği düşünülmektedir.

Beyin büyüklüğündeki, bilişsel kapasitedeki ve alet yapma yeteneğindeki hızlı artışın evrimsel nedenleri tam olarak anlaşılamamıştır. Ormanların azalması, türün ilk üyelerini ovalarda yaşamaya zorlayarak, bu yeni çevrede hayatta kalmak için zihinsel olarak daha gelişmiş olmak için bir seçilim baskısı yaratmış olabilir. Herhangi bir evrimsel yeniliğin, bir kez "keşfedildiğinde" ve bir seçilim yararı sağlaması koşuluyla, yayılma eğiliminde olması muhtemeldir. Gelişmiş bilişsel kapasitelerin birçok olası hayatta kalma yeteneğine sahip olduğu görülmektedir. Bunlar arasında yırtıcılardan kaçmak, avlanmak ve çevresel zorluklar kaçmak için alet yapımını kullanma ve ayrıca iyi düzenlenmiş bir grubun bireyine hayatta kalma şansı veren gelişmiş iletişim yeteneklerinden ve dilden kaynaklanabilecek daha karmaşık sosyal düzenlemelerden bazılarını



Şekil 21.2 Büyük göçlerin bazı tahmini tarihlerini gösteren modern insanların başlıca göç yolları.

listeleyebiliriz. Bununla birlikte, eğer zekâ bu kadar açık bir şekilde fayda sağlıyorsa, o zaman başka bir soru ortaya çıkıyor: Neden zekâ diğer hayvanlarda bu kadar gelişmedi ve neden bizim türümüzden çok daha uzun bir süre, yüz milyon yıldan fazla, boyunca Dünyayı yöneten dinozorlarda ortaya çıkmadı?



Şekil 21.3 Bir Neandertal çevresini araştırıyor (Kaynak: wikicommons).

Modern insanın bilişsel kapasitesi, alet yapımının etkileyici gösterimlerine yol açmıştır (Şekil 21.4). İnsan primat soyunun ilk kez aletleri ne zaman kullandığı bilinmemektedir. Kanıtlar, *Homo habilis*'in yaklaşık 2,3 milyon yıl önce çakıl taşlarını alet olarak kullandığını ve bunun, 10.000 yıl önce son buzul çağının başlangıcına kadar uzanan Paleolitik'in ("Taş Devri") başlangıcını işaret ediyor.

Modern insanın atası olan 'Arkaik' *Homo sapiens*'in 400.000 ila 250.000 yıl önce evrimleştiği ve taş aletler kullandığı düşünülmektedir.

Yaklaşık 50.000 yıl önce (bazıları daha erken bir tarih vermiş olsa da), *Homo sapiens* mağara boyama, ölüleri gömme, özel aletler ve mücevherler yapma gibi belirgin şekilde daha karmaşık ve modern davranışlarda bulunmaya başlamıştır. Bu davranış değişikliğinin bilişsel kapasitelerde bir devrimle mi yoksa kademeli bir değişimle mi olduğu bilinmiyor. İnsanların alet yapma yetenekleri daha karmaşık bir noktaya ulaştıkça, sahne bu yeni primat türünün coğrafi olarak ve sayıca çarpıcı bir şekilde genişlemesi için hazırlandı.



Şekil 21.4 Alet yapma yeteneği: İnsan toplumunun ayırt edici özelliklerinden biri, büyük eserler inşa etme yeteneğidir.

Uygarlık olarak düşünebileceğimiz şeyin doğuşu, uygarlık olarak tanımladığımız şeye bağlıdır. Tarımın ortaya çıkışını (topluluklar tarafından bitkiler hasat edilip, hayvanlar ehlileştirildiğinde) sabit yerleşimlerin ilk örnekleri olarak kabul edersek, o zaman bu, ilk insanların avcı-toplayıcı gruplardan düzenli bir 'uygarlık' olarak nitelendirdiğimiz bir organizasyon olan sosyal hayata geçişini belirlemek için makul bir nokta gibi görünüyor.

Zaman zaman Tarım Devrimi olarak da adlandırılan Neolitik Devrim, tarım alanında gerçekleşen Dünyanın ilk devrimiydi ve giderek daha büyük bir nüfusun ortaya çıkmasına olanak verdi. Arkeolojik veriler, çeşitli bitki ve hayvan türlerinin evcilleştirilmesinin Dünya çapında ayrı yerlerde başladığını göstermektedir. Erken tarımın Güneybatı Asya'da, günümüzden yaklaşık 10.000–9000 yıl önce ortaya çıktığına ve yaygınlaştığına inanılmaktadır, ancak daha erken örnekler de tespit edilmiştir. Güneybatı Asya'nın Bereketli Hilal bölgesi, üç tahıl (siyez buğdayı, emmer buğdayı ve arpa) ve dört baklagil (mercimek, bezelye, acı fiğ ve nohut) için evcilleştirme merkezidir ve bu erken tarımsal geçiş gerçekleştiği en önemli bölgelerden biri olduğu düşünülmektedir. En erken evcilleştirilen hayvanlardan bazıları köpekler (yaklaşık 15.000 yıl önce), koyunlar, keçiler, inekler ve domuzları içermektedir.

Neolitik Devrim, insanları yeni gıda üretim tekniklerinin kullanılmasından çok daha fazlasına teşvik etti. İnsanlık tarihine egemen olan küçük ve temelde göçebe olan avcı-toplayıcı grupları, köylerde ve daha sonra kasabalarda yaşayan yerleşik toplumlara dönüştürdü. Bu toplumlar, sulama ve ormansızlaşma gibi zirai yöntemler yoluyla doğal çevrelerini kökten değiştirdiler ve gıda depolama da dâhil olmak üzere bir dizi ilgili teknolojiyi başlattılar. Bu teknoloji, toplumların hayatta kalmasını kolaylaştırarak ve nihayetinde kuzey enlemlerinde soğuk kış aylarında yaşamalarına izin vererek, kapsamlı gıda üretimindeki artışa olanak sağladı. Bu gelişmeler, fazla nüfus yoğunluğu, uzmanlaşma ve işbölümü, sabit mimari eserler gibi daha ayrıntılı sanat biçimlerinin geliştirilmesi, ilk ekonomiler, merkezi yönetim ve siyasi yapılar, yazı gibi bilgi sistemleri ve nihayetinde mülk sahipliği için bir temel oluşturdu.

Türümüzün Dünya çapında, en azından jeolojik zaman dilimleri açısından, çevresini boyunduruk altına alma konusundaki artan teknolojik becerisinin yardımıyla hızla genişlemesine rağmen, alet yapma kapasitesi, uygarlığımızı yok olma veya yıkıcı bir çöküş olasılığından korumaz. Peki, nedir bu tehditler?

21.3 Bir Uygarlığa Yönelik Tehditler

Bir uygarlığın, bir gezegende var olma süresi önceden belirlenmiş değildir. Tüm türlerde olduğu gibi, bir takım tehditlerle karşı karşıyadırlar. Bunlardan bazıları doğal tehditlerdir. Bölüm 15'te bunlardan sadece birkaçını ve Fanerozoik'te meydana gelen kitlesel yok oluş dönemlerinde tür çeşitliliğinin nasıl azaldığını inceledik. Bizim uygarlığımız da çeşitli olası tehditlerle karşı karşıyadır;

bunlardan sadece birkaçı bir bütün olarak uygarlıkları yok edebilir, ancak pek çoğu da toplumu güçsüz ya da ciddi ölçüde geri bırakabilir.

Süpervolkanlar potansiyel bir tehdittir. Yellowstone Ulusal Parkı, bir süpervolkanın volkanik olarak aktif bir kalıntısıdır (Şekil 21.5). Yaklaşık 2 milyon, 1,2 milyon ve 640.000 yıl önce, muhtemelen bu yanardağ uzun yıllar boyunca patladı. İki milyon yıl önceki patlaması, 80 km çapında bir krater oluşturmak için yeterliydi. Bugün böyle bir olay Dünya ekonomisini felce uğratabilir ve Dünyayı, tıpkı bir çarpma kışına benzer etkilere sahip olan kısa süreli bir volkanik kışa sürükleyebilir. Yellowstone püskürmelerinden daha küçük olsa da, daha yakın zamanda büyük volkanik püskürmeler kaydedilmiştir. 1815'te Endonezya'daki Tambora yanardağının patlaması, atmosfere yaklaşık 200 milyon ton kükürt bakımından zengin kül püskürttü. Ortalama 0,7 °C'lik bir küresel sıcaklık düşüşü meydana geldi. Bunan dolayı 1816, yaygın olarak "yazsız yıl" olarak bilinmektedir.

Bilim insanları patlamanın büyüklüğünü (püsküren materyalin kütlesi) ve patlama yoğunluğunu Volkanik Patlama İndeksi (VEI*) kullanılarak ölçülen püskürme hızı) karşılaştırır. Bu logaritmik ölçek Hawaii adalarındaki küçük patlamalara denk gelen 0'dan başlar, evleri yok eden ve yerel yıkıma neden olan büyük patlamalara karşılık gelen 3 veya 4 VEI'den küresel etkilere neden olabilen Tambora püskürmesine karşılık gelen 7 VEI'ye kadar çıkar.

Daha da yıkıcısı, 15. Bölümde olası yok oluş nedenlerinden biri olarak karşımıza çıkan sel bazaltlarıdır. Binlerce yıl boyunca küresel sistemi alt üst edebilen bu tür olayların kitlesel yok oluşa neden olabileceği düşünülmektedir. Bir uygarlığın gelişiminin ilk döneminde böyle bir olayın başlaması, kesinlikle onun ilerlemesi açısından bir felaket olacaktır. VEI ölçeği kullanılarak kolayca



Şekil 21.5 Porselen Havzası, Yellowstone Milli Parkı. Park, uyuyan bir süpervolkana ev sahipliği yapar (Kaynak: wikicommons).

* [İng.] Volcanic Explosivity Index –çn.

ölçülemezler, çünkü bunlar tek bir patlamadan oluşmaz, daha ziyade patlama olaylarını içerebilecek uzun zaman dilimlerinde gerçekleşen püskürmelerdir.

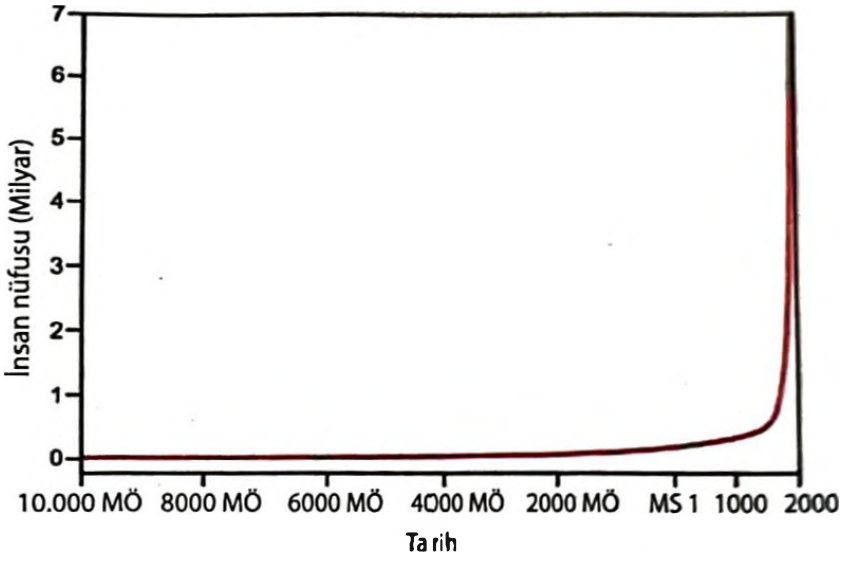
Göktaşı ve kuyruklu yıldız çarpmaları gerçekçi bir tehdit oluşturuyor ve 65,5 milyon yıl önce bu cisimlerin neden olduğu bir yok oluş olayına ilişkin iyi kanıtlar var. Bölüm 15'te, büyük göktaşı çarpmalarının zararlı çevresel etkileri ele alındı. Bunların insan uygarlığı üzerindeki etkileri açıktır. Göktaşları potansiyel olarak yeterli uyarıyla yönlendirilebilir. Daha hızlı hareket eden ve daha değişik, öngörülemeyen yörüngelere sahip olan kuyruklu yıldızlar daha tanımsız bir tehdit oluşturuyorlar.

Hastalık: insanlığın feci bir hastalığa yenik düşmesi imkânsız değildir. 2009 yılında Şiddetli Akut Solunum Sendromu (SARS) virüsü gibi yeni viral suşların ortaya çıkması, 1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Batı Nil Virüsünün ortaya çıkması ve 2014 yılında Ebola'nın yayılması gibi eski viral suşların yeniden ortaya çıkması bize şunu hatırlatıyor: hala mikroorganizmaların insafına kalmış durumdayız. Genetik dizileme çabaları, en kötü mikrobiyal düşmanlarımızın genetiğini ve biyokimyasını çözme yeteneğimizi büyük ölçüde artırmış olsa da, bu bilgi bize otomatik olarak onu kontrol etmek için araçlar sağlamaz. Pandemiler hala çok gerçek birer tehdittir. Hastalığın medeniyeti tamamen yok etmesi olası değildir, ancak ciddi bir aksama ve küresel kargaşaya neden olabilir.

Başka bir yerde uygarlıklar varsa, gezegenlerinin içinden ve astronomik çevreden ve hatta belki de kendi biyolojik düşmanlarından benzer rahatsızlıklarla karşılaşabilirler. Diğer uygarlıklar, kendi uygarlığımız için bir öncelik olarak görülmeyen tehditlerle bile karşı karşıya kalabilirler. Süpernova patlamaları, ana yıldızı yaşamlarının sonuna yaklaşan diğer eski yıldızlara yakın olan (yoğun bir yıldız kümesinde olduğu gibi) uygarlıklar için tehlike oluşturabilirler. Kendi özel durumumuzda, önümüzdeki birkaç milyon yıl içinde patlaması muhtemel yakın, yüksek kütleli bir yıldız bilmiyoruz ve dolayısıyla bu, yakın vadeli bir tehdit olarak görülmüyor.

Bir gezegendeki bu doğal tehditler bizi karşı konulamaz bir şekilde, bir uygarlığın uzun süre hayatta kalmasını sağlamanın en iyi yolunun yalnızca bu tehditlerle mücadele etmenin ve etkilerini en aza indirmenin yollarını bulmak değil, aynı zamanda kendisini yalnızca bir gezegenin yüzeyiyle sınırlı kalmayacak şekilde tüm evrene yaymak olduğuna inandırır. Bu olasılığa daha sonra döneceğiz.

Bir uygarlık, doğal tehditlerin yanı sıra kendi ürettiği tehditlerle de karşı karşıya kalabilir. Bizim durumumuzda, büyük bir nüfus artışının neden olduğu zorluk var (Şekil 21.6). Bu sorunla başa çıkmak için tasarlanan politikaların ayrıntıları bizi ilgilendirmiyor, ancak astrobiyolojik bir bakış açısından, bu nüfus artışının gelecekteki eğilimiyle ilgili bariz bir soru var. Mikrobiyal durağan faza benzer bir şekilde sabitlenebilir. Hastalık, çevresel bozulma ve diğer stresleri içerebilecek bir olayda çökebilir. Çok daha uzun süre artmaya devam



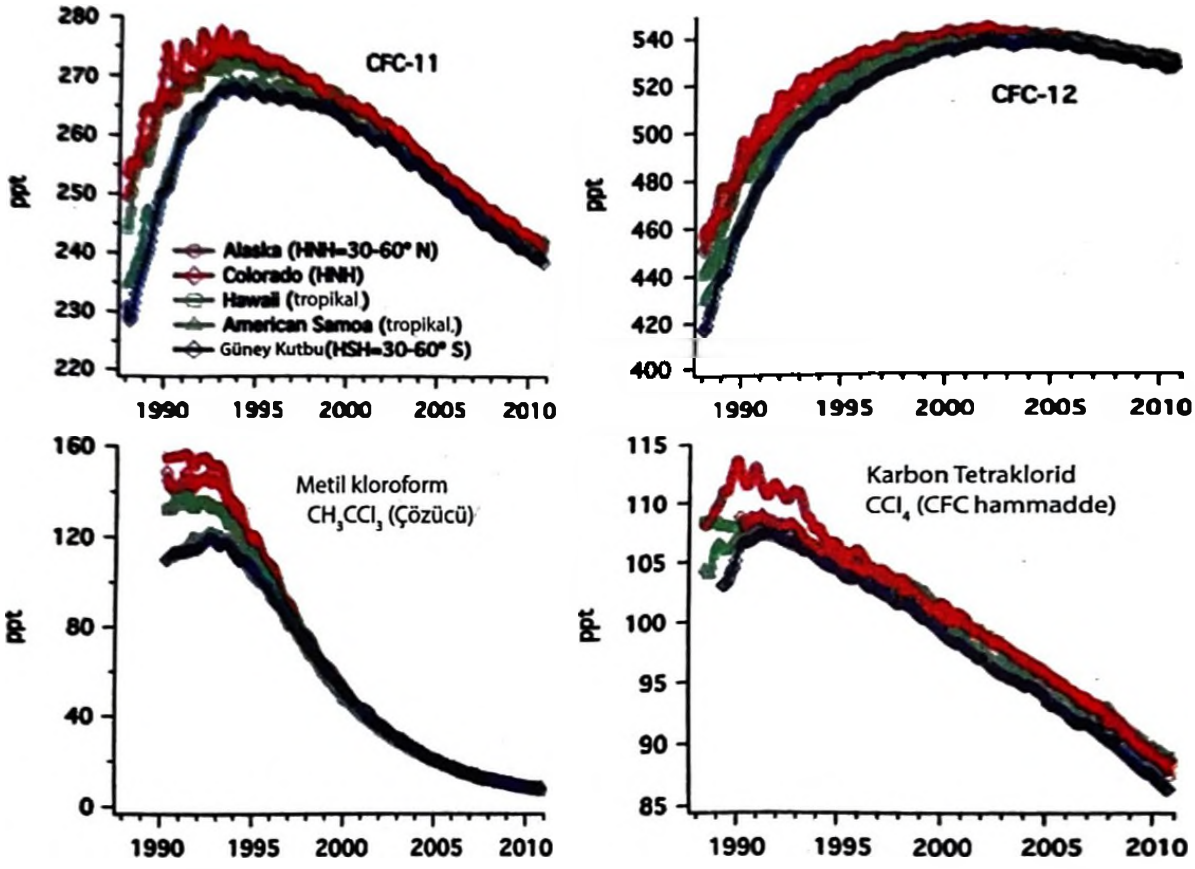
Şekil 21.6 İnsan popülasyonundaki büyük artış, türlerin sürdürülebilirliği için ciddi bir tehdit oluşturuyor.

edebilir, ancak daha az aşırı bir oranda, dengelenmeden önce bir tür taşıma kapasitesine ulaşabilir. Bununla birlikte, bir türün süresiz olarak neredeyse üstel bir şekilde çoğalamayacağı açıktır. Şunu da belirtmek gerekir ki, büyük bir çevre felaketi dışında, popülasyondaki bir çöküşün türlerin neslinin tükenmesine yol açması pek olası değildir. Aşırı nüfus ve kaynakların tükenmesi gibi insan kaynaklı birçok sorun, bir uygarlığın büyüklüğünü ve ölçeğini tehdit eder, ancak muhtemelen onun tüm varlığını tehdit etmez.

21.4 İklim Değişikliği ve Yedi Milyar Maymuna Meydan Okuma

İnsanlığın ortaya çıkışına eşlik eden ve muhtemelen herhangi bir zekâ için geçerli olan önemli bir olgu, atmosferik bileşimi değiştirme kapasitesidir. Atmosfer $5{,}15 \times 10^{18}$ kg kütleye sahiptir ve bunun yaklaşık dörtte üçü yüzeye 11 km uzaklıktadır. Atmosferin büyük kısmı bu nedenle Dünya üzerinde son derece ince bir kaplamadır. Bir uygarlık ortaya çıktıkça, kaynakları kullandıkça ve çeşitli süreçler sonucu atık gazlar ürettikçe, bu faaliyetin atmosferi değiştirecek kadar kapsamlı hale gelmesi muhtemeldir. Önemli bir soru, uygarlığın, aşırı derecede zararlı olabilecek şekillerde uzun vadeli çevresel değişikliğe neden olmadan önce bu sorunun farkına varıp varmadığıdır.

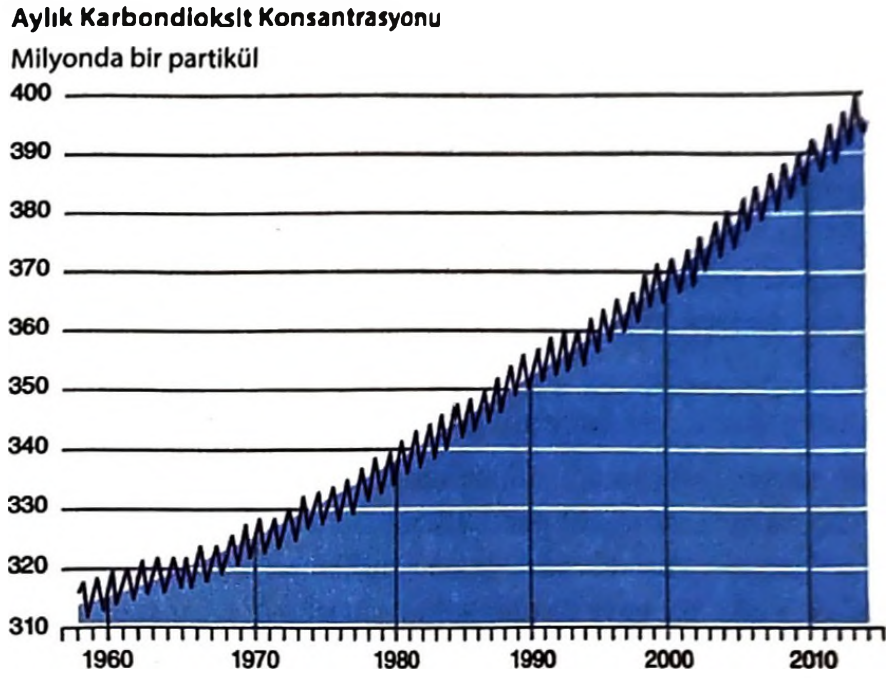
Sprey kutularında ve buzdolaplarında kullanılan kloroflorokarbonlar (CFC'ler) tarafından stratosferdeki UV engelleyici ozon tabakasının ("ozon deliği" olarak adlandırılır) tahrip edilmesinin keşfi, 1987'de imzalanan ve bu maddelerin kullanımını yasaklayan uluslararası Montreal Sözleşmesine yol açtı. O zamandan beri, atmosferdeki CFC konsantrasyonları azalmaya başlamıştır (Şekil 21.7). Burada politika veya hükümet anlaşmalarını tartışmayacağımı vurguluyorum. Bu diğer kitapların konusu olan bir tartışma. Bununla birlikte,



Şekil 21.7 Kloroflorokarbonların (CFC'ler) kullanımını yasaklayan Montreal Sözleşmesi, atmosferik bileşimi değiştirmek üzere başarılı olmuş küresel ölçekteki protokolün bir örneğidir. Burada, yasağın uygulanmasından bu yana Dünyanın farklı bölgelerindeki bazı önemli CFC'lerin konsantrasyonları (trilyonda bir; ppt) gösterilmektedir (Kaynak: NOAA).

astrobiyolojik bir bakış açısından bakıldığında, Montreal Sözleşmesi önemli bir noktaya parmak basmaktadır –zekâ sahibi bir tür, ana dünya üzerindeki etkisine dair gezegen çapında bir farkındalık geliştirebilir ve hasarı tersine çevirmek için politikalar uygulayabilir. Çevrelerini manipüle etme konusunda inanılmaz bir kapasiteye sahip teknolojik türlerin, gezegenlerinde geri dönüşü olmayan bir yıkıma yol açmaya mahkûm olması söz konusu değildir.

Ne yazık ki teknolojik bir uygarlığın üretebileceği pek çok gaz ve atık ürün var. Bizim durumumuzda, CO_2 konsantrasyonlarındaki artışlar (Şekil 21.8), fosil yakıtların yakılmasına ve gömülü organik maddede depolanan karbonun uzun süre salınmasına bağlanmaktadır. CO_2'deki bu antropojenik artışlar, buz tabakalarının ve buzulların erimesinin neden olduğu deniz seviyelerinde bir artış ve yanıt vermeye başladıklarında organizmaların aralığındaki değişiklikler gibi tüm zincirleme etkilerle birlikte sera etkisinin arttırılmasıyla ilişkilidir. değişen sıcaklıklara. CO_2 emisyonlarını engellemeye yönelik uluslararası girişimler, bir medeniyeti, gezegensel atmosferini nasıl yöneteceği konusunda gezegen ölçeğinde bir anlaşma oluşturmaya yeniden zorluyor.



Şekil 21.8 Kayıtlar başladığından beri Hawaii, Mauna Loa'da ölçülen atmosferdeki karbondioksit artışı. Konsantrasyonlar milyonda bir (ppm) olarak gösterilmiştir (Kaynak: CO2: Sémhur/Wikimedia Commons/CC-BY-SA-3.0).

Şu anda, bu çabalar, Dünya çapında toplanan bilimsel verileri özümseyen ve kanıtların ezici ağırlığının bize ne gösterdiği konusunda fikir birliğine varmaya çalışan Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından denetleniyor. Küresel ortalama yüzey sıcaklıklarının 2100 yılına kadar 1,1 ile 6,4 °C arasında artacağı tahmin ediliyor. Modeller, deniz seviyesinde 18 ile 59 cm arasında bir artış öngörüyor. Grönland ve Antarktika'nın buz tabakaları erirse, bu artış 28 ila 79 cm arasında çok daha yüksek bir seviyede olabilir.

İklim değişikliğinin etkileri, bu sistemdeki yayınımları ve belirsizlikleri azaltma çabalarımıza bağlı olduğundan, belirsizdir. Bununla birlikte, daha kaotik hava sistemleri, su kıtlığı, tarımsal üretkenlik üzerindeki büyük etkiler ve diğer zincirleme etkiler tahmin edilmiştir.

Dünyanın kademeli bir ısınmaya tepkisinin basit bir doğrusal tepki olması pek mümkün görünmüyor. Bunun yerine sistemin bir durumdan diğerine geçtiği **kritik eşik** olabilir. Bunlar, gömülü metan gazı hidratlarının ani erimesi ve okyanus döngüsü modellerinde kısa bir süre içinde gezegen boyunca ısı taşınmasını etkileyen hızlı değişiklikler dâhil olmak üzere çeşitli mekanizmalar tarafından hızlandırılabilir. Örneğin, Kuzey Avrupa'ya ılık su getiren Kuzey Atlantik Okyanusu Dolaşımının çökmesi, Kuzey Avrupa'yı, aynı enlemde (örneğin Alaska) Dünyanın diğer bölgeleriyle daha tutarlı sıcaklıklara sürükleyecektir. Kritik eşikle ilgili en büyük endişe, tahmin edilemez olmaları ve kısa zaman dilimlerinde (on yıllarca) ani ve çok ciddi iklimsel bozulmalara neden olabilmeleridir. Geçmişteki kitlesel yok oluşlar, bu tür ani değişikliklerin, biyosferde

çöküşe neden olabilecek birbiriyle bağlantılı diğer değişiklikleri harekete geçirip geçirmeyeceğine dair tüyler ürpertici soruları gündeme getiriyor.

Burada Dünya üzerindeki insan etkisinin tüm hikâyesini çözemeyiz, ancak türümüzün Dünya üzerindeki etkisini düşünürken, uygarlığımız için uzun vadeli planımız hakkında başka bir soru daha var: Dünyanın ötesine geçecek miyiz? Şimdi bu soruyu inceleyeceğiz ve sonra, Dünyada başarılı bir şekilde yaşamak ve uzaya yerleşmek gibi iki hedefin gerçekten birbirinden farklı olup olmadığını düşünmeye döneceğiz.

21.5 Dünyanın Ötesinde İnsanın Geleceği

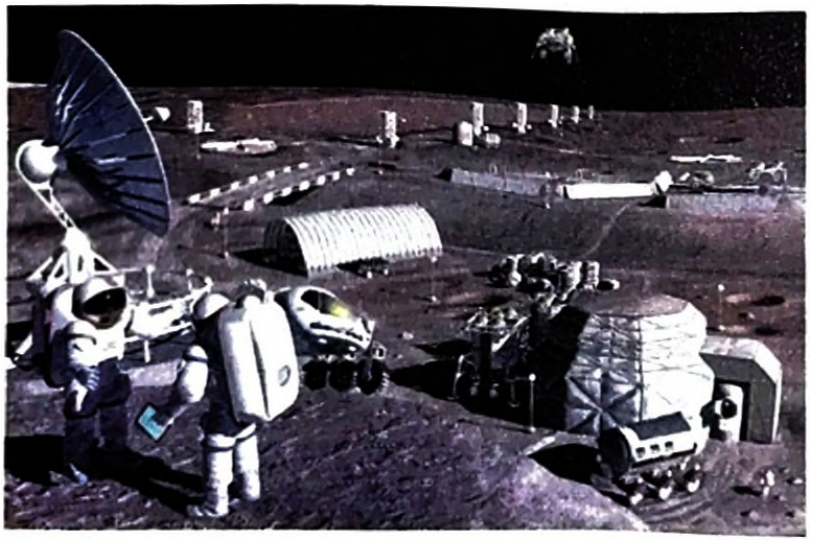
Bölüm 20'de, neden Dünya dışı zekâlar tarafından ziyaret edilmediğimizi sorgulayan Fermi paradoksunu inceledik. Paradoksun cevabının ne olabileceğini düşünmekten bağımsız olarak, insanların kendi ana gezegenlerini terk edip etmeyecekleri ve başka bir yere seyahat edip etmeyecekleri meselesini gündeme getiriyor.

İnsanların uzun zamandır Dünyayı terk etme istekleri vardı (Şekil 21.9), bu istek ilk olarak Yuri Gagarin (1934–1968) 1961'de Vostok uzay aracıyla Dünyanın yörüngesini ilk kez turladığında ve 1969'da Neil Armstrong, Apollo 11'in Ay görevi sırasında başka bir gezegenimsinin yüzeyine adım atan ilk insan olduğunda tam olarak açığa çıktı.

Dünyadan ayrılmaya yönelik bu çabalar, bilim insanlarının diğer gezegenimsilere ulaşmak için gereken yörüngeleri ve enerjileri hesaplamasına izin veren Newton yasalarından türetilen temel anlayışlara dayanıyordu. Bu denklemlerin en önemlisi ve fiziği uzay araştırmalarına uygulamaya yönelik ilk girişimlerden biri ünlü roket denklemidir.

21.5.1 Roket Denklemi

Roketlerin diğer gezegenimsilere nasıl götürüleceğini öngörmek için kullanılan bu basit denklem, uzay yolculuğunun başlamasından çok önce kabul edildi.



Şekil 21.9 Ayda bir istasyon (Kaynak: NASA).

1903'te Konstantin Tsiolkovsky (1857–1935) **ideal roket denklemini türetti.** Denklem, 'delta-*v*' (Δv) sembolüyle gösterilen roketin etkin egzoz hızı ve bir roketin (veya başka bir reaksiyon motorunun) ilk ve son kütlesiyle ilgilidir. Delta-*v*, üzerine başka hiçbir dış kuvvet etki etmiyorsa, roketin maksimum hız değişimidir. Bir roketin yönünü değiştirmek için gereken 'çaba' olarak kabul edilebilir. Denklem şu şekildedir:

$$\Delta v = v_e \ln(m_0 / m_f) \qquad (21.1)$$

burada, v_e roket egzoz hızı, m_0 roketin başlangıçtaki kütlesi ve m_f roketin son kütlesidir (roket itici güç kullandığı için m_f ilk kütleden farklıdır). Bir gezegenimsiden bir roket fırlatıyorsak, Δv'nin kaçış hızı olduğuna dikkat edin.

Roket egzozunun hızı, spesifik etkinin bir fonksiyonu olarak da ifade edilebilir. Spesifik etki (genellikle I_{sp} olarak kısaltılır), roketin birim zamanda kullanılan itici gaz miktarına göre kuvvetidir. Size roket motorunun verimliliğini söyler. Spesifik etki ne kadar yüksek olursa, belirli bir itme kuvveti için gereken itici gaz akış hızı o kadar düşük olur. Şu şekilde ifade edilebilir:

$$I_{sp} = v_e / g_0 \qquad (21.2)$$

burada g_0, Dünya yüzeyine yakın bir boşluktaki bir cismin nominal kütleçekim ivmesidir (9,81 $m.s^{-2}$ olarak tanımlanır).

İdeal roket denklemi aynı zamanda bir kişinin bir roketi, örneğin bir yörüngeden bir gezegene doğru hareket ederek gezegenin etrafındaki yörüngeye sokmak, belki de üzerine inmek için bir yörüngeden diğerine hareket ettirmek için uygulanması gereken enerjiyi hesaplamasına da izin verir. Bu basit denklemden, yörünge mekaniği bilimi ve onunla birlikte Dünyanın ötesine insan yolculukları planlama olasılığı doğmuştur.

21.6 Güneş Sistemine Yerleşme

Apollo Programı (1961–1972) sırasında Ayın keşfedilmesi, Dünyanın ötesinde geçen nispeten kısa bir süredir. Ancak insanlık, kendi Dünyasının ötesinde kalıcı olarak bir varlığa ulaşmak istiyorsa, kendi kendine yetebilecek üsler inşa etmelidir (Şekil 21.9).

Diğer dünyalara seyahat etmenin politik ve bilimsel nedenleri farklıdır. Mars'ın erken tarihinde Dünyayla benzerlikler taşıyan bir tarihi (Bölüm 17) vardır. Bu gerçek, hem yaşam aramak hem de karasal kayalık gezegenlerin evrimini daha iyi anlamak için gezegenin keşfini motive eder. Bununla birlikte, Ay bize Mars'tan daha yakındır (geçiş süreleri Mars için geçerli olan ayların aksine iki ila üç gündür), bu da onu diğer gezegenimsilerin keşfi için yaşam destek teknolojisini optimize etmek adına daha çekici bir yer haline getirir (Şekil 21.10).. Ayda, hatalar daha kolay düzeltilebilir ve sistemlerin arızalanmasının, mahsur kalmış bir nüfusun ölümle karşı karşıya kalmasıyla sonuçlanması daha az olasıdır.



Şekil 21.10 Mars'ın keşfi (Kaynak: NASA).

Bölüm 17'de gördüğümüz gibi, Mars, kabaca Güneş Sisteminin iç kısmının gezegenimsileri arasında Dünyaya en çok benzeyen olarak görülebilir ve bu gezegenin insanlar tarafından keşfi ve yerleşimi için önemli çabalar harcanmıştır. Birçok hayati kaynak çevresinden elde edilebilir. Örneğin, yüzeyde topraktan kazılabilen, eritilebilen ve temizlenebilen permafrost biçimindeki su bulunur. Atmosferin su içeriği düşük olmasına rağmen (yaklaşık %0.03), bu, fan benzeri bir aspiratör teçhizatında büyük hacimlerde elde edilebilir, yoğunlaştırılabilir ve toplanabilir. Ayda istasyon kurarken durum daha da zorlaşıyor. Bu konumda, kutup bölgelerinde sürekli gölgeli kraterlerdeki buzdan su buzu elde edilebilir veya dış kaynaklardan gönderilmelidir.

Mars'ta, gezginlerin ısıtma ve diğer sistemleri için yakıt, bir nikel veya rutenyum katalizörü kullanılarak 300–400 °C'de optimal olarak çalıştırılan Sabatier reaksiyonunda metandan elde edilebilir:

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + \text{enerji}$$

H_2, suyun elektrolizinden ve atmosferden elde edilen CO_2'den gelecektir (%95,3 içerir). Metan sıvılaştırılabilir ve çok çeşitli yakıt gerektiren işlemlerde kullanılabilir.

Mars'ta toplanacak bir başka yararlı kaynak da karbon monoksittir. CO birkaç yolla üretilebilir. CO_2, Boudouard reaksiyonunda yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 800 °C) karbonla reaksiyona girebilir:

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO$$

Başka bir kaynak, buhar (Mars suyundan üretilen) ve karbonun endotermik reaksiyonu yoluyla üretilen bir hidrojen ve karbon monoksit karışımı olan 'su gazı'dır:

$$H_2O + C \rightarrow H_2 + CO$$

CO ayrıca, %0,08 gibi düşük bir konsantrasyonda olmasına rağmen, Mars atmosferinde de bulunur. CO üretildikten sonra, 'sentez gazı' (CO ve H_2) dizel, petrol ürünleri, yağlayıcılar, plastikler vb üretmek için kullanılabilir. Mars için çok çeşitli endüstriyel süreçler öngörülebilir.

Tartışma Noktası: Dünyalaştırma

Diğer gezegenlere yerleşmek için, gezegenin atmosferik koşullarının yaşama ve nihayetinde insanlara daha iyi uyması adına değiştirilmesini içeren iddialı planlar öne sürülmüştür. Daha önce tartışılan karasal atmosfer üzerindeki kendi etkimiz göz önüne alındığında, bir atmosferin kasıtlı olarak değiştirilebileceğini düşünmek o kadar da zor olmayabilir. Örneğin Mars örneğinde, atmosfere (yüzeydeki kayalardan sentezlenen) CFC'leri enjekte ederek gezegeni ısıtmak, bir sera etkisi başlatmak, atmosfere CO_2 salmak, böylece atmosfer basıncını artırmak ve yüzeyde tutulacak sıvı suyu mümkün kılmak için kullanılacak bir araç olarak önerilmektedir. Bu koşullar altında, atmosferdeki oksijen konsantrasyonları arttıkça organizmaların artan karmaşıklığıyla biyokütle ve oksijen üretmek için siyanobakteriler ve algler dâhil edilebilir. Bu tür planları gerçekleştirmek için gereken süre, yüzyıllardan binlerce yıla kadar farklı hesaplamalar ve savunucular arasında çılgınca değişir. Dünyalaştırmanın hem teknik hem de etik yönlerini tartışın. Yaşanabilirlik için önemli olduğunu anladığınız geri bildirim süreçlerine dayalı böyle bir işletmedeki başlıca teknik belirsizlikler nelerdir? Mars örneğini düşünün. Levha tektoniğinin olmamasının, Dünyalaşmış bir atmosferin çok uzun vadeli sürdürülebilirliği üzerinde ne gibi bir etkisi olur? Bunu yapabilsek bile, orada yaşamı kesin olarak dışlamasaydık, bir gezegenimsiyi değiştirmek etik olarak kabul edilebilir miydi?

Birch, P. (1992) Terraforming Mars quickly. Journal of the British Interplanetary Society 45, 331–340.

Fogg, M.J. (1995) Terraforming: Engineering Planetary Environments, SAE International, Warrendale, PA.

McKay, C.P., Toon, O.B., Kasting, J.F. (1991) Making Mars habitable. Nature 352, 489–496.

Tartışma Noktası: Ay ve Mars'ta kendi kendine yetecek şekilde yaşamak için ne gerekiyor?

Güneş sistemindeki her gezegenimsi, fiziksel aşırılıkların ve mevcut kaynakların kendine özgü kombinasyonlarına sahiptir. Ayın kutup kraterlerinde su var ama atmosferi yok. Buna karşılık, Mars'ta CO_2'nin baskın olduğu atmosfer, yakıt olarak metan üretmek için bir gaz kaynağı olabilir. Ayda bir atmosferin olmaması onu iyonlaştırıcı radyasyona daha fazla maruz bırakır. Ancak Ay, Dünyaya daha yakındır ve bu nedenle, Dünyaya daha hızlı bir acil dönüş için fırsat sağlayacaktır. İnsan yerleşimi için bir hedef olarak Ay ve Mars'ı seçmenin, insanlar bakımından fiziksel farklılıkları, kaynak farklılıklarını ve lojistik farklılıkları tartışmanın artı ve eksilerinin bir listesini yapın. İlk insan yerleşimi için hangi gezegenimsinin daha iyi bir seçim olduğuna karar vermek için bu bilgiyi kullanın.

Seedhouse, E. (2008) Lunar Outpost: The Challenges of Establishing a Human Settlement on the Moon. Springer, Heidelberg.

Zubrin, R. (2011) The Case for Mars. The Plan to Settle the Red Planet and Why We Must. Free Press, New York.

Mars, Güneşe Dünyadan daha uzak olmasına ve ışık seviyeleri Dünyadakinin ortalama yaklaşık %43'ü (yörüngesindeki konumuna göre değişir) kadar olmasına rağmen, bu değerler bitki yetiştirmek için yeterince yüksektir. Esasen öğütülmüş bir volkanik kayaç olan Mars regoliti, büyüme için bir substrat olarak kullanılabilir. Mars'ın bazı bölgelerinde sülfatlar gibi yüksek tuz konsantrasyonları bulunur. Perkloratların, Mars topraklarında yaklaşık %0,4–0,6 ağırlıkta her yerde bulunduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, bazı regolit materyallerinin bu kirleticilerden arındırılması gerekebilir. Önemli olan ozon korumasından yoksun olan yüzey, 200 nm'ye kadar zararlı UV radyasyonuna maruz kalır, ancak bu radyasyondan cam (kendisi silika açısından zengin kayaçlardan elde edilmiştir) veya plastiklerle korunulabilir. Böylece, yüzeyde mahsul üretimi için UV korumalı sera yapıları oluşturmak mümkündür.

Çoğu gezegenimside olduğu gibi, Mars da Dünyadakinden daha yüksek seviyelerde iyonlaştırıcı radyasyona maruz kalır. Atmosferi, 16 $g.cm^{-3}$ alüminyuma eşdeğer bir koruma sağlar (Dünyadaki yaklaşık 1000 $g.cm^{-3}$'e kıyasla). Yüksek yoğunluklu parçacık (esas olarak proton) fırtınaları olan Güneş Parçacık Olaylarından (SPE*) gelen iki büyüklük derecesi daha yüksek iyonlaştırıcı akı ve parçacıkların daha büyük yoğunluğu, Mars regolitinde bir istasyonun kaplanması gibi korumayı zorunlu kılar.

Tüm faktörler göz önüne alındığında, insanların temel hayatta kalma materyalleri açısından ihtiyaç duyduğu şeylerin çoğunu sağlamak için yerel kaynaklı malzemeler kullanarak Mars'ta bir insan yerleşiminin kurulduğunu hayal etmek makul. O gezegende insan uygarlığının kendi kendini idame ettiren bir uzantısı mümkün görünüyor.

Güneş sisteminin iç kısmının ötesinde, insan yerleşimleri inşa etmek için çeşitli seçenekler mevcuttur. Göktaşı kuşağı, bunun için geniş kaynaklar sunar. Buradaki cisimlerin sahip olduğu düşük kütleçekim, gezegenlere kıyasla göktaşlarının kütleçekim kuyusundan kaçmak için nispeten daha az enerjiye ihtiyaç duyduğu anlamına gelir. Örneğin, Mars'ın kaçış hızı 5.0 $km.s^{-1}$'dir. Buna karşılık, en büyük göktaşı olan Ceres'in (950 km çapında) kaçış hızı 0,51 $km.s^{-1}$'dir. Diğer tüm göktaşları daha da düşük kaçış hızlarına sahiptir, bu da onları terk etmeyi ve aralarında hareket etmeyi kolaylaştırır.

Daha ağır metallerin çekirdeğe yakın bir yerde farklılaştığı Dünyanın aksine, yüzey cevherlerinden ayrı olarak, birçok göktaşında bulunan metaller bunlar boyunca dağıtılır ve çıkarılmasını kolaylaştırır. Göktaşları, genellikle Dünyadaki madenlerde bulunandan önemli ölçüde daha yüksek konsantrasyonda, demir, nikel ve nadir platin grubu metaller gibi değerli ve faydalı materyaller içerir. Altın, kobalt, manganez, demir, osmiyum, platin, rodyum vb gibi birçok önemli element yerkabuğundan çıkarılıp kullanılırken, elementlerin yüksek konsantrasyonlarını bulmak giderek zorlaşıyor ve uzay tabanlı kaynaklar oluşturuyorlar.

---

* [İng.] Solar Particle Events –çn.

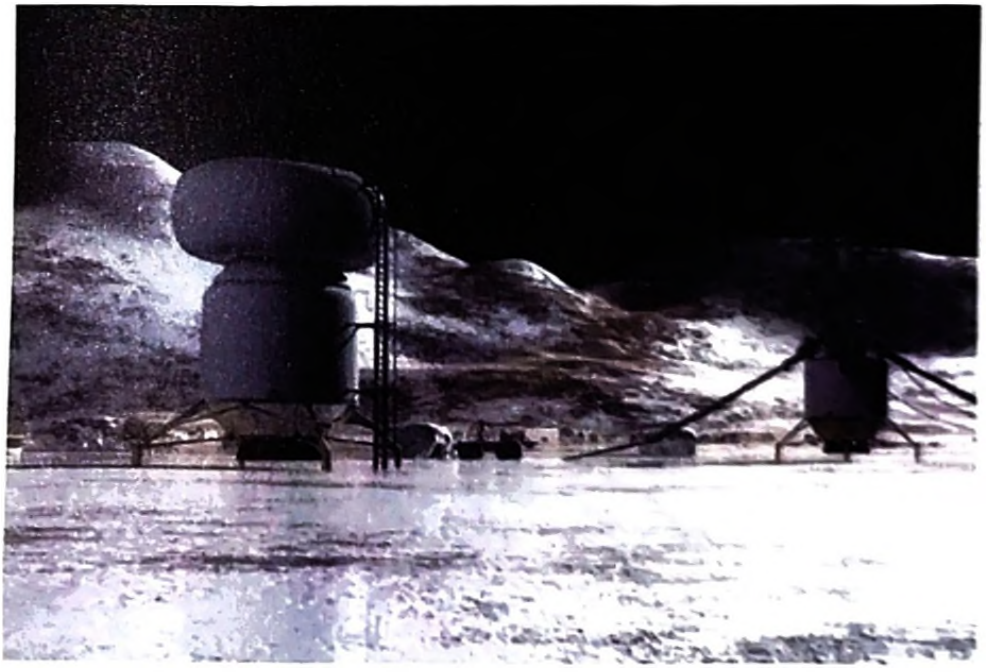
Göktaşlarının yaklaşık %17'sini oluşturan S tipi göktaşları, endüstriyel olarak en umut vaat eden hedeflerden bazılarıdır. 10 m'lik küçük bir S tipi göktaşı, 50 kg'ı platin ve altın gibi metaller şeklinde yaklaşık 650.000 kg metal içerir. M tipi göktaşları daha enderdir, ancak yaklaşık on kat daha fazla metal içerir.

Bu tür girişimlerin maliyeti kolayca hesaplanamaz. Bu tür materyallerin başarılı bir şekilde toplanması, bulunabilirliği artırarak Dünyadaki piyasa fiyatlarını düşürebilir, bu nedenle hemen tahmin edilemeyen bir ekonomik geri dönüşü vardır. Elbette mevcut materyallerin bolluğundan hiç kuşku yoktur. 200 km çapında bir göktaşı olan ve göktaşı kuşağındaki en büyük M-tipi göktaşlarından biri olan 16 Psyche, birkaç milyon yıl boyunca Dünyadaki üretim ihtiyacını karşılayabilecek yaklaşık $1,5 \times 10^{19}$ kg nikel-demir karışımı içerir. Yaklaşık 2 km çapındaki küçük bir metalik göktaşı, mevcut piyasa fiyatlarında 20 trilyon ABD dolarından fazla endüstriyel ve değerli metal içermektedir.

Göktaşları yalnızca Dünya endüstrisinin ilgisini çeken bir metal kaynağı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda uzayda insan varlığını uzun süreli olarak sürdürmek için su gibi uçucu bileşenlerin zengin kaynaklarını oluştururlar. Su, oksijen ve yakıt gibi diğer ürünleri yapmak için de kullanılmaktadır.

Daha uzağa gitmek ve göktaşı kuşağının ötesinde yerleşimler kurmak, nispeten kararlı ve dev gaz gezegenleriyle bağlantılı, muazzam radyasyon alanlarından arınmış bölgelerin belirlenmesini gerektirir. Jüpiter sisteminde, bir istasyon için potansiyel bir konum olarak Callisto önerilmiştir (Şekil 21.11).

En uzaktaki Galilei uydusu olan Callisto, en düşük radyasyon alanına sahiptir ve düşük gelgit kuvvetleri, yüzeyin yaşlı olduğunu ve dolayısıyla iç uydulara



Şekil 21.11 Jeolojik istikrar ve (diğer Jüpiter uydularına kıyasla) nispeten düşük radyasyon, Callisto'yu Güneş Sisteminin dış kısmına yapılan derin uzay görevlerinde bir üs ve yakıt ikmal istasyonu olarak hedef haline getirmiştir (Kaynak: NASA).

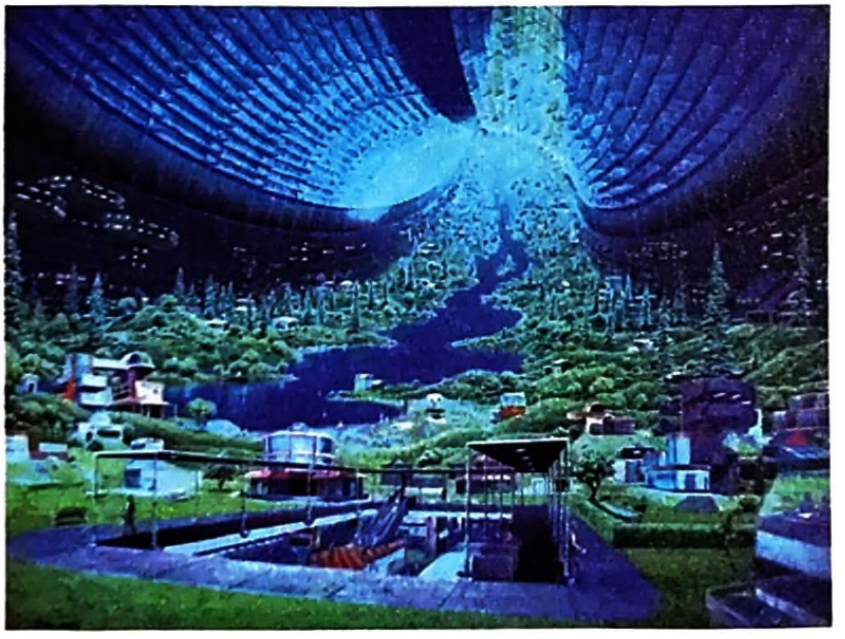


Şekil 21.12 Toroidal uzay gemisi binlerce insanı taşır (Kaynak: NASA).

kıyasla jeolojik olarak nispeten kararlı olduğu anlamına gelmektedir. Uydu yılda 0,036'lık bir sievert (Sv) değerine sahiptir. Dünyada herhangi bir insan, doğal arka plan kaynaklarından yılda yaklaşık 0,006 Sv alır. Dozları kabul edilebilir seviyelere indirmek için Callisto'da radyasyon koruması gerekli olacaktır, ancak bu teknik zorluk, örneğin günlük dozun bir insanı öldürmeye yetecek olan 5,4 Sv olduğu Europa'nın yüzeyinden çok daha azdır (Bölüm 18).

Nihayetinde, Güneş Sistemine insan yerleşiminin anlamlı olması için, on binlerce insanı taşıyacak büyük uzay gemileri inşa etmek gerekli olacaktır.

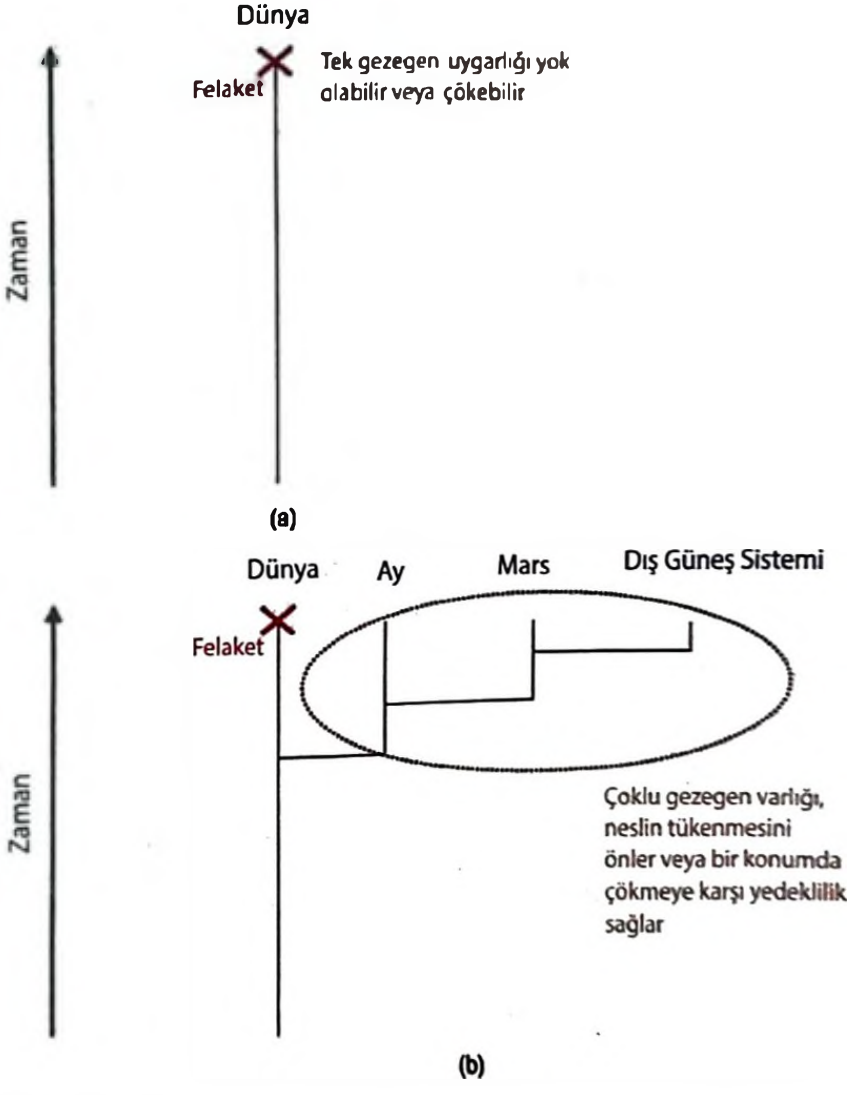
Gerard O'Neill (1927–1992), dönmeyle yaratılan yapay kütleçekimle, büyük popülasyonların Dünyaya benzer koşullarda yaşamasına olanak vereceği (Şekil 21.12) büyük toroidal ve silindirik gemiler için tasarımlar düşünen Amerikalı bir fizikçiydi (Şekil 21.13). Bu fikirler şu anda mühendislik kapasitemizin ötesindedir, ancak eğer kaynakları göktaşlarından elde edip onları Dünyadan götürmenin yaratacağı muazzam enerji maliyetlerinden kaçınabilirsek, bu tür insan yerleşimlerinin kurulabileceğini öngörebiliriz.



Şekil 21.13 Büyük ölçekli bir uzay gemisinin içi, tüm insan topluluklarını taşır (Kaynak: NASA).

21.7 Yok Oluşu veya Çöküşü Önlemek: Çok Gezegenli Türler

Uzayda kalıcı yerleşimler inşa etmek için birçok sebep var. Daha önce, göktaşı kuşağındaki geniş kaynaklardan bahsetmiştim. Bununla birlikte, çok önemli sebeplerden bir tanesi, yok oluşu önleme veya en azından uygarlığın feci şekilde çöküşüne karşı dayanıklılık ve yedek bir yer sağlama olasılığıdır. Şimdiye dek gördüğümüz gibi, Dünyada bir uygarlığın başına gelebilecek çeşitli felaketler vardır. Göktaşı çarpması ve iklim değişikliği gibi bazı felaketleri hafifletebiliriz. Bununla birlikte, süpervolkanlar, hızlı hareket eden kuyruklu yıldızlar ve diğer bilinmeyen afetler, uygarlığın yok olma veya feci bir çöküş olasılığından arınmış olmasını asla sağlayamayacağımız anlamına gelmektedir.



Şekil 21.14 Çok gezegenli bir tür olmak. (a) Bir gezegende (tek bir siyah çizgi olarak gösterilen) bulunan bir uygarlığın, büyük bir felaketin onu yok etme veya zayıflatma şansı vardır. (b) Güneş sisteminin farklı yerlerinde (dallanan siyah çizgilerle temsil edilen) bağımsız, kendi kendini devam ettiren kolları olan bir uygarlığın, bu kollardan birini yok eden veya geçici olarak devre dışı bırakan bir felaketten kurtulma şansı vardır (Kaynak: Charles Cockell).

Ancak, çeşitli gezegenimsilere dağılmış bir uygarlık inşa edersek, neslimizin tükenmesini önleme şansımızı artırırız. Uyarlığımızın yok edilmesi, Güneş Sistemi çapında bir felaket gerektirecektir. Daha küçük çaplı bir felaket durumunda, diğer kollar, uygarlığın tek bir yerdeki çöküşüne (yok olmasa bile) karşı bir yedek yaşama alanı ve dayanıklılık sağlayacaktır. Uzaydaki varlığımız yeterince genişler ve ekonomik ölçeği yeterince geniş olursa, bir felaket durumunda, insanlığın uzaydaki kollarının, Dünya uygarlığının daha hızlı bir yeniden yapılanmaya başlamasına yardımcı olması bile mümkün olabilir. Bu, **çok gezegenli tür** kavramıdır ve Şekil 21.14'te gösterilmektedir.

İnsanlığın geleceğini bu açıdan düşündüğümüzde, uzay teknolojisinin zengin uluslardan gelen bir keşif telaşından daha fazlası olduğunu anlıyoruz. Bu, sonunda hayatta kalmamız için gerekli olabilir. Uzay teknolojisi ve keşif, neslimizin tükenmesini önlememize fırsat sağlama potansiyeline sahiptir. Diğer teknolojiler, yaşam kalitemizi ve kapasitemizi geliştirir, ancak bir tür olarak uzun vadede hayatta kalma beklentilerimizi temelden değiştirmez.

Sadece zekâ sahibi olmak, neslin tükenmesini önlemek için yeterli değildir. Bir tür, Dünyanın ötesinde kendi kendine yeten yerleşim bölgeleri inşa etmek için zekâsını da kullanmalıdır. Dinozorlar ve diğer birçok organizma, 65,5 milyon yıl önce kendi kaderleriyle yüzleşmişti (Şekil 21.15). İnsan uygarlığı üstün zekâsına ve teknolojisine rağmen, hala dinozorlar gibi, göktaşı çarpmasının insafına kalmıştır.



Şekil 21.15 Dinozor neslinin tükenmesinin çarpıcı bir tasviri. Göktaşı ve kuyruklu yıldız saptırma programları inşa etmedikçe ve bir sigorta olarak Dünyanın ötesinde kalıcı yerleşimler kurmadıkça, uygarlığımız burada tasvir edilen felakete eğilimli olacaktır. Zekâ, tek başına bir türün geleceğini güvence altına almaz (Kaynak: wikicommons).

21.8 Tek Bir Hedef Olarak Çevrecilik ve Uzay Araştırması?

Uzay'daki keşif ve yerleşim ile yeryüzündeki çevre korumasını bir ya o ya o seçimi olarak görme eğilimi söz konusudur. Bazı çevreciler, uzay araştırmalarını, iklim değişikliği gibi Dünyada karşılaştığımız acil sorunlardan uzaklaşma yolu olarak görüyorlar. Uzay yerleşiminin bazı savunucuları, çevreciliği, Dünyanın ötesinde bir uygarlık kurmanın uzun vadeli vizyonundan uzaklaştıran içe dönük bir bakış açısı olarak görüyorlar. Bu nedenle, bu hedeflerden hangisinin öncelikli olduğuna karar vermemiz gereken bir noktada olduğumuz görüşünü kabul etmek olağandışı değildir.

Ancak, çevrecilik ve uzay yerleşimini tek ve aynı amaç olarak görebiliriz. Her ikisi de kozmosta yaşayan insanların varlığını sürdürülebilir şekilde sağlamaya çalışır. Bunlardan biri Dünyaya, diğeri ise uzaya odaklanır. Her iki grup da bir yaşam destek sisteminin oluşturulmasıyla ilgilenir. Dünya söz konusu olduğunda, bu yaşam destek sistemi gezegen ölçeğinde biyosferdir, uzay söz konusu olduğunda Ay, Mars veya başka bir yerde bulunan yaşam destek sistemleridir.

İki hedef arasında birçok sinerji vardır. Bu kitapta daha önce gördüğümüz gibi, Dünya üzerindeki ortamlar Dünya dışı ortamlarla benzerliklere sahiptir ve Dünya dışı ortamların jeolojisi, jeokimyası ve potansiyel yaşanabilirliği hakkında bilgi edinmek için kullanılabilir (Bölüm 17). Dünya dışı ortamlar, Dünyanın tarihini anlamak için yeni bilgiler sağlayabilir. Bu nedenle, Dünya ve diğer gezegenimsilerin çevreleriyle ilişkili çalışmalar ayrılmaz bir şekilde bağlantılıdır.

Teknolojik sinerjiler de vardır. Dünyayı incelemek için kullanılan uydu teknolojisi ve görüntüleme sensörleri, diğer gezegenleri incelemek için de kullanılabilir ve bunun tersi de geçerlidir. Su ve gıdanın doğal olarak oluşan sıvı su olmadan yetiştirilmesi gereken Dünya dışı ortamlarda hayatta kalmak için kullanılan teknolojiler, Dünyadaki geri dönüşüm ve atık ıslahı teknolojilerini geliştirebilir. Kısacası, çevreye verilen zararı en aza indirirken Dünyada yaşamak için ihtiyaç duyduğumuz teknoloji, ilke olarak başka bir yerde verimli bir şekilde yaşamak için ihtiyaç duyduğumuz teknolojiyle aynıdır.

Bu açıdan bakıldığında, belki de gezegen yüzeyinde ve uzayda kalıcılığını optimize etmeye çalışan akıllı bir tür, aslında tam olarak aynı şeyi yapmaktadır. Bu da, evrende sürdürülebilir popülasyonların yaratılmasını içerir.

21.9 Sosyoloji: Genel Bakış Etkisi

Uzayın keşfi ve uzayda yerleşim ile yeryüzündeki yaşam dair gezegen ölçeğinde bir bakış açısı geliştirilmesi sadece teknolojik midir yoksa bir tür, evrendeki yerine ilişkin görüşünü değiştirmeye başlayabilir mi? Astrobiyoloji bu soruyla, belirgin biçimde felsefi ve sosyolojik alanlara girer, ancak bu, zekânın bir gezegende nasıl geliştiğini daha iyi anlamak için yanıtlamamız gereken bir sorudur.

1980'lerde Frank White, *The Overview Effect* adlı kitabında ilginç bir bakış açısı sunuyordu. Burada insanlığın büyük bir kısmının, kozmosa kıyaslandığında küçücük ve yalnız kalan Dünyamızı uzaydan doğrudan gördüğünde, ulusal sınırların ve çatışmanın önemsizliğini fark etmeye başlayıp bakış açılarında bir değişikliğe gidebileceğini ileri sürmüştü.

Bu gezegen ölçeğindeki bakış açısına Genel Bakış Etkisi adını verdi ve uzay yolculuğunun sunduğu görüş değişikliği fikrini desteklemek için astronotlardan gelen kanıtları kullandı.

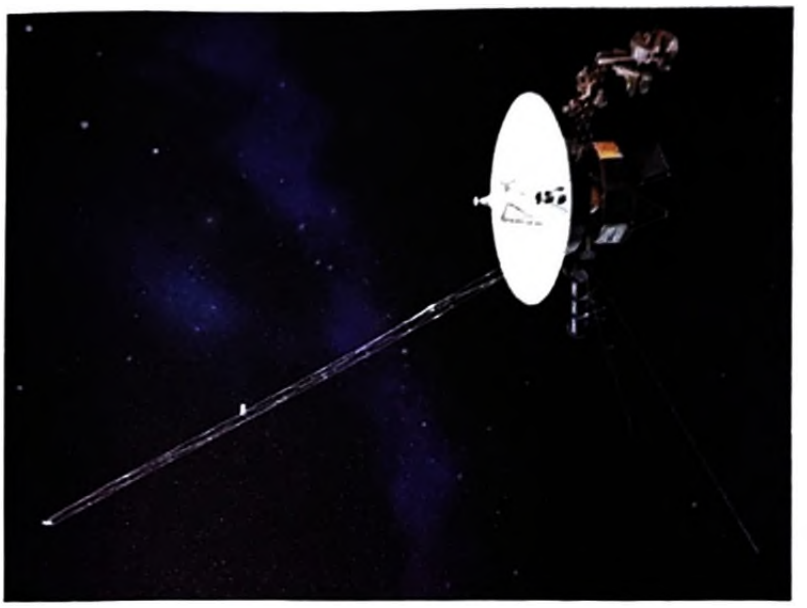
Temel insan bakış açısındaki değişim kapasitesi hakkında ne düşünürsek düşünelim, White'ın kitabı, uzay araştırması deneyiminin bir türün bakış açısını değiştirip değiştiremeyeceğine dair daha temel bir soruyu gündeme getiriyor. Evrimsel tarihimizden kaynaklandığını varsaydığımız rekabetçi ve bazen yıkıcı davranışlara sonsuza kadar bağlı mıyız yoksa bir türün daha dayanışmacı bir gezegensel bakış açısı geliştirmesi mümkün mü? CFC'lere yönelik Montreal Sözleşmesi gibi uluslararası anlaşmaların gerçek sonuçlar verebileceğini zaten gördük, ancak bu gezegen ölçeğindeki eylemler, bir türün yalnızca amaca uygun olarak zorlandığında büyük ölçekte nasıl hareket edebileceğine mi örnek oluşturmaktadır? Gezegen ölçeğinde kültürel bir bakış açısının, bir türün davranış biçimine dâhil edilmesi mümkün müdür?

21.10 Yıldızlararası Olacak Mıyız?

Son olarak şu soruyu sorabiliriz: İnsanlar sadece Dünyayı terk etmekle kalmayıp Güneş Sistemini de terk edecek mi? Dünya çok uzun vadede, en azından şu anki konumunda (ve teknoloji kullanılarak hareket ettirilmediğini varsayarsak!), Güneşin Kızıl Dev statüsüne geçişiyle mahvolacaktır. Bununla birlikte, Dünya, nemli bir seranın yüzeyindeki mevcut suyu uzaklaştırmasıyla bu zamandan çok daha önce yaşanmaz hale gelecektir (Bölüm 16). O zaman dönemde hayatta kalmak istiyorsak, buradan gitmek zorunda kalacağız.

Dünyanın ötesine geçmek için önce inandırıcı bir ikinci ev bulmamız gerekir. Diğer yıldızların etrafındaki Dünya benzeri gezegenleri aramamıza izin veren yeni teknolojik gelişmeler, bize potansiyel olarak yaşanabilir dünyaları, hatta oksijen ve kolonizasyon potansiyeli olanları bile tespit etme imkânı sunuyor. Bunları potansiyel evlerimiz olarak kabul etsek de etmesek de, bizi etik ve felsefî sorunlara sürüklüyor –sadece tek hücreli olsa bile, zaten üzerinde yaşam bulunan bir gezegeni kolonileştirmek etik midir?

Bununla birlikte, etik zorluk, yıldız sistemimizin ötesine insan yolculukları yapmaya dair teknolojik sorunların gölgesinde kalabilir. Yıldızlararası uçuş gerçekleştirebilen küçük robotik uzay araçları yapmak mümkündür. 2013'te, 1977'de fırlatılan ve ilk olarak dev gaz gezegenlerini keşfetmek üere Güneş Sisteminin dış kısmına gönderilen 722 kg'lık bir uzay aracı olan Voyager 1 (Şekil 21.16), Heliopause'dan ayrıldı ve yıldızlararası boşluğa girdi. Voyager 1, Oort



Şekil 21.16 İnsan uygarlığı 2013 yılında yıldızlararası bir uzay uygarlığı haline geldi. 1977'de fırlatılan Voyager 1 uzay aracı, Güneş Sisteminin dev gaz gezegenlerini keşfettikten sonra oradan ayrıldı. İnsanlar onu diğer yıldızlara kadar takip edecek mi? (Kaynak: NASA).

bulutuna yaklaşık 300 yıl içinde ulaşacak ve onu geçmesi yaklaşık 30.000 yıl alacaktır. Yaklaşık 40.000 yıl sonra, Camelopardalis takımyıldızında bulunan Gliese 445 yıldızının yaklaşık 1,5 ışık yılı yakınından geçecektir.

En yakın yıldızlara ulaşmak için Voyager hızında seyahat etmek, bin yıllık yolculukları ifade eder. Nükleer fisyon ve füzyon veya madde/karşı-madde çarpışmaları dâhil olmak üzere, ışık hızının küsuratlarına kadar daha yüksek hızlara ulaşmak için robotik ve insan yıldızlararası zanaat için çeşitli tahrik teknolojileri önerilmiştir.

Işıktan daha hızlı yolculuksa işin teknolojik spekülasyon kısmına geçer. Einstein'ın Genel Görelilik Teorisi düzlemsel olmayan bir uzay-zaman öngörür. Bu kavisli uzay-zamanın farklı alanları arasındaki varsayımsal bağlantılar olan solucan delikleri, ışık hızından daha hızlı bir yolculuğu ihlal etmek zorunda kalmadan evrendeki bir noktadan diğerine nasıl hareket edilebileceği konusunda önemli bir öneri olmuştur. Bununla birlikte, bu tür özelliklerin var olduğuna veya mevcut olsalar bile, uzay gemisi gibi makroskobik bir nesneyi bunların içinden geçirmenin mümkün olacağına dair hiçbir kanıt yoktur.

Kısa zaman dilimlerinde yıldızlar arasında seyahat edemesek bile, çok uzun yolculuk sürelerinin gerekli bir gerçeklik olduğunu edebilir ve büyük insan popülasyonlarının çok kuşaklı zaman ölçeklerinde uzak mesafelere seyahat etmesine olanak verecek uzay gemileri veya dünya gemileri inşa edebiliriz.. Böyle toplumlar ayakta kalır mı?

Yeni bir yıldıza doğru yıldızlararası uzayda birkaç bin yıllık yolculuklardan sonra, insan topluluklarının asıl amaçlarının ne olduğunu unutacakları ve sadece var olmuş olmak için var olacakları gözlemiyle sıklıkla karşı karşıya kaldım. Bu durumda, uzay görevi pek bir anlam ifade etmez. Ama karşılığında şunu sorabiliriz: Öyleyse bunun Dünya adlı uzay gemisinde olmaktan ne fark var? Belirli bir hedefi olmayan bir yıldızın etrafında sürekli dönüp duran uy-

garlığımızın uzun dönemli amacı nedir? Siz bu gelecek senaryosundaki rolünün ne olduğunu düşünüyorsunuz?

21.11 Sonuç

Nispeten kısa bir sürede, en azından jeolojik terimlerle, çevresini, uzay gemileri inşa etmesine ve Dünyanın ötesinde kalıcı bir insan varlığı kurmayı tasarlamasına izin verecek şekilde manipüle etme yeteneğine sahip bir tür gelişti. Bu türün geleceği belirsiz. Göktaşı çarpması gibi belirli doğal afetleri azaltma potansiyeline sahip olan bu tür, nüfus kontrolünden kaynakların tükenmesine kadar başka zorluklarla da karşı karşıyadır. Dış uzay, gelişmekte olan bir uygarlığın birçok sorununu çözmek için her derde deva olarak kabul edilemez, ancak kaynaklara ve enerjiye erişim, Dünyayı çarpmalardan korumak ve çok gezegenli bir tür haline gelerek neslinin tükenmesini önlemek, Dünyanın ötesinde kalıcı bir varlık göstererek elde edilebilecek faydalardan sadece birkaçıdır. Bu tür şeyleri yaparken, aynı zamanda varlığını destekleyebilecek bir gezegende – dünyada– sürdürülebilir bir şekilde yaşamayı da öğrenmelidir. Nihayetinde bu tür, Güneş Sisteminden ayrılmanın ve diğer yıldızlara seyahat etmenin zorluğu üzerine kafa yorabilir.

Dünyada ve uzayda sarfedilen tüm bu çabalarda ve karşılaşılan zorluklarda, astrobiyoloji bizi ileriye taşıyacak olan bilim dalıdır.

İleri Okumalar

Kitaplar

Cockell, C.S. (2006) Space on Earth: Saving Our World by Seeking Others. MacMillan, London.

Lewis, J.S. (1997) Mining the Sky: Untold Riches from the Asteroids, Comets and Planets. Basic Books, New York.

O'Neill, G. (1977) The High Frontier: Human Colonies in Space. Morrow, New York.

Rees, M. (2004) Our Final Century: Will Civilisation Survive the Twenty-first Century?: Will the Human Race Survive the Twenty-first Century? Arrow Books, London.

White, F. (1987) The Overview Effect: Space Exploration and Human Evolution. Houghton-Mifflin, New York.

Zubrin, R. (2012) The Case for Mars. The Plan to Settle the Red Planet and Why we Must. Simon and Shuster, New York.

Yayınlar

Bostrum, N. (2013) Existential risk prevention as global priority. Global Policy 4, 15–31.

Cirkovic, M.M. (2004) Forecast for the next eon: applied cosmology and the long-term fate of intelligent beings. Foundations of Physics 34, 239–261.

Crawford, I.A. (2009) The astronomical, astrobiological and planetary science

case for interstellar spaceflight. Journal of the British Interplanetary Society 62, 415–421.

Hopfenberg, R., Pimentel, D. (2001) Human population numbers as a function of food supply. Environment, Development and Sustainability 3, 1–15.

Krauss, L.M., Starkman, G.D. (2000) Life, the universe, and nothing: life and death in an ever-expanding universe. Astrophysical Journal 531, 22–30.

Landis, G.A. (1995) Footsteps to Mars: an incremental approach to Mars exploration. Journal of the British Interplanetary Society 48, 367–342.

Mellars, P. (2006) Why did modern human populations disperse from Africa ca. 60,000 years ago? Proceedings of the National Academy of Sciences 103, 9381–9386.

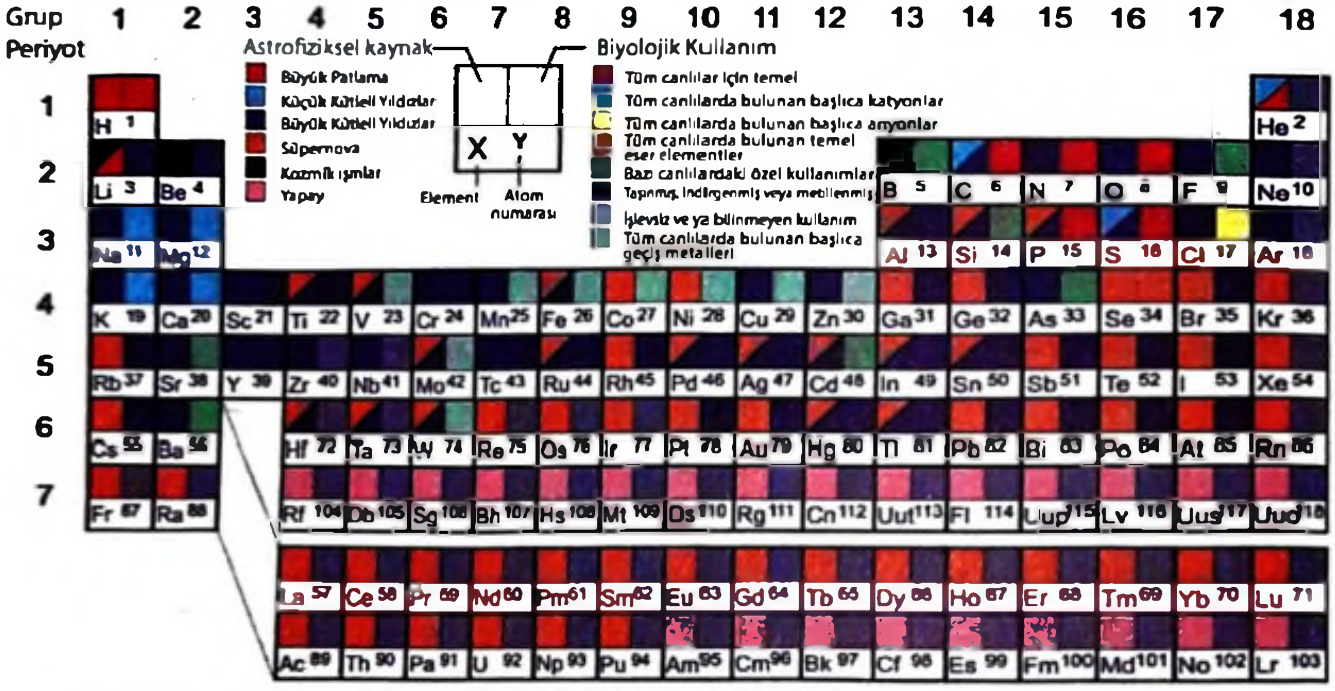
Miller, C.F., Wark, D.A. (2008) Supervolcanoes and their explosive supererruptions. Elements 4, 11–16.

Troutman, P.A., Bethke, K., Stillwagen, F., Caldwell, D.L., Manvi, R., Strickland, C., Krizan, S.A. (2003) Revolutionary Concepts for Human Outer Planet Exploration (HOPE). American Institute of Physics Conference Proceedings 654, 821–828.

Wood, B., Collard, M. (1999) The changing face of Genus Homo. Evolutionary Anthropology 8, 195–207.

EKLER

A.1 Astrobiyolojik Periyodik Tablo



A.2 Birimler ve Ölçekler

A.2.1 Uluslararası Standart Temel Birimler

Nicelik	İsim	Sembol
uzunluk	metre	m
kütle	kilogram	kg
zaman	saniye	s
elektrik akımı	amper	A
termodinamik sıcaklık	kelvin	K
madde miktarı	mol	mol
ışık şiddeti	kandela	cd

A.2.2 Temel Fiziksel Sabitler

İsim	Sembol	Değer
Işık hızı	c	$2.99792458 \times 10^{8}\ m/s$
Planck sabiti	h	$6.6260755 \times 10^{-34}\ J \cdot s$
Planck sabiti	h	$4.1356692 \times 10^{-15}\ eV \cdot s$
Planck h-çizgi	$\hbar$	$1.0545727 \times 10^{-34}\ J \cdot s$
Planck h-çizgi	$\hbar$	$6.582121 \times 10^{-16}\ eV \cdot s$
Kütleçekim sabiti	G	$6.67259 \times 10^{-11}\ m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
Boltzmann sabiti	k	$1.380658 \times 10^{-23}\ J/K$
Boltzmann sabiti	k	$8.617385 \times 10^{-5}\ eV/K$
Evrensel gaz sabiti	R	$8.314510\ J/mol \cdot K$
Elektron yükü	e	$1.60217733 \times 10^{-19}\ C$
Elektron yükü	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}\ N/A^2$
Vakum geçirgenliği	ε_0	$8.854187817 \times 10^{-12}\ F/m$
Vakum yalıtkanlığı	$1/4\pi\varepsilon_0 = K$	$8.987552 \times 10^{9}\ N \cdot m^2/C^2$
Coulomb sabiti	F	$96485.309\ C/mol$
Faraday sabiti	m_e	$9.1093897 \times 10^{-31}\ kg$
Elektron kütlesi	m_e	$0.51099906\ MeV/c^2$
Elektron kütlesi	m_p	$1.6726231 \times 10^{-27}\ kg$
Proton kütlesi	m_p	$938.27231\ MeV/c^2$
Nötron kütlesi	m_n	$1.6749286 \times 10^{-27}\ kg$
Nötron kütlesi	m_n	$939.56563\ MeV/c^2$
Atomik kütle birimi	u	$1.6605402 \times 10^{-27}\ kg$
Atomik kütle birimi	u	$931.49432\ MeV/c^2$
Avogadro sayısı	N_A	$6.0221367 \times 10^{23}\ /mol$
Stefan–Boltzmann sabiti	σ	$5.67051 \times 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$
Rydberg sabiti	R_∞	$10973731.534\ m^{-1}$
Bohr manyetonu	μ_B	$9.2740154 \times 10^{-24}\ J/T$
Bohr manyetonu	μ_B	$5.788382 \times 10^{-5}\ eV/T$
Akı kuantumu	Φ_0	$2.067834 \times 10^{-15} T/m^2$
Bohr yarıçapı	a_0	$0.529177249 \times 10^{-10} m$
Standart atmosfer	atm	$101325\ Pa$
Wien yer değiştirme sabiti	b	$2.897756 \times 10^{-3}\ m \cdot K$

A.3 Sıcaklık Ölçeği Dönüşümü

	Celsius'tan	Celsius'a
Fahrenheit	$[°F] = [°C] \times {}^{9}/_{5} + 32$	$[°C] = ([°F] - 32) \times {}^{5}/_{9}$
Kelvin	$[K] = [°C] + 273.15$	$[°C] = [K] - 273.15$

A.4 Güneşin Bileşimi

Gaz	Miktar (toplam atom sayısının yüzdesi)	Miktar (toplam kütlenin yüzdesi)
Hidrojen	91.2	71.0
Helyum	8.7	27.1
Oksijen	0.078	0.97
Karbon	0.043	0.40
Nitrojen	0.0088	0.096
Silikon	0.0045	0.099
Magnezyum	0.0038	0.076
Neon	0.0035	0.058
Demir	0.0030	0.14
Kükürt	0.0015	0.040

A.5 Başlıca Yıldız Türlerinden Bazılarının Sıcaklıkları ve Renkleri

Yıldız sınıfı	Etkin sıcaklık	Geleneksel renk açıklaması	Gerçekte görünen renk	Kütle (Güneş kütleleri)	Yarıçap (Güneş yarıçapı)	Parlaklık (bolometrik)	Tüm ana dizi yıldızlarının kesri
O	≥30 000 K	Mavi	Mavi	$\geq 16\ M_\odot$	$\geq 6.6\ R_\odot$	$\geq 30\,000\ L_\odot$	~0.00003%
B	10 000–30 000 K	Mavi Beyaz	Derin Mavi Beyaz	$2.1–16\ M_\odot$	$1.8–6.6\ R_\odot$	$25–30\,000\ L_\odot$	~0,1%
A	7500–10 000 K	Beyaz	Mavi Beyaz	$1.4–2.1\ M_\odot$	$1.4–1.8\ R_\odot$	$5–25\ L_\odot$	0.6%
F	6000–7500 K	Sarı Beyaz	Beyaz	$1.04–1.4\ M_\odot$	$1.15–1.4 R_\odot$	$1.5–5.0\ L_\odot$	3%
G	5200–6000 K	Sarı	Sarımsı Beyaz	$0.8–1.04\ M_\odot$	$0.96–1.15 R_\odot$	$0.6–1.5\ L_\odot$	7.5%
K	3700–5200 K	Turuncu	Soluk Sarı Beyaz	$0.45–0.8\ M_\odot$	$0.7–0.96 R_\odot$	$0.08–0.6\ L_\odot$	12%
M	2400–3700 K	Kırmızı	Açık Turuncu Kırmızı	$0.08–0.45\ M_\odot$	$\leq 0.7\ R_\odot$	$\leq 0.08\ L_\odot$	76%

A.6 Amino Asitlerin Üç Harfli ve Tek Harfli Gösterimleri

Amino Asit	3-Harfli Gösterim	1-Harfli Gösterim
Alanin	Ala	A
Sistein	Cys	C
Aspartik asit ya da Aspartat	Asp	D
Glutamik asit glutamat	Glu	E
Fenilalanin	Phe	F
Glisin	Gly	G
Histidin	His	H
İzolösin	Ile	I
Lizin	Lys	K
Lösin	Leu	L

Amino Asit	3-Harfli Gösterim	1-Harfli Gösterim
Metiyonin	Met	M
Asparajin	Asn	N
Prolin	Pro	P
Glutamin	Gln	Q
Arjinin	Arg	R
Serin	Ser	S
Treonin	Thr	T
Valin	Val	V
Triptofan	Trp	W
Tirozin	Tyr	Y

A.7 Genetik Kod için Kodon Tablosu (ayrıca Bölüm 4'te gösterilmiştir; Şekil 4.12)

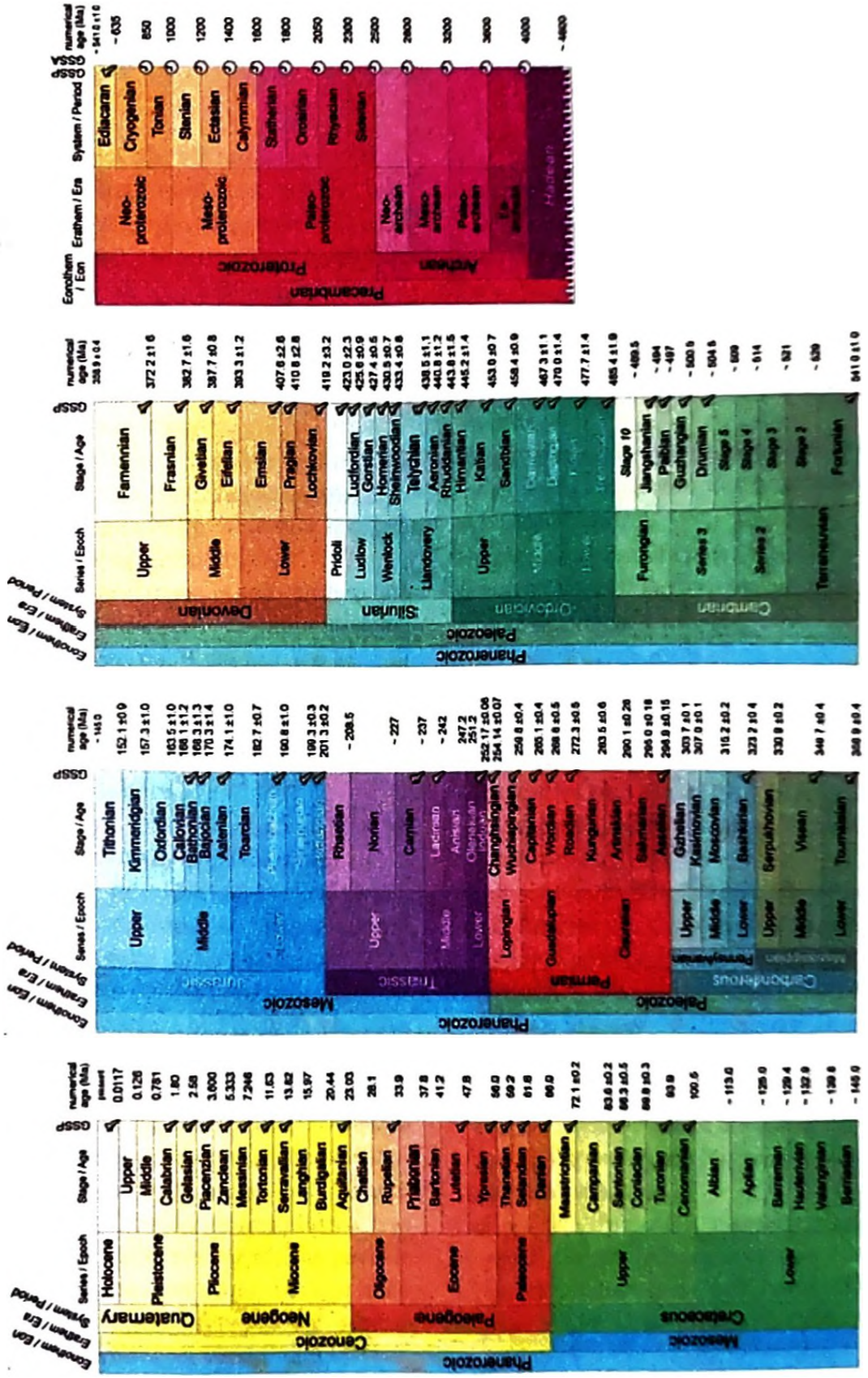
Birinci pozisyon	İkinci pozisyon U	C	A	G	Üçüncü pozisyon
U	UUU Phe	UCU Ser	UAU Tyr	UGU Cys	U
	UUC Phe	UCC Ser	UAC Tyr	UGC Cys	C
	UUA Leu	UCA Ser	UAA Dur kodonu	UGA Dur kodonu	A
	UUG Leu	UCG Ser	UAG Dur kodonu	UGG Trp	G
C	CUU Leu	CCU Pro	CAU His	CGU Trp	U
	CUC Leu	CCC Pro	CAC His	CGC Arg	C
	CUA Leu	CCA Pro	CAA Gln	CGA Arg	A
	CUG Leu	CCG Pro	CAG Gln	CGG Arg	G
A	AUU Ile	ACU Thr	AAU Asn	AGU Ser	U
	AUC Ile	ACC Thr	AAC Asn	AGC Ser	C
	AUA Ile	ACA Thr	AAA Lys	AGA Arg	A
	AUG Başlangıç kodonu (met)	ACG Thr	AAG Lys	AGG Arg	G
G	GUU Val	GCU Ala	GAU Asp	GGU Gly	U
	GUC Val	GCC Ala	GAC Asp	GGC Gly	C
	GUA Val	GCA Ala	GAA Glu	GGA Gly	A
	GUG Val	GCG Ala	GAG Glu	GGG Gly	G

A.8 Gezegensel Veriler

	Merkür	Venüs	Dünya	Ay	Mars	Jüpiter	Satürn	Uranüs	Neptün	Plüton
Kütle (10^{24} kg)	0.330	4.87	5.97	0.073	0.642	1898	568	86.8	102	0.0131
Çap (km)	4879	12,104	12,756	3475	6792	142 984	120 536	51 118	49 528	2390
Yoğunluk (kg m^{-3})	5427	5243	5514	3340	3933	1326	687	1271	1638	1830
Kütleçekim (m s^{-2})	3.7	8.9	9.8	1.6	3.7	23.1	9.0	8.7	11.0	0.6
Kaçış hızı (km s^{-1})	4.3	10.4	11.2	2.4	5.0	59.5	35.5	21.3	23.5	1.1
Dönme periyodu (h)	1407.6	−5832.5	23.9	655.7	24.6	9.9	10.7	−17.2	16.1	−153.3
Gün uzunluğu (h)	4222.6	2802.0	24.0	708.7	24.7	9.9	10.7	17.2	16.1	153.3
Güneşten uzaklık (10^6 km)	57.9	108.2	149.6	0.384	227.9	778.6	1433.5	2872.5	4495.1	5870.0
Günberi (10^6 km)	46.0	107.5	147.1	0.363	206.6	740.5	1352.6	2741.3	4444.5	4435.0
Günöte (10^6 km)	69.8	108.9	152.1	0.406	249.2	816.6	1514.5	3003.6	4545.7	7304.3
Yörünge periyodu (gün)	88.0	224.7	365.2	27.3	687.0	4331	10747	30 589	59 800	90 588
Yörünge hızı (km s^{-1})	47.4	35.0	29.8	1.0	24.1	13.1	9.7	6.8	5.4	4.7
Yörünge eğimi (derece)	7.0	3.4	0.0	5.1	1.9	1.3	2.5	0.8	1.8	17.2
Yörünge eksantrikliği	0.205	0.007	0.017	0.055	0.094	0.049	0.057	0.046	0.011	0.244
Eğiklik (derece)	0.01	177.4	23.4	6.7	25.2	3.1	26.7	97.8	28.3	122.5
Ortalama sıcaklık (°C)	167	464	15	−20	−65	−110	−140	−195	−200	−225
Yüzey basıncı (bar)	0	92	1	0	0.01	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Bilinmiyor	0
Uydu sayısı	0	0	1	0	2	67	62	27	14	5
Halka sistemi?	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var	Var	Var	Yok
Küresel manyetik alan?	Var	Yok	Var	Yok	Yok	Var	Var	Var	Var	Bilinmiyor

A.9 Jeolojik Zaman Ölçeği

Gönderen: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.X. (2013) The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes* 36, 199–204.



SÖZLÜK

16S rRNA. Spesifik bir bakteri ve arke ribozomal RNA türü. 16S rRNA'yı kodlayan DNA dizisi filogenetik ağaçlar oluşturmak ve mikrobiyal çeşitliliği analiz etmek için kullanılır.

Abiyotik. Biyolojik olmayan.

Birikme (Akresyon). Maddenin daha büyük nesneler oluşturmak üzere kütleçekimsel birikimi.

Açık tohumlular. Tohumları bir ovül içinde değil, diğer yapılarda (örneğin bir çam kozalağı) bulunan bitkileri içeren bir taksonomik sınıf.

Ada biyocoğrafyası. Ayrık organizma popülasyonlarının nasıl etkileşime girdiğini ve nasıl çapraz göç ettiğini araştıran ekoloji dalı.

Adenozin trifosfat (ATP). Fosfat bağlarında depolanan enerjiyle yaşamın enerji molekülü.

Afet taksonu. Yok oluştan kurtulan ve üremeye devam eden taksonlar.

AGB yıldızı. Asimptotik dev kol (AGB), Hertzsprung-Russell diyagramının düşük ila orta kütleli yıldızların (0,6–10,0 Güneş kütlesi) evrimleştiği bölgedir. Yıldızlar, bir karbon çekirdek ile helyum ve hidrojenin çift kabuk yanmasıyla karakterize edilir.

Akondritler. Karasal mafik kayaçlara benzer bir bileşime sahip kondrüllerden yoksun taşlı bir göktaşı. Akondritlerin bir zamanlar farklılaşma veya kısmi farklılaşma, erime ve yeniden kristalleşme geçirmiş gezegenimsilerin veya göktaşlarının bir parçası olduğu sonucuna varılmıştır.

Aktif bölge. Aktif bölge, bir enzimde substrat moleküllerinin bağlandığı ve kimyasal reaksiyona girdiği küçük bir bölgedir.

Alçak Dünya yörüngesi. 160 km (yörünge periyodu yaklaşık 88 dk) ile 2000 km (yörünge periyodu yaklaşık 127 dk) arasında olan Dünya etrafındaki yörünge.

Alfa parçacığı. Alfa parçacıkları iki proton ve iki nötrondan (bir helyum çekirdeği) oluşur.

Alfa çürümesi. Bir alfa parçacığının (helyum çekirdeği) kaybını içeren radyoaktif bozunma.

Alkalinofil. Yüksek pH'lı ortamlarda yaşaması gereken bir organizma.

Alkan. Yalnızca hidrojen ve karbon atomlarından oluşan doymuş bir hidrokarbon ve tüm bağlar tekli bağlardır. Alkanların genel kimyasal formülü C_nH_{2n+2}'dir.

Amazon Dönemi. Mars tarihinin yaklaşık 3 milyar yıl öncesinden günümüze kadar olan dönemi.

Amino asit. Amino asitler, amin ($-NH_2$) ve karboksilik asit (COOH) işlevsel gruplarından ve her bir amino aside özgü bir yan zincirden oluşan biyolojik olarak önemli organik bileşiklerdir.

Amorf. İyi tanımlanmış bir yapıya sahip olmayan materyal.

Amfiboller. Çift zincirli silika tetrahedradan oluşan, prizma veya iğne benzeri kristaller oluşturan, genellikle koyu renkli minerallerin önemli bir grubu.

Amfifilik. Hem hidrofilik (suyu seven) hem de hidrofobik (suyu sevmeyen) bölgelere sahip moleküler bir bileşiğin özelliği.

Ana dizi. Çekirdeklerinde helyum atomları oluşturmak için hidrojen atomlarını kaynaştıran yıldızlar.

Anaerobik. Oksijensiz (anoksik) koşullar.

Analoji (filogenetikte). Benzer özellikleri paylaşan, ancak genetik olarak yakından ilişkili olmayan iki organizma (yakınsak evrimin neden olduğu benzerlikler).

Anjiyospermler. Çiçekli bitkileri içeren taksonomik sınıf.

Anyonlar. Negatif yüklü iyonlar.

Anizotropi. Tüm yönlerde aynı özellikleri ifade eden izotropinin aksine yönlü bağımlı olma özelliği.

Anoksi. Oksijensiz (anaerobik) koşullar.

Anoksijenik fotosentez. Elektron vericisi olarak su dışındaki bileşikleri (örn. sülfit, demirli demir, hidrojen, hidrojen sülfür veya organikler) kullanarak enerji elde etmek için ışığın kullanılması.

Antroposen. Gezegendeki insanların faaliyetleri tarafından tanımlanan yeni bir jeolojik çağın önerilen adı.

Antroposentrik. İnsanların merkezi veya en önemli varlıklar olduğu görüşü.

İnsancıl (Antropik) ilke. Fiziksel evrenin gözlemlerinin, onu gözlemleyen bilinçli yaşamla uyumlu olması gerektiğine dair felsefi düşünce.

Antifriz proteinleri. Buz kristallerinin oluşumunu ve büyümesini engelleyen proteinler.

Antikodon. Bir kodona tamamlayıcı olan bir tRNA molekülü üzerindeki üç nükleotid dizisi.

Karşı-madde. Sıradan madde parçacıklarıyla aynı kütleye ancak zıt yüke sahip karşıt parçacıklardan oluşan materyal.

Apatit. Kristalde sırasıyla yüksek konsantrasyonlarda OH^-, F^- ve Cl^- iyonları içeren, genellikle hidroksiapatit, florapatit ve klorapatite atıfta bulunan bir grup fosfat minerali.

Apoptoz. Çok hücreli organizmalarda meydana gelebilecek programlanmış hücre ölümü süreci.

Arkeler. Bakterilerden genetik olarak farklı, tek hücreli mikroorganizmaların oluşturduğu üst âlem. Yunanca 'antik şeyler' için gelen arkeler, genellikle zorlu ortamlarda bulunur.

Arkeyan. Dünya tarihinin 4,0'dan 2,5 milyar yıl öncesine kadar olan dönemi.

Arrhenius ilişkisi. Reaksiyon hızlarının sıcaklığa bağımlılığını ifade eden bir formül.

Aromatik. Aromatik bileşikler veya aromatikler, düzlemsel halka sistemleri içeren bileşiklerdir.

Asetat. $C_2H_3O_2^-$ formüllü basit bir organik iyon.

Asidofil. Düşük pH'lardaki ortamlarda yaşamak zorunda olan organizma.

Asetojenez. Anaerobik bakterilerin CO_2'den ve bir elektron kaynağından (örn. H_2, CO, format, vb) asetat ($C_2H_3O_2^-$) ürettiği bir süreç.

Asteroit. Gezegenimsilerin kalıntıları. Çoğu, Mars ve Jüpiter arasındaki yörüngede bulunur.

Astrobiyoloji. Evrendeki yaşamın kökeni, evrimi ve dağılımının incelenmesi.

Astrometri. Bir yıldızın konumunun ölçümü.

Astronomik Birim (AB). 1 AB'nun tam olarak 149.597.870.700 m olarak tanımlandığı, kabaca ortalama Güneş-Dünya mesafesine (eskiden böyle tanımlanırdı) eşit olduğu bir astronomik mesafe.

Atom kütle numarası. Bir atom çekirdeğindeki toplam proton ve nötron sayısı (ikisi birlikte nükleon olarak bilinir).

Atom numarası. Bir kimyasal elementin atom numarası (proton numarası olarak da bilinir), bir atomun çekirdeğinde bulunan proton sayısıdır.

Ayrışma. Rüzgâr, yağmur ve mikrobiyal etkileşimler gibi fiziksel/kimyasal/biyolojik süreçler yoluyla doğal veya insan kaynaklı malzemelerin yerinde bozunması.

Azaltma (atmosferik kimya). Oksijen ve diğer oksitleyici gazların yokluğuyla oksidasyonun önlendiği atmosferik bir durum.

Bakteriler. Dünyadaki hemen hemen her habitatta yaşamak için yayılmış tek hücreli mikroorganizmaların oluşturduğu üst âlem. Bakterilerde hücre çekirdeği yoktur.

Bakteriyoklorofil. Fotosentetik bakterilerde bulunan ışık toplayan pigmentler.

Bakteriyel rodopsin. Bazı arkelerde, özellikle Halobakterilerde (adlarına rağmen arkedirler) bulunan basit, ışıkla çalışan bir proton pompası.

Bakteriyofaj. Bakterileri enfekte eden bir virüs.

Barofil (veya piezofil). Büyümek için yüksek basınca gereksinim duyan bir organizma.

Barimerkez. Özellikle astronomide, bir sistemin ortak kütle merkezi.

Barimerkezli Jülyen Tarihi. Jülyen Tarihi, Güneş Sisteminin ağırlık merkezine (kütle merkezi) göre Dünya'nın konumundaki farklılıklar için düzeltildi. Gökbilimciler tarafından kullanılır.

Baryonik madde. Atom altı parçacıklardan, kuarklardan, oluşan parçacıklar olan baryonlardan oluşan madde. En tanıdık baryonlar, evrendeki görünür maddenin kütlesinin çoğunu oluşturan protonlar ve nötronlardır. Elektronlar (atomun diğer ana bileşeni) leptonlardır.

Basil. Silindirik veya çubuk benzeri hücre şekline sahip bakteriler.

Başkalaşım sınırı. Bu faylar *litosfer* oluşturmadığı veya yok etmediği için muhafazakar levha sınırı olarak da bilinen başkalaşım fayı veya başkalaşım sınırı, bağıl hareketi ağırlıklı olarak yatay olan bir fay türüdür. En yaygın olanı, iki levhanın birbirinin yanından geçtiği yerdir.

Batma-dalma. Bir tektonik plakanın başka bir tektonik plaka altında hareket ettiği yakınsak sınırlarda gerçekleşen süreç.

Bazalt. Bir gezegenin veya ayın yüzeyinde veya çok yakınında açığa çıkan bazaltik lavların hızlı soğumasından oluşan yaygın bir *ekstrüzyonlu magmatik* (volkanik) kaya.

Baz çiftleri. Spesifik nükleobazlar (azotlu bazlar olarak da adlandırılır) arasında oluşan baz çiftleri, DNA çift sarmalının yapı taşlarıdır ve hem DNA hem de RNA'nın katlanmış yapısına katkıda bulunur. Nükleobazlar, DNA'da timin, adenin, sitozin ve guanindir ve timin, RNA'da urasille yer değiştirir.

Bereketli Hilal. Basra Körfezi'nden günümüzün güney Irak'ına, Suriye'ye, Lübnan'a, Ürdün'e, İsrail'e ve kuzey Mısır'a kadar nispeten verimli ve nemli toprakları içeren hilal şeklindeki bir bölge.

Beta bozunması. Bir nötron bir protona bozunurken elektron kaybetmesini içeren radyoaktif bozunma.

Beyaz cüce. Dejenere cüce olarak da adlandırılan beyaz cüce, çoğunlukla elektron-dejenere maddeden oluşan bir yıldız kalıntısıdır.

Biyoçeşitlilik. Yaşamın çeşitlilik derecesinin bir ölçüsü. Bir üst âlem, biyom veya gezegen içindeki genetik çeşitlilik, ekosistem çeşitliliği veya tür çeşitliliği anlamına gelebilir.

Biyofilm. Tek bir katmanda veya birden çok katmanda bir yüzey üzerinde birbirine yapışmış olarak büyüyen bir grup mikroorganizma.

Biyolojik olarak etkin ışınım. Belirli bir biyolojik süreç için bir etki spektrumuyla çarpılan iki dalga boyu arasındaki bir ışık spektrumunun birleşik değeri.

Biyobelirteç. Bir biyolojik belirteç veya biyobelirteç, genellikle bazı biyolojik durum veya koşulların ölçülebilir bir göstergesine atıfta bulunur.

Biyomineraller. Biyolojik süreçlerle üretilen mineraller.

Biyomineralizasyon. Biyolojik bir yüzeyde minerallerin çökeltilmesi.

Binomial. Bir türün iki terimli adı.

Biyolojik iyileştirme. Karadaki toksik maddeleri kontrol etmek, çıkarmak veya ortadan kaldırmak için organizmaları kullanan bir yöntem.

Biyo-imza gazı. Biyolojik aktiviteden elde edilen bir gaz.

Biyo-uzay. Yaşamın içinde yaşayabileceği, büyüyebileceği veya çoğalabileceği fiziksel ve kimyasal sınırlar (bu gereksinimlerden birine referansla bir biyo-uzay tanımlanmalıdır).

Biyosentez. Yeni moleküllerin biyolojik üretimi veya oluşturulması.

Boltzmann sabiti. Adını Ludwig Boltzmann'dan (1844–1906) alan Boltzmann sabiti (kB veya k), bireysel parçacık seviyesindeki enerjiyi sıcaklıkla ilişkilendiren fiziksel bir sabittir.

Bulaşıcı süngerimsi ensefalopatiler. Semptomları dokularda mikroskobik deliklerin gelişimini içeren prionların neden olduğu nöral doku hastalığı.

Büyük Oksidasyon Olayı. Dünya atmosferinde biyolojik olarak indüklenen oksijen görünümü. Jeolojik, izotopik ve kimyasal kanıtlar, bu büyük çevresel değişikliğin yaklaşık 2,4 milyar yıl önce gerçekleştiğini gösteriyor.

C-değeri paradoksu. Ökaryotik genom boyutu ve organizma karmaşıklığı arasındaki açıklanamayan korelasyon eksikliği. Büyük bir genom, karmaşık bir organizma anlamına gelmez.

Calvin döngüsü. Ototrofik bakterilerde ve fototrofların kloroplastlarında bulunan, karbonun CO_2 şeklinde girdiği ve şeker şeklinde ayrıldığı metabolik bir yol.

Cam. Amorf (kristal olmayan) bir katı materyal.

Chandrasekhar sınırı. Chandrasekhar sınırı, kararlı bir beyaz cüce yıldızın maksimum kütlesidir.

Cins. Canlı ve fosil organizmaların biyolojik sınıflandırılmasında kullanılan taksonomik bir sıralama. Biyolojik sınıflandırma hiyerarşisinde türlerin üstünde ve ailenin altında gelir.

CRISPR (Clustered Regularly Interspersed Short Palindromic Repeats). Bakteri veya arke genomundaki anti viral ajanlar gibi davranan kısa diziler.

Cüce gezegen. Bir gezegen büyüklüğünde bir nesne (gezegensel kütleli bir nesne), ancak bu ne bir gezegen ne de bir Ay ya da başka bir doğal uydudur.

Çarpma erozyonu. Çarpma olaylarıyla gezegen atmosferinin kademeli olarak ortadan kaldırılması.

Çarpma kışı. Bir asteroit çarpmasıyla atmosfere çok miktarda tozun enjekte edilmesinden kaynaklanan feci soğuk ve karanlık bir döneme atıfta bulunmak için kullanılan bir terim.

Çok gezegenli türler. Birden fazla gezegenimside varlığı olan bir tür.

Çoklu-ekstremofil. Birden fazla zorluğun olduğu ortamlarda büyümeye uyarlanmış bir organizma.

Çoklu evren. Birlikte var olan her şeyi içeren sonsuz veya sonlu olası evrenlerin (deneyimlediğimiz evren dâhil) varsayımsal kümesi.

Çöp DNA. Bir organizmanın genomunun hiçbir işlevi olmayan kısımlarını tanımlayan eski bir terim.

Çört. İnce taneli silika bakımından zengin tortul kayaç.

Çubuklu sarmal gökada. Yıldızlardan oluşan merkezi çubuk şeklinde bir yapıya sahip bir tür sarmal gökada. Çubuklar, tüm sarmal gökadaların yaklaşık üçte ikisinde bulunur.

Dağılım filtresi. Bir organizmanın bir yerden başka bir yere göçünü engelleyen fiziksel bir engel.

Darboğaz (evrimsel biyoloji). Belirli bir türde veya grupta harici bir çevresel (örneğin volkanik patlama) veya antropojenik (örneğin avlanma) bir olay nedeniyle hızlı bir nüfus azalması.

DDZA. Dünya Dışı Zekâ Arayışı.

DDZİ. Dünya Dışı Zekâyla İletişim.

Dejenere madde. Dejenere madde, kuantum mekaniksel etkiler tarafından belirlenen bir basınç ve diğer fiziksel özelliklere sahip, serbest, etkileşmeyen parçacıkların bir koleksiyonudur. Maddenin dejenere hali, olağanüstü yüksek yoğunlukta (kompakt yıldızlarda) veya laboratuvarlarda aşırı düşük sıcaklıklarda ortaya çıkar. Elektronlar, nötronlar, protonlar gibi madde parçacıkları için oluşur ve elektron dejenere madde, nötron dejenere madde vb olarak adlandırılır.

Dendrogram. Bir filogenetik ağaç diyagramı.

Denitrifikasyon. Büyük bir heterotrofik fakültatif anaerobik bakteri grubu tarafından gerçekleştirilen mikrobiyal olarak kolaylaştırılmış bir nitrat indirgeme süreci.

Deoksiribonükleik asit (DNA). Azot içeren nükleobazlar ile bir şeker-fosfat omurgasının uzun zincirlerinden oluşan, tüm hücresel yaşamın bilgi kodlayan molekülü.

Dev çarpma modeli. Mars büyüklüğündeki kaya yapısındaki bir cisimle Dünyanın uydusunun oluşumunu bir çarpma olayıyla açıklamaya çalışan bir model.

Devrilme noktası. Belirli sistemlerde kritik bir eşikten geçişin neden olduğu iklim koşullarındaki ani değişiklik.

Dış grup. Kladistik veya filogenetikte, bir dış grup, ilgilenilen diğer organizmaların evrimsel ilişkilerini belirlerken (genellikle uzaktan ilişkili) bir referans grubu olarak hizmet eden bir organizma veya organizmalar grubudur.

Diploid. Birçok hayvan ve bitkide olduğu gibi, her kromozomun iki kopyasına sahip hücreler.

Dipol. Bir elektrik dipol, pozitif ve negatif yüklerin ayrılmasıdır.

Dipol momenti. Bir moleküler dipolün her iki ucundaki yükün büyüklüğü olan net moleküler polaritenin ölçüsü.

Disülfit köprüsü. Genellikle iki tiyol (–C-SH) grubunun bağlanmasıyla elde edilen bir kovalent bağ. Bağlantıya SS bağı da denir. Proteinlerde sistein amino asitleri arasında oluşur.

Diyajenez. Kayaç oluşumu (litifikasyon) sırasında ve sonrasında, metamorfik kayaçların oluşumu için gerekenden daha düşük sıcaklık ve basınçlarda tortulların veya mevcut tortul kayaçların farklı tortul kayaçlara dönüşmesi.

DNA. Deoksiribonükleik asit, genetik bilgiyi depolayan molekül.

DNA giraz. DNA bir sarmal tarafından çözülürken gerilimi azaltan bir enzim.

DNA polimeraz. Tek tek nükleotidleri bir araya getirerek DNA'yı sentezleyen bir enzim.

Doppler Kayması (veya Doppler Etkisi). Kaynağına göre hareket eden bir gözlemci için bir dalganın frekansındaki değişiklik.

Doymamış yağ asitleri. Bir veya daha fazla çift bağ içeren yağ asitleri.

Döküntü. Nehirler gibi tortullarda biriken mineraller.

Drake denklemi. Drake denklemi, galaksideki aktif, iletişimsel Dünya dışı uygarlıkların sayısını tahmin etmek için kullanılan olasılıksal bir argümandır.

Durağan faz. Mikrobiyal büyümenin çok az olduğu veya hiç olmadığı, ancak çok sayıda hücrenin olduğu bir dönem. Durağan faz genellikle üstel bir büyüme aşamasını takip eder ve besinlerin tükenmesinden kaynaklanır.

Düğüm (filogenetikte). Önceden uyumlu bir popülasyonun, genetik olarak izole edilmiş iki alt popülasyona ayrıldığı zaman.

Dünya ışığı. Ayın karanlık tarafında görülebilen, Dünyadan yansıyan ışık.

Dünya'ya Yakın Cisim. Yörüngesi onu Dünya'ya yaklaştıran bir Güneş Sistemi cismi.

Dyson küresi. Bir yıldızı tamamen kapsayan ve dolayısıyla güç çıkışının çoğunu veya tamamını yakalayan varsayımsal bir yapı.

Eğiklik. Bir cismin dönme ekseni ile yörünge ekseni arasındaki açı (bazen eksen eğimi olarak adlandırılır).

Einstein halkası. Daha uzaktaki bir cismin kütleçekimsel merceklenmesinin neden olduğu bir cismin etrafında görülen halka.

Eksantriklik. Astronomik bir cismin yörünge eksantrikliği, başka bir cisim etrafındaki yörüngesinin mükemmel bir daireden ne kadar saptığını belirleyen bir parametredir. Eksantriklik, e, $r_p/r_a = (1-e)/(1+e)$ ilişkileriyle hesaplanabilir; burada r_a, apoapsisteki yarıçaptır (yörüngenin sistemin kütle merkezine olan en uzak mesafesi, bu elipsin odak noktasıdır) ve r_p, periapsis, kütle merkezine en yakın mesafedir.

Eksonlar. Bir genin intronlar çıkarıldıktan sonra mRNA molekülünde kalan kısımları ve dolayısıyla proteine çevrilir.

Ekstremofil. Büyümek için belirli zorlu fiziksel veya kimyasal koşullara gereksinim duyan bir organizma.

Ekstremotolerant. Bazı zorlu koşulları tolere edebilen bir organizma.

Ekstrüzyon. Dünyanın yüzeyinde kristalleşmeyle oluşan bir kayaç. Genellikle ince taneli dokulara ve küçük kristallere sahiptirler. Örneğin, lavdan oluşan bazalt.

Ekzobiyoloji. Genellikle Dünya'nın ötesinde yaşam olasılığının araştırılmasına atıfta bulunan bir terim (artık daha geniş terim olan astrobiyolojinin bir parçası).

Elektron. Elektron (sembol: e^-), negatif elektrik yükü olan atom altı bir parçacıktır.

Elektron kulesi. İndirgeme-oksidasyon reaksiyonlarında (redoks reaksiyonlarında) yer alan yarı reaksiyonların nispi elektron potansiyelini gösteren bir seri.

Elektron volt. Elektron volt (sembol eV; ayrıca elektronvolt olarak da yazılır) yaklaşık $1{,}6 \times 10^{-19}$ J'ye eşit bir enerji birimidir. Tanım olarak, bir elektronun bir düzlem boyunca hareket ettirdiği tek bir elektronun yüküyle kazanılan (veya kaybedilen) enerji miktarıdır. 1V elektrik potansiyel farkı.

Elektrot potansiyeli. Bir kimyasal türün elektron alma ve dolayısıyla indirgenme eğiliminin bir ölçüsü. Volt (V)

veya milivolt (mV) cinsinden ölçülür. Her türün kendine özgü indirgeme potansiyeli vardır.

Elektron taşıma zinciri. Elektronları elektron vericilerinden elektron alıcılarına redoks reaksiyonları yoluyla aktaran bir dizi bileşik.

Emilim spektrumu. Bir atomun elektronlarının yüksek enerji durumundan daha düşük enerji durumuna geçiş yapması nedeniyle yayılan bir kimyasal elementin veya kimyasal bileşiğin elektromanyetik radyasyon frekanslarının spektrumu.

Enantiyomer. Birbirinin ayna görüntüsü olan iki izomerden biri (ayrıca bkz. kiral).

Endospor. Bazı bakteriler tarafından üretilen, hareketsiz, sert ve üremeyen bir yapı.

Endosimbiyoz. Biri diğerinin hücresinin içinde yaşayan iki ortak organizmanın karşılıklı yarar sağlayan birlikte yaşaması.

Entropi. Entropi (S), bir termodinamik sistemin düzenlenebileceği yolların sayısının bir ölçüsüdür. Termodinamiğin ikinci yasasına göre, yalıtılmış bir sistemin entropisi asla azalmaz. Bu tür sistemler kendiliğinden termodinamik dengeye doğru hareket eder.

Enzimler. Yaşamı sürdüren binlerce metabolik süreçten sorumlu biyolojik katalizörler (örneğin proteinler ve ribozimler).

Eon (Devir). Bir jeolojik zaman birimi, örneğin Arkeyan devri.

Epoch (Çağ). Bir jeolojik zaman birimi, örneğin Holosen çağı.

Era (Zaman). Bir jeolojik zaman birimi, örneğin Senozoik zaman.

Etki spektrumu. Spesifik bir biyolojik süreç (örneğin fotosentez, DNA hasarı) için biyolojik etkiye karşı ışığın dalga boyu grafiği, özellikle UV radyasyonunun etkilerini belirtmek için kullanılır.

EXPOSE Tesisi. Organiklerin ve organizmaların uzay ortamına, özellikle UV radyasyon ortamına tepkisini incelemek için Avrupa Uzay Ajansı tarafından Uluslararası Uzay İstasyonunun dışına yerleştirilen bir cihaz.

Fakültatif. Mikroorganizmalara atıfta bulunularak, bir organizmanın belirli bir dizi koşulda büyüyebileceği, ancak bunlara ihtiyaç duymadığı anlamına gelir. Örneğin, oksijen varlığında veya yokluğunda büyüyebilen fakültatif bir anaerobik mikroorganizma. "Zorunlu"yla karşılaştırın, bu belirli koşullar için bir gereklilik anlamına gelir.

Farklılaşma. Daha yoğun malzemenin bir çekirdek ve manto oluşturarak merkeze doğru hareket ettiği bir gezegen gövdesinin farklı bileşenlerinin erime altında ayrılması.

Fasiyes. Belirli bir süreç veya ortamı yansıtan, belirli koşullar altında oluşan belirli kayaç özellikleri.

Faz diyagramı. Fizikokimya, mühendislik, mineraloji ve malzeme bilimindeki bir faz diyagramı, dengede termodinamik olarak farklı fazların oluşabileceği koşulları göstermek için kullanılan bir grafik türüdür.

Felaket çıkış kanalları. Mars'ta, yüzey altı suyunun gezegenin yüzeyine feci bir şekilde salınmasından oluştuğu öne sürülen büyük özellikler.

Feldspat. Feldspatlar ($KAlSi_3O_8$–$NaAlSi_3O_8$–$CaAl_2Si_2O_8$), yerkabuğunun %60'ını oluşturan ve üç boyutlu "çerçeve" yapılar oluşturan bir grup kayaç oluşturan mineraldir. Birçok feldspat bileşimi, üç uç üyenin bileşimi cinsinden ifade edilebilir; sodyum bakımından zengin veya albit ($NaAl$-

Si_3O_8), kalsiyum bakımından zengin veya anortit ($CaAl_2Si_2O_8$) ve potasyum bakımından zengin veya K-feldspat ($KAlSi_3O_8$).

Fenotip. Bir organizmanın fiziksel olarak gözlemlenebilir özellikleri.

Fermantasyon. Şekeri asitlere veya alkollere dönüştüren metabolik bir süreç. Bakteri ve maya dâhil olmak üzere çok çeşitli organizmalarda, aynı zamanda hayvanların oksijene aç kas hücrelerinde de oluşur.

Fermi Paradoksu. Fizikçi Enrico Fermi tarafından ortaya atılan problem, bu yüzden Evrende bu kadar çok yıldız varsa, eski uygarlıklardan gelen uzaylılar tàrafından ziyaret edilmememizin nedeni budur.

Ferrodoksinler. Elektron taşınmasında rol oynayan eski bir demir-kükürt proteinleri ailesi.

Filogenetik. Biyoloji içindeki, evrimsel tarihi yeniden yapılandıran ve organizmalar arasındaki ilişkilerin modellerini inceleyen alan.

Filogenetik ağaç. Organizmalar arasındaki evrimsel ilişkileri veya mesafeleri gösteren bir diyagram.

Filogenetik parantezleme. Mevcut akrabalarının özelliklerini kullanarak soyu tükenmiş organizmaların özelliklerini çıkarmak için bir yöntem.

Filogeni. Bir türün ya da grubun evriminin tarihi, özellikle soy hatları ve geniş gruplar arasındaki ilişkiler açısından.

Fillosilikat. Silikat tetrahedronların tabakalar halinde düzenlendiği bir yapıya sahip bileşikler. Örnekler mika ve killerdir.

Fischer-Tropsch reaksiyonları. Bir karbon monoksit ve hidrojen karışımını hidrokarbonlara dönüştüren bir dizi kimyasal reaksiyon.

Flagellum (çoğulu flagella). Harekete izin veren mikrobiyal uzantılar.

Foraminifer. Foraminiferler (veya kısaca foramlar), genellikle kalsiyum karbonattan yapılan kabukları veya testleri (iç kabuklar için teknik bir terim) olan tek hücreli, çoğunlukla suda yaşayan mikroorganizmalardır.

Formoz reaksiyonu. Formaldehitten şeker oluşumunu içeren kimyasal reaksiyon.

Fosforilasyon. Bir proteine veya başka bir organik moleküle bir fosfat (PO_4^{-3}) grubunun eklenmesi.

Fotik bölge. Fotik bölge, öfotik bölge veya Güneş ışığı bölgesi, fotosentezin gerçekleşmesi için yeterli Güneş ışığına maruz kalan bir su kütlesindeki (örneğin bir göl veya okyanus) suyun derinliğidir.

Foto-ayrışma. Kimyasal bir bileşiğin fotonlar tarafından parçalanma süreci.

Fotoliz. Kimyasal bir bileşiğin fotonlar tarafından parçalandığı bir kimyasal reaksiyon (bkz. foto-ayrışma).

Foto-oksitlenmiş. Elementlerin ışıkla oksidasyonu.

Füzyon kabuğu. Bir göktaşının atmosferden geçişi sırasında cismin dışının ısınması ve ablasyonundan kaynaklanan erimiş dış yüzeyi.

Gabro. Büyük bir grup koyu renkli, genellikle iri taneli, mafik sokulum magmatik kayaçlar. Bazaltla kimyasal olarak aynıdır.

Gama radyasyonu. Son derece yüksek frekanslı radyasyon ve dolayısıyla foton başına yüksek enerji. Gama ışınları iyonlaştırıcı radyasyondur ve bu nedenle biyolojik olarak tehlikelidir.

Gama radyasyonu bozunması. Gama ışınlarının salınmasını içeren bir radyoaktif elementin bozunması.

Gaz hidratları. Klatrat hidratlar (veya gaz klatratlar, gaz hidratlar, klatratlar, hidratlar vb), küçük polar olma-

yan moleküllerin (tipik olarak metan gibi gazlar) veya büyük hidrofobik gruplara sahip polar moleküllerin hidrojen bağlı su moleküllerinin "kafesleri" içinde tutulduğu, fiziksel olarak buza benzeyen kristal su bazlı katılardır.

Gaz tabancası. Küçük mermileri $km.s^{-1}$ hızlarına çıkarmak için bir yöntem. Etki araştırmalarında kullanılır. Bir gaz tabancası, mermiyi bir namlu boyunca ve sonunda katı bir hedefe hızlandırmak için patlayıcılar kullanır.

Geç Ağır Bombardıman. Geç Ağır Bombardıman (genellikle Ay felaketi veya LHB olarak anılır), yaklaşık 4,1-3,8 milyar yıl önce meydana geldiği düşünülen yoğun bir bombardıman dönemidir.

Transit yöntemi. Transit yöntemi, bir gezegen yıldızın önünden geçtiğinde meydana gelen bir yıldızın parlaklığındaki küçük düşüşün gözlemlenmesine dayanır.

Gelgit kilitlemesi. Bir gezegen cismi başka bir cismin yörüngesinde döndüğünde, aynı yüz her zaman etrafında döndüğü cisme bakar. Bazen senkron rotasyon olarak adlandırılır.

Gen. Bir protein oluşturmak için gerekli bilgileri içeren bir DNA dizisi.

Genetik dejenerasyon. Genetik kodun fazlalığı; birden fazla olası kodonun aynı amino asidi kodlayabilmesi.

Genetik şifre. Bir organizmadaki genetik bilginin tam tamamlayıcısı.

Genotip. Bir organizmanın genetik yapısı.

Geride kalan taksonlar. Yok oluştan kurtulan taksonlar.

Gerileme hareketi. İlerleme hareketinin tersi.

Germ teorisi. Hastalıkların mikroorganizmalardan kaynaklanabileceği fikri, şimdi bir gerçek olarak kabul edildi, ancak ancak on sekizinci yüzyılda mikrobiyolojinin yeni keşifleriyle ikna edici bir şekilde gösterildi.

Gezegen. Kendi kütleçekimi tarafından yuvarlanacak kadar büyük, termonükleer füzyonu başlatmak için yeterince büyük olmayan ve komşu *gezegen öncülü* bölgelerini temizlemiş olan bir yıldızın veya yıldız kalıntısının yörüngesinde dönen astronomik bir cisim.

Gezegensel embriyolar. Gezegenleri oluşturmak üzere bir araya gelen bir ön gezegensel diskteki büyük materyal birikimleri (ayrıca bkz. *gezegen öncülü*).

Gezegen adası biyocoğrafyası. Gezegenlerin gezegenler arası yaşam aktarımı (bazen *panspermia* olarak adlandırılır) açısından biyocoğrafik olarak izole edilmiş adalar olup olmadığını araştıran gezegen bilimleri alanı.

Gezegen koruması. Yaşamın başka bir gezegen gövdesine aktarılmasını (ileri kontaminasyon) veya Dünya dışı organizmalarla kirlenmesini (geri kontaminasyon) önlemeye ilişkin protokoller.

Gezegen göçü. Bir gezegenin veya başka bir yıldız uydusunun yörüngesinin, gezegenlerle veya bir gaz diskiyle etkileşimi yoluyla modifikasyonu.

Gezegen öncülü. *Ön gezegensel diskte* bulunan ve kütleçekim etkisi altında birleşerek *ön gezegenleri* oluşturan kilometre büyüklüğündeki gaz ve toz kütleleri.

Gibbs serbest enerjisi. İş yapmak için kullanılabilecek bir kimyasal reaksiyonla ilişkili enerji.

Glikoliz. Glikozu piruvata dönüştüren metabolik yolak.

Glikoproteinler. Kendilerine kovalent olarak bağlı şekerli proteinler.

Goldilocks Bölgesi. Yaşanabilir bölge

için kullanılan bir konuşma dili terimi. Gram boyama. Bakterileri ve arkeleri belirli bir boyayla boyanma eğilimlerine göre sınıflandırmak için bir yöntem. Gram negatif ve pozitif bakterileri ayırt etmek için kullanılır.

Göktaşı. Bir göktaşı, asteroitler veya kuyruklu yıldızlar gibi kaynaklardan gelen, uzaydan kaynaklanan ve Dünya'nın yüzeyiyle olan etkisinden kurtulan katı bir enkaz parçasıdır.

Granit. Dokusu kabaca taneli olan yaygın bir felsik sokulum magmatik kayaç türü. Silika açısından zengindir ve düşük konsantrasyonlarda Fe ve Mg içerir. Kıtaların ana bileşenlerinden biridir.

Grafit. Tamamen karbon atomlarından oluşan katmanlı düzlemsel bir yapıya sahip en kararlı karbon formu.

Gray. Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) bir iyonlaştırıcı radyasyon dozu birimi. Soğurulan dozun bir ölçüsüdür ve 1 kg madde tarafından bir joule radyasyon enerjisinin soğurulması olarak tanımlanır.

Günberi. Güneşe en yakın gezegenin yörüngesindeki nokta.

Güneş ışınımı. Belirli bir zaman periyodu boyunca belirli bir yüzey alanına kümülatif Güneş radyasyonu girdisi.

Güneş lekesi. Güneşin veya diğer yıldızların fotosferinde çevreleyen bölgelere kıyasla gözle görülür şekilde karanlık noktalar olarak görünen geçici olaylar.

Güneş Parçacık Olayları. Güneş tarafından yayılan parçacıkların (çoğunlukla protonlar) bir Güneş patlaması sırasında Güneşe yakın bir yerde veya koronal kütle püskürmeleriyle bağlantılı şoklarla gezegenler arası uzayda çok yüksek enerjilere hızlanmasıyla oluşur.

Güneş rüzgârı. Güneşin üst atmosferinden salınan, tipik olarak esas olarak 10^6 ile 10^8 eV arasında enerjiye sahip protonlar ve helyum çekirdekleri içeren bir plazma akışı.

Güneş sabiti. Akı yoğunluğunun bir ölçüsü olan Güneş sabiti, bir astronomik birim uzaklıkta, ışınlara dik bir düzlemde meydana gelen birim alan başına gelen Güneş elektromanyetik radyasyon miktarıdır.

Günöte. Güneşe en uzak gezegenin yörüngesindeki nokta.

Habitat. Bir organizmanın yaşadığı fiziksel bir alan.

Hâl denklemi. Belirli bir dizi fiziksel koşul altında maddenin durumunu tanımlayan bir termodinamik denklem.

Halofil. Büyümek için yüksek tuz konsantrasyonları gerektiren bir organizma.

Haploid. Her kromozomun bir kopyasına sahip hücreler.

Helikaz. DNA çift sarmalını çözen bir enzim.

Hertzsprung-Russell diyagramı. Hertzsprung–Russell diyagramı, yıldızların mutlak büyüklükleri veya parlaklıkları ile tayf türleri veya sınıflandırmaları ve etkin sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi gösteren bir yıldız dağılım grafiğidir.

Hesperiyan Dönemi. Mars tarihinin yaklaşık 3,7 milyar yıl öncesinden yaklaşık 3,0 milyar yıl öncesine kadar olan dönemi.

Heterosistler. Havadan nitrojeni sabitleyebilen özel hücreler. Heterosistler, nitrojen açlığı dönemlerinde bazı siyanobakteriler tarafından oluşturulur.

Heterotroflar. Organik karbonu karbon kaynağı olarak kullanan organizmalar.

Hidrodinamik kaçış. Hidrodinamik kaçış, daha hafif atomlarla çok sayıda çarpışma yoluyla bir gezegen atmos-

ferinin daha ağır atomlarının kaçmasına yol açabilen bir termal atmosferik kaçış mekanizmasını ifade eder.

Hidrojen bağı. Bir hidrojen bağı, hidrojenin oksijen, nitrojen veya flor gibi oldukça elektronegatif bir atoma (elektronları çekme eğilimi yüksek olan) bağlı olduğu polar moleküller arasındaki çekici etkileşimdir.

Hidrofilik. Su için güçlü bir afiniteye sahip olmak.

Hidrofobik. Sudan itilme eğilimi olan.

Hidrotermal. Isıtılmış sulu çözeltilerin etkisi.

Hipertermofil. Büyümek için 85 °C'den daha yüksek bir sıcaklığa ihtiyaç duyan organizmalar.

Homoloji (filogenetikte). Organizmalardaki ortak atadan kaynaklanan benzerlikler.

Homoplaziler. Yakınsak evrim nedeniyle iki veya daha fazla takson tarafından paylaşılan bir özellik (genetik, morfolojik vb). Alternatif bir terim olarak analoji de kullanılır.

Hopanoidler. Hopanın beş halkalı (pentasiklik) kimyasal yapısına dayanan doğal bileşikler.

Hormonlar. Büyüme, fizyoloji ve organ fonksiyonunun birçok yönünü düzenleyebilen çok hücreli organizmalardaki bir biyokimyasallar sınıfı.

Huroniyen. Huroniyen buzullaşması (veya Makganyene buzullaşması), Paleoproterozoyik çağın Siderian ve Rhyacian dönemlerinde 2,4 ila 2,1 milyar yıl arasında sürdü. Huroniyen buzullaşması, Büyük Oksidasyon Olayından sonra gerçekleşti.

Hücre dışı polisakkarit. Organizmalar tarafından hücre duvarlarının içinde veya dışında üretilen uzun zincirli şekerler.

Hücre farklılaşması. Çok hücreli bir organizmanın veya biyofilmin büyümesi sırasında hücre gruplarının özelleştiği süreç.

Iraksak Sınır. Birbirinden uzaklaşan iki tektonik plaka arasında var olan doğrusal bir özellik. Kıtalar içindeki farklı sınırlar, yarık vadiler üretir. En aktif ıraksak levha sınırları okyanus levhaları arasında meydana gelir ve okyanus ortası sırtlar olarak bulunur.

Isı şok proteinleri. Özellikle yüksek sıcaklıklara stres tepkisinde yer alan proteinler.

Issız habitat. Bilinen en az bir organizmanın aktivitesini destekleyebilen, ancak böyle bir organizma içermeyen bir ortam.

Işık yılı. Astronomide kullanılan, ışığın bir yılda aldığı yola eşit uzunluk birimi.

İdeal roket denklemi. Bir roketin temel prensibine göre hareket eden araçların hareketini tanımlayan ilişki.

İkili yıldız. İki yıldız içeren bir yıldız sistemi.

İkincil geçiş (veya ikincil tutulma). Bir gezegenin yansıyan ışığının gözlemi yıldız tarafından engellendiğinde (hem yıldız hem de gezegen ışığını içeren sinyalden yıldız ışığının çıkarılmasını sağlamanın bir yolu).

İkiye bölünerek çoğalma. Hücrelerin bölünerek genetik olarak özdeş iki "yavru" hücre oluşturduğu süreç.

İlerleme yönü. Gökyüzünün veya bir gezegenin kuzey kutbundan bakıldığında saat yönünün tersine yörüngesinde dönme veya hareket yönüne sahip bir gezegenimsi.

İntronlar. Bir genin kopyalanan, ancak protein sentezinden önce mRNA'dan çıkarılan kısımları.

İşlevsel yok oluş. İşlevsel yok oluş, bir organizmanın popülasyonu artık türü sürdürmek için uygun olmadığında meydana gelir.

İyon. Toplam elektron sayısının toplam proton sayısına eşit olmadığı, atoma net pozitif veya negatif elektrik yükü veren bir atom veya molekül.

İyonik bağ. Zıt yüklü iyonlar arasındaki elektrostatik çekimi içeren bir tür kimyasal bağ. Bağ, elektronların transferini içerir.

İyonlaştırıcı radyasyon. Atomlardan veya moleküllerden elektronları serbest bırakmak için yeterli enerjiye sahip olan ve böylece onları iyonize eden radyasyon.

İzokron tarihleme. İzokron tarihleme yaygın bir radyometrik tarihleme tekniğidir ve belirli olayları tarihlendirmek için uygulanır. Bu teknik, yavru elemanın, ana nüklidin bozunduğu yavru izotop dışında en az bir kararlı izotopu varsa uygulanabilir.

İzomer. Aynı moleküler formüle sahip ancak farklı kimyasal yapılara sahip moleküller.

İzomerizasyon. Bir molekülün, tamamen aynı atomlara sahip başka bir moleküle dönüşmesi, ancak atomların farklı bir düzenlemeye sahip olması süreci.

İzotop. İzotoplar, belirli bir kimyasal elementin varyantlarıdır, öyle ki belirli bir elementin tüm izotopları her atomda aynı sayıda protona sahipken, nötron sayıları farklıdır.

İzotopik parçalama. Belirli bir izotopta tercihli zenginleştirme.

Jean kütlesi. Kütleçekim kuvvetini dengelemek için yeterli gaz basıncı olmadığında ve çöktüğünde bir gaz bulutunun kritik kütlesi

Jarosit. $KFe^{+3}_3(OH)_6(SO_4)_2$ kimyasal formülüne sahip potasyum ve demirden oluşan bazik bir sülfat. Bu sülfat minerali, demir sülfürlerin oksidasyonuyla cevher yataklarında oluşur.

Jeolojik temsilci. İlgilenilen bir değişkeni çıkarmak için kullanılan ölçülen jeolojik değişken.

Jeotermal. Dünya'nın iç kısmından gelen ısı.

Jeotermal gradyan. Dünya'nın derinliklerine doğru gidildikçe ısıdaki değişim (artış).

Jülyen Tarihi. Jülyen gün sayımında tam bir Güneş gününe atanan tam sayıdır ve Jülyen gün numarası 0, MÖ 1 Ocak 4713'te öğlen (Greenwich Ortalama Saati) başlayan güne atanır. Herhangi bir anın Jülyen Tarihi, Greenwich Ortalama Saati'nde bir önceki öğlen için Jülyen gün sayısı artı o andan itibaren günün kesridir. Jülyen Tarihleri, ondalık kesir eklenmiş bir Jülyen gün sayısı olarak ifade edilir. Örneğin, 00:30:000.0 UT 1 Ocak 2013 için Jülyen Tarihi 2 456 293,520833'tür.

Kabuk. Farklılaşmaya uğrayan kayalık bir gezegen gövdesinin katı kabuğu.

Kabuk ikiliği (Mars). Mars'ın jeolojisindeki kuzey ovaları ve güneydeki daha eski kraterli araziler arasındaki bölünme.

Kaçak sera etkisi. Bkz. *Sera etkisi*.

Kaçış hızı. Devasa bir cismin kütleçekimsel çekiminden "kurtulmak" için gereken hız.

Kahverengi cüce. Anakol yıldızlarının aksine, çekirdeklerinde hidrojen füzyon reaksiyonlarını sürdüremeyecek kadar küçük kütleli yıldız altı nesneler. En ağır gaz devleri ile en hafif yıldızlar arasındaki kütle aralığını kaplarlar ve üst sınırı 75 ila 80 Jüpiter kütlesi civarındadır.

Kambriyen. Fanerozoyik'in ilk jeolojik dönemi (541,0 ± 1,0 ila 485,4 ± 1,9 milyon yıl önce). Çok hücreli hayvanların ortaya çıkışını içerir.

Kaos arazisi. Kaos arazisi (veya kaotik arazi), sırtlar, çatlaklar ve ovalar gibi özelliklerin karışık ve iç içe geç-

miş göründüğü gezegensel bir yüzey alanıdır.

Kaotropiklik. Bir maddenin bir molekülde düzensizliğe neden olma eğilimi.

Kaplan çizgileri. Enceladus'un kaplan çizgileri, Satürn uydusunun güney kutup bölgesinde neredeyse paralel, doğrusal çöküntülerden oluşur.

Kapsid. Bir virüs parçacığının protein kabuğu.

Kar çizgisi. Astronomi veya gezegen biliminde, don çizgisi veya buz çizgisi olarak da bilinen kar çizgisi, ön gezegensel diskte, su, amonyak ve metan gibi hidrojen bileşiklerinin katı buza yoğunlaşması için yeterince soğuk olduğu merkezi ön yıldızdan belirli bir mesafeyi ifade eder.

Kara cisim. Frekans veya geliş açısı ne olursa olsun, gelen tüm elektromanyetik radyasyonu emen idealleştirilmiş bir fiziksel beden.

Kara cisim radyasyonu. Çevresiyle termodinamik dengede olan bir cismin içindeki veya çevresindeki elektromanyetik radyasyon veya sabit, düzgün sıcaklıkta tutulan bir kara cisim (opak ve yansıtıcı olmayan cisim) tarafından yayılan elektromanyetik radyasyon.

Kara enerji. Tüm uzaya nüfuz eden ve evrenin genişlemesini hızlandırma eğiliminde olan varsayımsal bir enerji biçimi.

Kara madde. Bu tür bir kütlenin görülemediği yerde kütlenin sonucu gibi görünen astrofiziksel etkileri hesaba kattığı varsayılan bir madde türü.

Kararlı izotop. Radyoaktif olabilen veya olmayabilen, ancak radyoaktif ise yarı ömürleri ölçülemeyecek kadar uzun olan kimyasal izotoplar.

Karbonhidratlar. Karbon (C), hidrojen (H) ve oksijen (O) atomlarından oluşan, genellikle hidrojen:oksijen atomu oranı 2:1 (suda olduğu gibi) olan bir molekül veya makromolekül.

Karbonlu kondrit. Kondrüller ve organik bileşikler içeren taşlı bir göktaşı. Grup, bileşim olarak orijinal Güneş nebulasıyla benzer olduğuna inanılan, bilinen en eski göktaşlarından bazılarını içerir.

Karbonat-silikat döngüsü. Gezegen sıcaklığını düzenleyen geri bildirim süreci.

Karbon tarihleme. Nesneleri doğru bir şekilde tarihlendirmek için karbon-14'ün nitrojen-14'e (5730 yıllık bir yarı ömre sahip) bozunmasının kullanılması.

Karbonatlaşma. Yüksek konsantrasyonlarda çözünmüş CO_2 içeren sıvıları içeren su-kaya etkileşimleri yoluyla çeşitli karbonat minerallerinin oluşumu.

Karboksidotrofi. Mikroorganizmalar tarafından elektron vericisi olarak karbon monoksitin kullanılması.

Karboksilik asit. Bir karboksil grubu (C(O)OH) içeren organik bir bileşik. Uzun zincirli karboksilik asitlere yağ asitleri de denir.

Kardaşev ölçeği. Bir uygarlığın kullanabileceği enerji miktarına dayalı olarak, bir uygarlığın teknolojik ilerleme düzeyini ölçme yöntemi.

Kardeş taksonlar. Filogenetik ağaçtaki bir grubun en yakın akrabaları.

Karotenoidler. Reaktif oksijen türlerinin söndürülmesi, UV taraması ve diğer işlevlerde yer alan bir uzun zincirli molekül sınıfı. Birçoğu mikroorganizmalara renk verir.

Kartopu Dünya. Dünyanın tamamının veya önemli bölümlerinin buz tabakalarıyla kaplandığı dönemler.

Katyonlar. Pozitif yüklü iyonlar.

Kayaç. Bir kayaç, bir veya daha fazla mineral veya bir camın doğal olarak oluşan katı bir toplamıdır.

Kayaç döngüsü. Jeolojide, üç ana kaya türü arasında jeolojik zaman içindeki dinamik geçişleri tanımlayan temel bir kavram: tortul, metamorfik ve magmatik.

Kemiozmoz. Kemiozmoz, iyonların seçici geçirgen bir zar boyunca elektrokimyasal gradyanlarından aşağı doğru hareketidir. Daha spesifik olarak, hücresel solunum sırasında hidrojen iyonlarının bir zar boyunca hareketiyle ATP üretimiyle ilgilidir.

Kemolitotrof. Kemoototrof'a bakın.

Kemoototroflar. Enerji üretmek için inorganik elektron vericilerini kullanan bir organizmadır.

Kemotaksis. Tek hücreli organizmaların kimyasal uyaranlara tepki olarak hareketi.

Kendiliğinden oluşum. Canlı organizmaların cansız maddelerden geliştiği varsayımsal süreç. Genel olarak modası geçmiş olarak kabul edilir, ancak yaşam ilk ortaya çıktığında en az bir kez gerçekleşmiş olmalıdır.

Keratin. Bir lifli protein ailesi.

Kerojen. Sedimanter kayaçlar veya meteoritler gibi tanımlanmamış karmaşık organik karbon bileşikleri için genel bir terim.

Kırmızı dev. Bir helyum çekirdeği ve bir hidrojen yakan kabukla karakterize edilen, yıldız evriminin geç bir aşamasında düşük veya orta kütleli parlak bir dev yıldız. Kırmızı Dev Dal yıldızları (RGB yıldızları) olarak da adlandırılır.

Kırmızıya kayma. Kırmızıya kayma, bir nesneden gelen ışık veya diğer elektromanyetik radyasyon dalga boyunda arttığında veya spektrumun kırmızı ucuna kaydırıldığında meydana gelir.

Kırmızı kenar. Elektromanyetik spektrumun yakın kızıl-altı aralığında bitki örtüsünün veya diğer klorofil içeren organizmaların yansımasında büyük bir artış olan bölge.

Kısmi basınç. Bir gaz karışımında tek bir gazın uyguladığı basınç.

Kısmi erime. Kısmi erime, bir katının yalnızca bir kısmı eritildiğinde meydana gelir. Birkaç farklı mineral içeren bir kaya gibi karışık maddeler için bu eriyik katının yığın bileşiminden farklı olabilir. Birkaç farklı mineralden oluşan kayalarda, bazı mineraller diğerlerinden daha düşük sıcaklıklarda erir ve bu kısmi erimeye neden olur.

Kıta sahanlığı. Bir kıtadan uzanan ve raf denizi olarak bilinen nispeten sığ su alanıyla sonuçlanan bir su altı kara kütlesi.

Kil. Bir veya daha fazla kil mineralini eser miktarda metal oksit ve organik maddeyle birleştiren ince taneli malzeme için genel bir terim. Killer bir çeşit fillosilikattır.

Kinon. Çift sayıdaki –CH= gruplarının –C(=O)– gruplarına dönüştürülmesi ve çift bağların gerekli herhangi bir yeniden düzenlenmesiyle aromatik bileşiklerden türetilen bir organik bileşik sınıfı.

Kiral. Sol veya sağ-ellilik. Üst üste bindirilemeyen bir ayna görüntüsüne sahip bir molekül türü (daha teknik olarak optik olarak aktif iki izomeri vardır).

Kitlesel yok oluş. Geniş bir coğrafi alanda kısa bir jeolojik zaman periyodundaki nesil tükenmesi oranında önemli bir artış.

Klad. Bir klad (monofilum, diğer bir deyişle 'monofiletik'), bir atadan ve onun tüm soyundan oluşan bir gruptur.

Klatratlar. Molekülleri yakalayan veya içeren bir kafesten oluşan kimyasal bir madde. Metan gazı hidratlarına bakın.

Klorofil. Siyanobakterilerde, alg ve bitkilerin kloroplastlarında bulunan yeşil pigment. Fotosentezde Güneş ışığının yakalanmasında görev alır.

Koaservatlar. Çevreleyen bir sıvıdan gelen hidrofobik kuvvetler tarafından bir arada tutulan küresel bir organik molekül damlacığı. Bazen erken hücreleri tanımlamak için kullanılır.

Kodlama yapmayan DNA. Protein kodlamayan DNA dizileri.

Kodon. Mesajcı RNA'da belirli bir amino asidi kodlayan üç nükleotid dizisi.

Koenzim. Bir enzimin etkisini artıran bir madde.

Kok. Küresel hücre şekline sahip mikroorganizmalar.

Komatitler. Nadir ultramafik magmatik kayaçlar. Mantonun daha sıcak olduğu varsayıldığında, Dünya tarihinin başlarında daha boldu.

Kondrüller. Kondritlerde bulunan yuvarlak taneler. Kondrüller, yığılma sırasında ana asteroitlerine bağlanmadan önce uzayda erimiş veya kısmen erimiş damlacıklar halinde oluşur.

Konjugasyon. Genetik materyalin (tipik olarak bir plazmit) bakteri hücreleri arasında doğrudan hücreden hücreye teması veya iki hücre arasındaki pilus bağlantısı yoluyla aktarımı.

Koronagraf. Yıldız ışığının kafa karıştırıcı etkileri olmadan gezegenlerden ışık elde etmek için bir gölge veya benzeri bir cihaz kullanarak Güneş ışığını engelleme yöntemi.

Koronal kütle çıkarma. Güneş koronasının üzerinde yükselen veya uzaya salınan güneş rüzgârı ve manyetik alanların büyük patlaması

Kovalent bağlar. Atomlar arasında elektron çiftlerinin paylaşılmasını içeren kimyasal bir bağ.

Kozmik Arkaplan Radyasyonu. Kozmik mikrodalga arka planı, kozmolojinin Büyük Patlamasından arta kalan olduğu düşünülen termal radyasyondur.

Kozmik ışınlar. Güneş Sistemi dışından kaynaklanan yüksek enerjili radyasyon. Atmosferle çarpıştıklarında ve bazen yüzeye ulaştıklarında ikincil parçacık yağmurları üretirler. Temel olarak yüksek enerjili protonlardan ve tipik olarak 10^9 ile 10^{15} eV arasında oldukça değişken enerjilere sahip atom çekirdeklerinden oluşurlar.

Krater yaşı tayini. Etkilerin jeolojik zaman boyunca sabit bir oranda meydana geldiği varsayımına dayanan, kraterlerin sayısını ve dağılımını sayarak gezegen yüzey özelliklerinin yaşını tahmin etme yöntemi.

Kraton. Kıtasal litosferin eski ve kararlı bir parçası. Kıtaların birleşme ve riftleşme döngülerinden sağ çıktıklarından, genellikle tektonik plakaların iç kısımlarında bulunurlar.

Krebs döngüsü. Krebs döngüsü (veya trikarboksilik asit döngüsü veya sitrik asit döngüsü), karbonhidratların, yağların ve proteinlerin metabolizmasından CO_2 üretilmesiyle ilgili hücresel solunumun bir parçasıdır. Enerji üretmek için kullanılan bir dizi kimyasal reaksiyondur.

Kritik nokta. Kritik durum olarak da bilinen kritik nokta, faz sınırlarının olmadığı koşulların (sıcaklığın, basıncın veya bileşimin belirli değerleri gibi) olduğu noktadır.

Kriyokonit delikleri. Buz tabakalarının veya buzulların yüzeyinde genellikle su ve mikrobiyal topluluklar içeren girintiler veya delikler.

Kriyosfer. Bir gezegenin donmuş bölgesi.

Kriyovolkan. Bir kriyovolkan (halk dilinde buz yanardağı olarak bilinir), erimiş kaya yerine su, amonyak veya metan gibi uçucu maddeleri püskürten bir yanardağdır.

Kromozomlar. Birçok gen içeren tek bir uzun DNA parçası. Kromozomlar sarmal şekillerde paketlenebilir veya paketlenmemiş ve gevşek bir şekilde dairesel kalabilir.

Krossing-over (genetik). Mayoz bölünme sırasında birbirini tamamlayan iki kromozom arasında genetik materyal değişimi.

Kuanta. Kuantumun çoğulu. Bir etkileşimde yer alan, özellikle ışıkla ilgili olarak kullanılan herhangi bir fiziksel varlığın minimum miktarı.

Kuark. Temel bir parçacık ve maddenin temel bir bileşeni.

Kuasar. Evrendeki uzak nesneler. Onlar bizim galaksimizden görülebilecek en uzak nesnelerdir. Kuasarlar son derece parlak enerji ve ışık kütleleridir. Kuasar adı, yıldız benzeri radyo kaynağı veya yıldız benzeri nesnenin kısaltmasıdır.

Kuvars. Feldspattan sonra Dünya'nın kıtasal kabuğunda en bol bulunan ikinci mineraldir. Sürekli bir SiO_4 tetrahedra çerçevesinden oluşur, her oksijen iki tetrahedra arasında paylaşılır ve genel bir SiO_2 (silika) formülü verir.

Kuiper Kuşağı. Bazen Edgeworth-Kuiper kuşağı olarak da adlandırılan Kuiper kuşağı, Güneş Sisteminin gezegenlerin ötesinde, Neptün'ün yörüngesinden (30 AB'de) Güneşten yaklaşık 50 AB'ye kadar uzanan bir bölgesidir. Erken Güneş Sistemi oluşumundan birçok küçük cisimden oluşur.

Kurtarma aralığı. Bir yok oluşun ardından çeşitliliğin yeniden canlandığı dönem.

Kuyruklu yıldız. Küçük buzlu Güneş Sistemi gövdeleri. Kuyruklu yıldızlar, merkezi çekirdeklerini çevreleyen geniş, kütleçekimsel olarak bağlanmamış bir atmosferin varlığıyla asteroitlerden ayırt edilir. Kısa dönemli kuyruklu yıldızlar Kuiper Kuşağından kaynaklanır. Uzun periyotlu kuyruklu yıldızların Oort Bulutundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kütle spektrometrisi. Bir materyal örneğini oluşturan atomların veya moleküllerin kütlelerinin spektrumlarını üreten analitik bir teknik.

Kütleden bağımsız parçalama. Ayırma miktarının izotopların kütlelerindeki farkla orantılı olarak ölçeklenmediği, izotopları ayırmaya yarayan herhangi bir kimyasal veya fiziksel işlem.

Kütleye bağımlı parçalama. İzotopları ayırmaya yarayan, ayırma miktarının izotopların kütlelerindeki farkla orantılı olarak ölçeklendiği herhangi bir kimyasal veya fiziksel işlem.

Lag fazı. Kolonizasyondan hemen sonra bir hücre popülasyonunun ilk büyüme aşaması. Lag fazı genellikle çok düşük veya saptanamayan büyüme oranlarıyla karakterize edilir.

Levha silikatlar. İki boyutlu levha yapıları oluşturan silikatlar.

Levha tektoniği. Dünya'nın litosferinin büyük ölçekli hareketini açıklayan bir teori.

Lignin. Monolignoller olarak bilinen aromatik alkollerin karmaşık bir polimeri. En yaygın olarak ahşapta bulunur ve bitkilerin ve bazı alglerin ikincil hücre duvarlarının önemli bir parçasıdır.

Liken. Bir mantar (mikobiyont) ve bir fotosentetik ortaktan (fotobiyont veya fikobiyont) oluşan ve simbiyotik (birbirine bağımlı) bir ilişki içinde birlikte büyüyen bir organizma.

Lipopolisakkaritler. Lipid ve polisakkaritten oluşan büyük moleküller. Gram negatif bakterilerin hücre duvarlarında bulunurlar.

Lipoproteinler. Hem proteinleri hem de lipidleri içeren bir biyokimyasal yapı.

Lipoteikoik asit. Lipidlere kovalent olarak bağlanan teikoik asitler. Gram pozitif bakterilerin hücre duvarlarında bulunurlar.

Litifiye. Kayaca dönüşmüş.

Litosfer. Kayalık bir gezegenin en dıştaki katı kabuğu.

Litostatik basınç. Kayacın uyguladığı basınç.

Liziz. Bir hücrenin parçalanması ve patlaması sonucu hücre ölümü.

Lizojeni. Yabancı DNA'nın konak DNA'ya dâhil edilmesiyle çoğaltılması.

Lyman-α. Bazen Ly-α çizgisi olarak yazılır, elektron n = 2 yörüngesinden n = 1 yörüngesine düştüğünde yayılan hidrojenin veya daha genel olarak tek elektronlu iyonların spektral bir çizgisidir. Hidrojende dalga boyu, elektromanyetik spektrumun ultraviyole bölgesine karşılık gelen 1215,67 Å (121,567 nm)'dir. Bu tür radyasyonun, örneğin belirli galaksilerden yayıldığı gözlemlenir.

Mafik. Magnezyum ve demir açısından zengin bir silikat minerali veya kayacı. Terim, 'magnezyum' ve 'ferrik' kelimelerinin bir birleşimidir.

Magma. Dünya yüzeyinin altında bulunan erimiş veya yarı erimiş kayaç, uçucu ve katı karışımı.

Magmatik. Magma veya lavın soğuması ve katılaşmasıyla magmatik kayaç oluşur.

Makro moleküller. Büyük moleküller.

Maksimum olasılık. Maksimum olasılık yöntemi olarak da adlandırılan maksimum olabilirlik, bilinen olabilirlik dağılımını maksimum yapan (filogenetikte kullanılır) belirli bir istatistik için bir veya daha fazla parametrenin değerini bulma yöntemidir.

Maksimum tutumluluk. Gerekli toplam evrimsel adım sayısını en aza indirerek bir filogenetik ağaç çıkaran karakter tabanlı bir yöntem.

Manto. *Parklulaşma* geçirecek kadar büyük bir kayalık gezegenin veya doğal uydunun kabuğu ile dış çekirdeği arasındaki katman.

Manyetit. Kimyasal formülü Fe_3O_4 olan bir manyetik mineral demir oksit.

Manyetosfer. Astronomik bir cismin yakınındaki, yüklü parçacıkların yollarının o cismin manyetik alanı tarafından kontrol edildiği uzay alanı.

Mayoz. Ökaryotlarda eşeyli üremeye özgü hücre bölünmesi süreci. Mitozdan farklı olarak mayoz, çoğu hayvan hücresi için iki set (*diploid*) yerine, her biri genetik materyalin tam tamamlayıcısının yarısını, yani bir kromozom seti içeren iki "gamet" üretir. Bunlara *haploid* hücreler denir.

Mekansal çözünürlük. Bir teleskopun çözme gücü, λ/D olarak verilir; burada D, teleskopun açıklığıdır (ana aynasının veya merceğin çapıdır) ve λ, gözlem için kullanılan dalga boyudur.

Merkez tepe. Bir çarpma krateri içindeki geri tepme merkezi yükselme.

Mesajcı RNA (mRNA). DNA'dan proteinlerin sentezlendiği ribozoma genetik bilginin tamamlayıcı bir kopyasını taşıyan RNA molekülleri.

Metabolizma. Canlı organizmaların hücreleri içinde yaşamı sürdüren kimyasal reaksiyonlar kümesi.

Metallik. Astronomide, bir nesnenin metalikliği, maddesinin hidrojen ve helyum dışındaki kimyasal elementlerden oluşan oranıdır.

Metamorfik. Metamorfik kayaçlar, metamorfizm adı verilen bir süreç sonucu mevcut kayaç türlerinin dönüşümünden ortaya çıkar.

Metamorfizm. Metamorfizm, minerallerin veya jeolojik dokunun değişmesidir.

Metan gazı hidratları. Klatrat hidratlar (veya gaz klatratlar, *gaz hidrat-*

lar, klatratlar, hidratlar vb), metanın hidrojen bağlı su moleküllerinin "kafesleri" içinde tutulduğu fiziksel olarak buza benzeyen kristal su bazlı katılardır.

Metanojenez. Biyolojik metan üretim süreci, örneğin CO_2 ve H_2 kullanılarak mikrobiyal enerji üretimi sırasında metan üretimi.

Metanojenler. Metan üreten mikroorganizmalar.

Metanotroflar. Metanı metabolize eden organizmalar.

Metasomatizm. Bir mineralin, örneğin hidrotermal sıvılar tarafından kimyasal olarak değiştirildiği süreç.

Metilotroplar. Tek karbon atomlu karbon bileşiklerini metabolize eden organizmalar (örneğin metan, metanol).

Mezofil. 20 ile 45 °C arasındaki sıcaklıklarda büyümesi gereken bir organizma.

Mikrobiyal tabaka. Tabaka benzeri makroskopik bir yapı oluşturan kalın bir mikroorganizma topluluğu.

Mikrofosiller. Mikroskobik fosiller.

Mikron. Bir mikrometre. Milimetrenin binde birine, metrenin milyonda birine eşittir. µm sembolüyle gösterilir.

Mil başına (binde). Genellikle izotopik parçaların gösteriminde kullanılır ve ‰ sembolüyle gösterilir.

Mineral. Oda sıcaklığında katı ve kararlı, kimyasal bir formülle temsil edilebilen, genellikle abiyojenik ve ayrı bir düzenli atomik yapıya sahip, doğal olarak oluşan bir madde.

Mitokondri. Ökaryot hücrelerde bulunan bir organel. Diğer işlevlerin yanı sıra, aerobik solunum yoluyla adenozin trifosfat (ATP) üretiminden sorumludur.

Mitoz. Ökaryotik hücrelerin bölünerek genetik olarak özdeş iki "yavru" hücre oluşturduğu süreç.

Mol. 12 g saf ^{12}C'deki atom sayısı kadar temel birim (örneğin atomlar, moleküller, iyonlar, elektronlar) içeren bir kimyasal maddenin miktarını ifade eden bir ölçü birimi. Bu, maddenin $6{,}022 \times 10^{23}$ temel birim değerine sahip olan Avogadro sabitine karşılık gelir.

Moleküler saat. Biyomoleküllerdeki değişikliklerin, evrimsel soylardaki farklılaşma zamanlarını çıkarmak için kullanılması.

Moleküler sistematiği. Hem geçmişteki hem de günümüzdeki canlı formlarının çeşitlenmesinin ve canlılar arasındaki ilişkilerin zaman içinde genetik veya diğer moleküler bilgileri kullanarak incelenmesi.

Monofiletik. Klad'a bakın.

mRNA. Mesajcı RNA'ya bakın.

Multimerik. Birden fazla alt birimden oluşan bir protein.

Mutasyon. Bir organizmanın genomunun nükleotid dizisindeki değişiklik, örneğin, genetik kodun okunmasındaki hatalardan, iyonlaştırıcı radyasyondan veya kimyasallardan kaynaklanır.

NAD^+. Bkz. NAD(P)H.

NADH. Bkz. NAD(P)H.

NAD(P)H. Hem nikotinamid adenin dinükleotid fosfat (NADPH) hem de nikotinamid adenin dinükleotid (NADH) anlamına gelen kısaltma, organizmalarda metabolik yolaklarda elektronları taşımak için kullanılan iki molekül. $NADP^+$ ve NAD^+, her ikisi de NADPH ve NADH'ye indirgenen elektron alıcılarıdır. Bu iki molekül daha sonra elektronları (elektron vericileri olarak 'gücü azaltan') diğer reaksiyonlara taşımaya devam edebilir (örneğin, Calvin döngüsünde CO_2 fiksasyonu).

Nötrino. Elektriksel olarak nötr, zayıf etkileşimli temel atom altı parçacık.

Nötron. Atom altı parçacık. Nötronların net elektrik yükü yoktur ve kütleleri protondan biraz daha büyüktür.

Nötron yıldızı. Bir süpernova olayı sırasında büyük bir yıldızın kütleçekimsel çöküşünden kaynaklanabilen bir tür yıldız kalıntısı.

Niş. Bir organizmanın "nişi" genellikle onun biyotik ortamdaki yeri, gıda ve besinlerle ilişkisi ve bir ekosistemdeki işlevsel rolü anlamına gelir.

Nitrojenaz. Atmosferik nitrojen gazının sabitlenmesinde yer alan enzimler.

Noachian Dönemi. Mars tarihinin 3,7 milyar yıl öncesinden önceki dönemi (genellikle Noachian öncesi dönem dâhil ; 4,5-4,1 milyar yıl öncesi).

Nükleazlar. Nükleik asitlerin nükleotid alt birimleri arasındaki fosfodiester bağlarını parçalayabilen bir enzim. Esasen nükleik asitleri parçalayan bir enzim.

Nükleer fisyon. Bir atomun çekirdeğinin daha küçük parçalara ayrıldığı bir nükleer reaksiyon veya radyoaktif bozunma süreci.

Nükleer füzyon. İki veya daha fazla atom çekirdeğinin çok yüksek bir hızda çarpıştığı ve yeni bir tür atom çekirdeği oluşturmak üzere birleştiği bir nükleer reaksiyon.

Nükleik asit. Nükleotid zincirlerinden oluşan DNA ve RNA'yı içeren makromoleküller.

Nükleobazlar. DNA (adenin, timin, guanin ve sitozin) ve RNA'daki (timin yerine urasil içeren) genetik bilgiyi kodlayan azot içeren moleküller.

Nükleosentez. Önceden var olan atom altı parçacıklardan yeni atom çekirdekleri oluşturan süreç.

Nükleotid. DNA ve RNA gibi nükleik asitlerin alt birimleri olarak görev yapan organik moleküller.

Ofiyolit. Dünya'nın okyanus kabuğunun bir bölümü ve deniz seviyesinin üzerinde yükselen ve açığa çıkan ve genellikle kıtasal kabuğa yerleşen alttaki üst manto.

Oksidasyon durumu (bir elementin). Bir kimyasal bileşikteki bir atomun oksidasyon derecesi (elektron kaybı). Örneğin, demir iki elektron kaybettiği Fe^{+2} olarak veya üç elektron kaybettiği daha oksitlenmiş bir durumda Fe^{+3} olarak bulunabilir. Daha büyük bir oksidasyon durumu, bir elementin daha fazla sayıda elektron kaybettiği bir formda olduğu anlamına gelir (sonuç olarak iyon, elektronlardan daha fazla protona sahip olduğundan daha pozitif bir yüke sahiptir).

Oksijenik fotosentez. Oksijenik fotosentez, sudan 'uyarılmış' elektronlar üretmek için ışık enerjisini kullanır ve böylece enerji toplama reaksiyonunu yürütür: karbondioksit + su + ışık enerjisi → karbonhidrat + oksijen.

Okyanus gezegeni (su dünyası). Kütlesinin önemli bir kısmını suyla açıklayan varsayımsal bir gezegen türü.

Olivin. $(Mg^{+2}, Fe^{+2})_2SiO_4$ formülüne sahip bir magnezyum demir silikat.

Oort Bulutu. Güneşi 50.000 AB'ye kadar çevrelediğine inanılan, ağırlıklı olarak buzlu gezegenlerden oluşan küresel bir bulut.

Organik karbon. H, N, O, S ve diğer karbon bileşiklerine karbon içeren bağlar.

Ototrof. Organik bileşikler yapmak için basit bileşikler kullanan, genellikle karbon kaynağı olarak CO_2 kullanan bir organizma.

Ökaryot. Hücreleri bir çekirdek ve zarlarla çevrili diğer organelleri içeren bir organizma.

Ölüm fazı. Tüm besinler tükenmişse ve taze kaynaklar mevcut değilse, mikrobiyal popülasyonun kademeli ölümü.

Öncül takson. Yok oluştan kurtulan ve yeni baskın grupların filogenetik ataları olarak hareket eden taksonlar.

Ön gezegensel disk. Yeni oluşmuş genç bir yıldızı çevreleyen yoğun gazdan oluşan dönen bir çevresel disk.

Ön gezegenler. Gezegenleri oluşturmak için çarpışan gezegen öncüllerinin birikmesinden oluşan cisimler.

Ön yıldız. Bir ön gezegensel diskteki erken bir yıldız.

Örtü karbonatlar. Jeolojik kayıtlardaki ana buzullaşmaları yansıtan tipik olarak tortul dizilimlerin en üst katmanını oluşturan belirgin dokulu karbonat kayaçlarının katmanları.

Ötegezegen. Güneşten başka bir yıldızın yörüngesinde dönen bir gezegen.

Ötektik nokta. Ötektik sistem, diğer herhangi bir bileşimden daha düşük bir sıcaklıkta katılaşan tek bir kimyasal bileşime sahip kimyasal bileşiklerin veya elementlerin bir karışımıdır. Bu bileşim ötektik bileşim olarak bilinir ve sıcaklık ötektik sıcaklık veya ötektik nokta olarak bilinir.

PAH'lar. Bkz. Polisiklik aromatik hidrokarbonlar.

Paleosoller. Eski topraklar.

Pangea. Geç Paleozoik ve erken Mezozoik çağlarda var olan bir süper kıta. Yaklaşık 300 milyon yıl önce oluşmuş ve yaklaşık 100 milyon yıl sonra parçalanmaya başlamıştır.

Panspermia. Yaşamın gezegenler arasında aktarılabileceği teorisi.

Parçalı kristalizasyon. Magma soğudukça farklı minerallerin farklı sıcaklıklarda kristalleşme süreci.

Parsek. Bir yay saniyesi paralaks açısına sahip astronomik bir nesnenin Güneşten uzaklığı.

Pelajik. Bir su kütlesindeki bölge ne dibe yakın ne de kıyıya yakın.

Peptit bağı. Dehidrasyon reaksiyonunda iki amino asit arasında oluşan bağ.

Peptidoglikan. Bakteri hücre zarlarının dışında ağ benzeri bir kaplama oluşturan şekerler ve amino asitlerden oluşan moleküler bir bileşik.

Peridotit. Çoğunlukla olivin ve piroksen minerallerinden oluşan yoğun, iri taneli bir magmatik kayaç.

Periglasiyal. Permafrost alanlarındaki kar veya buzun mevsimsel olarak çözülmesinden kaynaklanan jeomorfik süreçler, akışın buz kamaları ve diğer yapılarda yeniden donması.

Periyod (Dönem). Bir jeolojik zaman birimi, örneğin Kambriyen dönemi.

Periplazma. İki hücresel zar arasındaki, özellikle Gram negatif bakterilerin iç ve dış zarları arasındaki sıvı dolu boşluk.

Permineralizasyon. Bir organizmanın kalıntılarının minerallerle değiştirildiği süreç.

Piezofil (barofil). Büyümek için yüksek basınca gereksinim duyan bir organizma.

Pili. Birçok bakterinin yüzeyinde bulunan saç benzeri uzantılar.

Piroksen. Birçok magmatik ve metamorfik kayaçta bulunan bir grup önemli kayacı oluşturan mineral. Tek silika tetrahedra zincirlerinden oluşan ortak bir yapıyı paylaşırlar.

Plankton. Okyanusların, denizlerin veya tatlı su kütlelerinin pelajik bölgesinde yaşayan, sürüklenen hayvanlar, protistler, arkeler, algler veya bakteriler dâhil olmak üzere çeşitli deniz organizmaları grubu. Plankton bu nedenle filogenetik veya taksonomik sınıflandırmadan ziyade ekolojik nişleriyle tanımlanır.

Plate flyer. Çarpma etkilerini incelemek amacıyla şok basınçları elde etmek için küçük bir plakanın üzerinde patlayıcı patlatma yöntemi.

Plazma. Maddenin dört temel durumundan biri (diğerleri katı, sıvı ve gaz). Hava veya gaz iyonize olduğunda plazma oluşur.

Plazmit. Bir hücre içinde kromozomal DNA'dan ayrı olan ve ondan bağımsız olarak çoğalabilen küçük bir DNA molekülü.

Polar molekül. Yüklü (küçük çubuk-mıknatıs benzeri) bir özelliğe yol açan eşit olmayan bir elektron dağılımına sahip bir molekül.

Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PZR). DNA'nın tek veya çoklu sarmallarını çoğaltmak için bir yöntem.

Polipeptitler. Amino asit zincirleri (genellikle proteinler).

Polisakkarit. Uzun zincirli şekerler veya karbonhidratlar için alternatif bir isim.

Polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar). Hidrokarbonlar –sadece karbon ve hidrojen içeren organik bileşikler– çoklu aromatik halkalardan oluşur.

Porinler. Maddelerin hücre zarından geçmesine izin veren içi boş silindirik proteinler.

Pozitron (veya antielektron). Bir pozitron, elektronun karşı-parçacığı veya karşı-madde karşılığıdır. +1'lik bir pozitif değişime sahiptir.

Prebiyotik. Yaşamı bir araya getiren veya biyolojik moleküllerin öncüleri olan bileşikler veya moleküller.

Prekambriyen. Dünya'nın oluştuğu 4,56 milyar yıl öncesiyle 541 milyon yıl öncesi arasındaki Dünya tarihinin süpereonu. Hadean, Arkeyan ve Proterozoyik devirlerini kapsar.

Primaz. DNA replikasyonunu başlatmakla ilgili bir enzim.

Prion. Sadece proteinden oluşan bulaşıcı bir ajan. Prionlar, yeni prion proteinlerinin üretimi için bir şablon görevi görerek çoğalırlar.

Promotörler. Belirli bir genin transkripsiyonunu başlatan bir DNA bölgesi. Transkripsiyon enzimleri promotörlere bağlanır.

Proteaz. Proteinleri parçalayan bir enzim.

Protein. Bir veya daha fazla uzun amino asit kalıntısı zincirinden oluşan biyolojik moleküller veya makromoleküller. Bunların çoğu enzimdir.

Proton. Sembolü p veya p^+ olan ve pozitif elektrik yükü olan atom altı parçacık.

Proton-proton zinciri. Yıldızların hidrojeni helyuma dönüştürdüğü çeşitli füzyon reaksiyonlarından biri.

Proton hareket kuvveti. Enerji ileten bir zar boyunca protonların veya elektronların transferiyle üretilen ve kimyasal, ozmotik veya mekanik iş için kullanılabilen enerji.

Protozoa. Tek hücreli, heterotrofik ökaryotlar grubu.

Provirüs. Bir konak hücrenin DNA'sına entegre edilmiş bir virüs genomu.

Psikrofil. Büyümek için 15 °C'nin altında bir sıcaklığa ihtiyaç duyan bir organizma.

Pulsar. Bir pulsar (adı, titreşen yıldızın bir ifadesidir), bir elektromanyetik radyasyon ışını yayan, oldukça manyetize edilmiş, dönen bir nötron yıldızıdır.

Püskürtme. Örneğin, güneş rüzgârıyla gezegensel atmosferik gazların aşınması.

Quorum sensing. Mikrop popülasyonlarında bir iletişim sistemi. Sinyaller, tüm hücrelerin davranışını etkileyen sinyal molekülleri tarafından gruptan geçirilir.

R-süreci. Çekirdek çöküşü süpernovalarında meydana gelen ve demirden daha ağır olan nötronca zengin atom çekirdeklerinin yaklaşık yarısının yaratılmasından sorumlu olan bir nükleosentez süreci.

Radikal (bazen serbest oksijen radikali gibi serbest radikaller). Eşlenmemiş elektronlara veya açık elektron kabuğuna sahip bir atom, molekül veya iyon. Bu eşleşmemiş elektronlar, serbest radikalleri diğer maddelere karşı kimyasal olarak oldukça reaktif hale getirir.

Radyan. Standart bir açısal ölçü birimi. Dairenin yarıçapıyla aynı uzunluktaki bir dairenin yayı, 1 radyanlık bir açıya karşılık gelir.

Radyal hız yöntemi. Ötegezegenleri saptamak için radyal hız yöntemi, yıldızın yörüngesinde dönerken (görünmeyen) bir ötegezegenden gelen kütleçekim kuvvetinin değişen yönü nedeniyle, merkezi yıldızın hızındaki değişikliklerin (Doppler Kaymasıyla) saptanmasına dayanır.

Radyoizotop. Radyoaktif bozunma yoluyla zamanla yeni atomlara bozunan bir element.

Radyojenik. Radyoaktif bozunmadan üretilir.

Radyoliz. Bir bileşiğin radyasyonla parçalanması. Örneğin, minerallerdeki radyasyonla suyun radyolitik olarak parçalanması.

Radyometrik tarihleme. Doğal olarak oluşan bir radyoaktif izotopun gözlenen bolluğu ile bozunma ürünleri arasında bir karşılaştırmaya dayalı olarak kayalar veya karbon gibi malzemeleri tarihlemek için kullanılan bir teknik.

Rasemik. Kiral bir molekülün eşit miktarda sol ve sağ el enantiyomerlerine sahip bir karışım.

Reaktif oksijen türleri. Bkz. *Serbest Oksijen Radikalleri*.

Redoks çifti veya reaksiyon. Bir elektron donörü ve alıcısını içeren bir İndirgeme-Yükseltgenme reaksiyonu.

Regolit. Katı kayayı kaplayan gevşek, heterojen bir malzeme tabakası.

Replikasyon orijini. DNA replikasyonunun başlatıldığı genomdaki spesifik diziler.

Replikasyon çatalı. DNA replikasyonu sırasında çift sarmallı DNA sarmalının ayrılmasıyla oluşan ve tamamlayıcı zincirlerin oluşmasına izin veren bir yapı.

Replikonlar. Replikasyon sırasında üretilen sürekli bir DNA veya RNA bölgesi. Birkaç replikon, tek bir kromozomdan kaynaklanabilir.

Restriksiyon endonükleaz. DNA'yı belirli dizilim bölgelerinde kesen bir enzim.

RGB yıldızları. Kırmızı Dev Şube yıldızları. Kızıl Dev'e bakın.

Ribonükleik asit (RNA). Genetik bilgiyi taşıyabilen ve DNA kodunun tamamlayıcı kopyalarını yapabilen bir molekül. DNA'yla karşılaştırıldığında, timin yerine urasil nükleobazı ve DNA'da bulunmayan riboz üzerinde bir hidroksil grubu içerir.

Riboz. $C_5H_{10}O_5$ formülüne sahip organik bir bileşik, özellikle $H(C=O)-(CHOH)_4-H$ doğrusal formuna sahip bir pentoz monosakarit.

Ribozomal RNA (rRNA). Ribozomların yapısının bir parçasını oluşturan RNA molekülleri.

Ribozom. Proteinlerin bir araya getirildiği karmaşık bir protein ve RNA yapısı.

Ribozim. Bir ribozim (ribonükleik asit enzimi), spesifik biyokimyasal reaksiyonları katalize edebilen bir RNA molekülüdür.

RNA. Ribonükleik asit.

RNA Dünyası. RNA'nın erken biyokimyaya egemen olduğu yaşamın başlangıcındaki varsayımsal dönem.

Roche sınırı. Bazen Roche yarıçapı olarak da adlandırılan Roche sınırı, yal-

nızca kendi kütleçekimiyle bir arada tutulan bir gök cismi, ikinci bir gök cismi gelgit kuvvetleri nedeniyle parçalanacağı mesafedir.

Rubisko. Ribuloz bifosfat karboksilaz/oksijenaz. Karbon fiksasyonunun ilk büyük adımında yer alan bir enzim.

Rydberg enerji birimi. Bkz. *Rydberg Sabiti*

Rydberg Sabiti. Rydberg sabiti (R_∞), hidrojen atomundan yayılabilen herhangi bir fotonun en yüksek dalga sayısının (ters dalga boyu) sınır değerini temsil eder. 1,097 × 10^7 m^{-1}'e eşittir. Rydberg enerji birimi, sembolü *Ry*, Rydberg sabitiyle yakından ilişkilidir (1 Ry, *hc* R_∞'ye eşittir). Dalga sayısı Rydberg sabiti olan fotonun enerjisine, yani hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisine karşılık gelir. Değeri 13,6 eV'dir.

Selüloz. Doğrusal zincirlere bağlı binlerce glikoz alt birimi ve bitki hücre duvarlarının önemli bir yapısal bileşenini içeren bir polisakkarit. $(C_6H_{10}O_5)_n$ genel formülüne sahiptir ve Dünya'da en bol bulunan polimerdir.

Sentrofi. Bir organizmanın atık ürünlerinin başka bir organizma için enerji sağladığı bir süreç.

Sera etkisi. Kızıl-altı radyasyonun gezegensel bir atmosfer tarafından tutulması, yüzeyin ısınmasına neden olur. Kaçak sera etkisi, sıvı suyun devam etmesi için yüzeyin çok sıcak olduğu kadar güçlü bir sera etkisini ifade eder. Mevcut olan herhangi bir su kaynar.

Sera gazı. Kızıl-altı radyasyonu hapseden bir gaz.

Serbest oksijen radikalleri veya Reaktif Oksijen Türleri (ROT). Radyasyon ve kimyasal ajanlar tarafından üretilen oksijen ve oksijen içeren moleküllerin radikalleri. Reaktiftirler ve biyolojik makromoleküllere zarar verebilirler. Ayrıca bkz. *serbest radikal.*

Serbest radikal. Serbest radikal, eşleşmemiş değerlik elektronlarına veya açık elektron kabuğuna sahip bir atom, molekül veya iyondur.

Serpantin. $(Mg, Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ genel formülüyle yaygın olarak kullanılan, kayaç oluşturan sulu magnezyum demir fillosilikatlar grubu.

Serpantinleşme. Serpantinit, bir veya daha fazla serpantin grubu mineralinden oluşan bir kayaçtır. Bu gruptaki mineraller, ultramafik kayaçların Dünya'nın mantosundan serpantinleşme, hidrasyon ve metamorfik dönüşümüyle oluşur.

Septasyon. Siyanobakterilerde olduğu gibi segmentasyon.

Sıcak Jüpiterler. Jüpiter'in kütlesine benzer ve ana yıldızlarının etrafındaki yakın yörünge yörüngelerinin neden olduğu yüksek yüzey sıcaklıklarına sahip Güneş dışı gaz devleri.

Sıcak Neptün. Uranüs veya Neptün'ün kütlesine benzer ve ana yıldızlarının etrafındaki yakın yörünge yörüngelerinin neden olduğu yüksek yüzey sıcaklıklarına sahip Güneş dışı gaz devleri.

Sıcak nokta volkanizması. Levha sıcak nokta üzerinde hareket ederken, volkanların genellikle tektonik bir levhanın ortasında birbiri ardına oluştuğu yer. Volkanlar, zincirin bir ucundan diğerine yaş olarak ilerler.

Sıfırlama interferometrisi. İki veya daha fazla sinyalin karıştırılarak, gelen sinyallerin kendilerini iptal ettiği ve ilgilenilen sinyalleri bıraktığı gözlem bölgelerinin oluşturulduğu bir tür interferometri.

Sınır (jeolojide/yok olma durumunda). Jeolojik zamanlar arasındaki geçiş, bazen bir yok oluşun kaydedilmesi.

Sıvı kapanımları. Bir kristal içinde bulunan küçük sıvı ve gaz kütleleri.

Sievert. Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) türetilmiş bir iyonlaştırıcı radyasyon dozu birimi.

Sigma faktörü. Belirli bir genin transkripsiyonunu başlatan bakteri proteini. MRNA oluşumunu kontrol ederek gen ekspresyonunu düzenlemek için kullanılırlar.

Silika. Silikon dioksit (SiO_2). Oksijen atomlarının silisyum atomları arasında paylaşıldığı silika tetrahedralden (SiO_4) oluşan minerallerde, genel formül SiO_2'ye yol açar. Kuvars ve granit gibi birçok kayaçta bulunur.

Silikatlar. Silisyum içeren bir anyon içeren bir bileşik olarak tanımlanan karasal kabuklu kayaların ana bileşeni. Çoğu silika (anyon olarak oksijen) içerir, ancak bazıları anyon olarak flor içerir.

Silisleşme. Silikanın bir organizma gibi bir malzeme üzerinde biriktirildiği süreç.

Simbiyoz. İki veya daha fazla farklı tür arasında yakın ve genellikle uzun vadeli bir etkileşim.

Simektit. Montmorillonit, nontronit ve saponit gibi mineralleri içeren bir tür kil minerali.

Sinodik dönem. Güneş Sistemindeki bir gezegen, Ay veya yapay bir Dünya uydusu gibi bir cismin, Dünya'daki bir gözlemci tarafından Güneşe göre aynı veya yaklaşık olarak aynı konuma dönmesi için gereken süre.

Sistematik. Hem geçmiş hem de şimdiki canlı formlarının çeşitlenmesi ve zaman içinde canlılar arasındaki ilişkilerin incelenmesi.

Sitoplazma. Hücre zarıyla çevrili bir hücrenin içi sıvı dolu. Sitoplazma proteinleri, tuzları ve suyu, ayrıca organelleri ve diğer yapıları içerir.

Siyah duman. Siyah duman veya deniz bacası, okyanus tabanında bulunan bir tür hidrotermal bacadır. Sülfürce zengin (siyah) sıvılar üretirler.

Soğurma spektrumu. Soğurma spektroskopisi, gaz gibi bir örnekle etkileşimi nedeniyle, frekans veya dalga boyunun bir fonksiyonu olarak radyasyonun emilimini ölçen teknikleri ifade eder.

Sokulum. Dünyanın derinliklerinde kristalleşen (ve genellikle büyük kristalleri olan) bir kayaç. Bir örnek granittir.

Sol. Bir Mars günü.

Soluk genç Güneş paradoksu. Erken Dünya'daki sıvı suyun varlığı ile bu zamanda daha düşük güneş enerjisi çıkışı arasındaki çelişkiyi açıklayan bariz bir paradoks.

Son Evrensel Ortak Ata (LUCA). Dünyadaki tüm yaşamın evrimleştiği varsayılan organizma.

Soyu tükenmiş radyonüklidler. Yarı ömürleri (jeolojik zaman ölçeğinde) kısa olan radyoaktif elementler, erken Güneş Sisteminde üretildi, ancak şimdi Güneş Sisteminde artık mevcut değil.

Spaceguard. Spaceguard terimi, Dünya'ya Yakın Nesneleri keşfetmek ve incelemek için yapılan bir dizi çabayı genel hatlarıyla ifade eder.

Spesifik sıfat. Kendi cinsi içindeki belirli türleri tanımlayan tür binomunun ikinci kısmı.

Spektral sınıf. Yıldızların spektral özelliklerine göre sınıflandırılması. Bir yıldızın tayf sınıfı, iyonlaşma durumunu özetleyen ve fotosferin sıcaklığı ve yoğunluğunun nesnel bir ölçüsünü veren kısa bir koddur.

Spiroketler. Kendine özgü, sarmal (tirbuşon şeklinde) hücrelere sahip bir bakteri filumu.

Stratigrafi. Kaya katmanlarını (tabakalar) ve katmanlaşmayı (tabakalaşma) inceleyen bir jeoloji dalı. Katmanlı bir kaya dizisini tanımlamak için de kullanılabilir.

Standart Ortalama Okyanus Deniz Suyu (SMOW). Deniz suyu için izotopik bir standart. Viyana, Avusturya'daki Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı tarafından sağlanan, günümüz okyanus suyunun ortalama konsantrasyonu. SMOW oksijen atomları yaklaşık %99,76 ^{16}O ve %0,20 ^{18}O'dur.

Stokiyometrik. Bileşen elementlerini formülünde belirtilen tam oranlarda bulunan bir bileşik (mineral gibi).

Strecker sentezi. Bir aldehit veya ketondan bir amino asit sentezleyen bir dizi kimyasal reaksiyon.

Stromatolitler. Stromatolitler veya stromatolitler, sığ sularda tortul tanelerin mikroorganizmaların, özellikle siyanobakterilerin biyofilmleri tarafından tutulması, bağlanması ve çimentolanmasıyla oluşan katmanlı yapılardır.

Su aktivitesi. Su aktivitesi veya a_w, bir maddedeki suyun kısmi buhar basıncının, suyun standart durum kısmi buhar basıncına bölümüdür.

Süblimasyon. Bir maddenin bir ara sıvı fazdan geçmeden katı halden gaz fazına doğrudan geçişi.

Süper Dünya. Yaklaşık bir ila on Dünya kütlesi arasında bir ötegezegen.

Süperkritik sıvı. Farklı sıvı ve gaz fazlarının bulunmadığı, kritik noktasının üzerinde bir sıcaklık ve basınçta olan herhangi bir madde.

Süpernova. Tüm bir galaksiyi kısaca gölgede bırakan, birkaç hafta veya ay boyunca gözden kaybolmadan önce, Güneşin tüm ömrü boyunca yayması beklenen kadar enerji yayan bir yıldız patlaması. Yüksek kütleli yıldızların kaderi.

Sürekli yaşanabilir bölge. Yüzey sıvı suyunun jeolojik zaman periyotları için kararlı olduğu bir yıldızın etrafındaki bölge.

Şaperoninler. Proteinlerde doğru katlanmayı sağlayan moleküller.

Şişkin gezegen. Çok düşük yoğunluklu bir ötegezegen.

Şoklanmış kuvars. Asteroit veya kuyruklu yıldız çarpması sırasında yüksek basınca maruz kalan kuvars.

Şube. Âlemin altındaki ve sınıfın üstündeki taksonomik sınıflandırma.

Taksa. *Bkz.* takson.

Takson (çoğulu taksa). Biyolojik sınıflandırma veya taksonomi biliminde kullanılan herhangi bir birim.

Taksonomi. Organizma gruplarını ortak özelliklere göre tanımlama ve bu gruplara isim verme bilimi.

Taq polimeraz. Termofil *Thermus aquaticus*'tan izole edilen, *Polimeraz Zincir Reaksiyonu* gibi işlemlerde kullanılan DNA replikasyon polimeraz enzimi.

Taşıyıcı RNA (tRNA). Amino asitleri ribozoma aktaran RNA molekülleri, proteinler halinde birleştirilir. Her tRNA molekülü, karşılık gelen antikodon dizisiyle tek bir amino asit taşır.

Taşkın bazaltı. Bir taşkın bazaltı, devasa bir volkanik patlamanın veya geniş kara parçalarını veya okyanus tabanını bazalt lavla kaplayan bir dizi patlamanın sonucudur.

TCA döngüsü (trikarboksilik asit döngüsü). Bkz. *Krebs döngüsü.*

Teikoik asit. Pozitif yüklü iyonları çekerek Gram pozitif bakteri hücre duvarlarının sertleşmesini sağlayan polisakkaritler.

Tekdüzecilik. Şuan evrende işleyen aynı doğal yasaların ve süreçlerin geçmişte evrende her zaman işlediği ve evrenin her yerinde geçerli olduğu varsayımı.

Tekillik (kozmoloji). İlk tekillik, dalgalanmaların Büyük Patlamada ve ardından şişmede hızla patlamasına ve günümüz evrenini yaratmasına neden olmadan önce evrenin tüm kütlesini ve uzay-zamanını içerdiği düşünülen sonsuz yoğunluğun kütleçekimsel tekilliğiydi.

Tektitler. Dünya dışı etkiler sırasında fırlatılan karasal dökünlülerden oluşan siyah, yeşil, kahverengi veya gri doğal camdan oluşan küçük çakıl boyutlu nesneler.

Ter proteini. 'DNA replikasyon terminali site bağlayıcı protein'. Bakterilerde DNA replikasyonunu durduran bir enzim.

Termofil. Büyümek için 45 ila 80 °C arasında yüksek sıcaklıklar gerektiren bir organizma.

Termotaksi. Isıya tepki olarak hareket.

Tetrapodlar. Dört ayaklı hayvanlar.

Tholinler. Metan veya etan gibi basit organik bileşiklerin Güneşten gelen ultraviyole ışımayla oluşturulan karmaşık organik moleküller.

Tolman-Oppenheimer-Volkoff sınırı. Nötron-dejenere maddeden (yani nötron yıldızları) oluşan yıldızların kütlesinin bir üst sınırı.

Topoloji (filogenetikte). Bir filogenetik ağacın şekli.

Transdüksiyon. DNA'nın bir virüs tarafından bir mikroorganizmadan diğerine aktarıldığı süreç.

Transkripsiyon. RNA'nın tamamlayıcı bir kopyasının DNA'dan yapıldığı süreç.

Transkripsiyon balonu. Bir genin transkripsiyonuna izin vermek için çözülmüş, çift sarmallı DNA'nın küçük bir bölümü. Bir transkripsiyon balonu, mRNA sentezlenirken DNA zinciri boyunca hareket eder.

Tortul. Materyalin Dünya yüzeyinde ve su kütleleri içinde birikmesiyle oluşan kayaç türleri.

Tür-Alan İlişkisi (veya Tür-Alan Eğrisi). Fiziksel bir alandaki türlerin sayısının o alanın büyüklüğüyle ilişkili olduğu ekolojik ilişki.

tRNA. Bkz. *Taşıyıcı RNA*

Transformasyon. Ortamdan yabancı genetik materyalin alınmasından kaynaklanan bir organizmanın genetik modifikasyonu.

Translasyon. mRNA tarafından taşınan genetik bilginin ribozomda proteine dönüştürüldüğü süreç.

Trikarboksilik asit döngüsü. Bkz. *Krebs döngüsü*.

Tropik seviye. Alttan (birincil üreticiler) daha yüksek seviyedeki yırtıcılara kadar bir besin ağı içinde bir seviye.

T-Tauri. Bir güneş bulutsunun yavaşlayan dönen malzemesinden malzemenin toplanması ile önyıldızda birikmiş olan hidrojenin tutuşması arasındaki yıldız gelişiminin bir aşaması. 'T-Tauri' rüzgârı, adını şu anda bu aşamada olan genç yıldızdan (Tauri takımyıldızında değişken bir yıldız) almıştır.

Uçucular. Özellikle gezegen bilimlerinde, bir gezegen gövdesinin kabuğu veya atmosferiyle ilişkili düşük kaynama noktalarına sahip kimyasal elementler ve bileşikler grubuna atıfta bulunan genel bir terim. Örnekler arasında su, karbondioksit, nitrojen ve metan sayılabilir.

Ultramafik (bazen ultrabazik kayaçlar olarak adlandırılır). Çok düşük silika içeriği (%45'ten az), genellikle %18'den fazla MgO, yüksek FeO, düşük K içeren ve genellikle %90'dan fazla mafik minerallerden oluşan magmatik kayaçlar.

Uyarlanabilir optik. Teleskopik optikleri değiştirerek astronomik gözlemlerde-

ki atmosferik bozulmaları düzeltme yöntemi.

Uyarlanabilir radyasyon. Evrimsel biyolojide, uyarlanabilir radyasyon, özellikle çevredeki bir değişiklik yeni kaynaklar sağladığında, yeni zorluklar yarattığında veya kitlesel yok oluş gibi çevresel nişler açtığında, organizmaların hızla yeni formlara çeşitlendiği bir süreçtir.

Uyumlu çözünen. Ozmolitler gibi davranan ve organizmaların, özellikle halofillerde bulunan aşırı ozmotik strese karşı hayatta kalmasına yardımcı olan küçük moleküller.

Uyumsuz öğeler. Magmanın kristalleşmesi ve yerkabuğunun kısmen erimesiyle magma oluşumu sırasında, minerallerin katyon bölgelerine girmekte zorlanan elementler magmanın eriyik fazında yoğunlaşır. Bunlar uyumsuz unsurlardır. Ekonomik açıdan önemli metal cevherleri oluştururlar.

Üçlü alfa reaksiyonu. Üç helyum-4 çekirdeğinin karbona dönüştürüldüğü bir dizi nükleer füzyon reaksiyonu.

Üçlü nokta. Bu maddenin üç fazının termodinamik dengede bir arada bulunduğu sıcaklık ve basınç.

Üst âlem. Organizmaların en yüksek veya en geniş sınıflandırma düzeyi. Dünyadaki tüm hücresel yaşam, üç "üst âlemden" birinde sınıflandırılır: Bakteriler, Arkeler veya Ökaryotlar.

Üstel faz. Genellikle hücre sayılarında üstel bir artışla karakterize edilen bir mikrobiyal popülasyonda hızlı büyüme aşaması.

Van der Waals etkileşimleri. Kovalent bağlar veya iyonların birbirleriyle veya nötr moleküller veya yüklü moleküller (iyonik bağlar dâhil) ile elektrostatik etkileşiminden kaynaklananlar dışındaki moleküller (veya aynı molekülün parçaları arasındaki) arasındaki çekici veya itici kuvvetlerin toplamı.

Vektör. Moleküler biyoloji laboratuvarlarında yabancı genleri hücre içine taşımak için kullanılan bir DNA molekülü.

Viskozite. Bir sıvının kademeli deformasyona karşı direncinin bir ölçüsü. Bir sıvının gayri resmi "kalınlığı" kavramına karşılık gelir.

Virüs. Sadece diğer organizmaların hücrelerinin içinde çoğalan küçük bir bulaşıcı ajan.

Volkanik kış. Büyük bir volkanik patlama ve kül ve aerosollerin üst atmosfere enjeksiyonunu takiben katastrofik bir soğuma periyodunu tanımlamak için kullanılan bir terim.

Volkanik Patlayıcılık İndeksi. Volkanik bir patlamanın büyüklüğünü ve yoğunluğunu ölçen bir indeks.

Volkanik yay. Yukarıdan görüldüğü gibi yay şeklinde konumlandırılmış bir yanardağ zinciri. Levha batma-dalmasından kaynaklanır. Volkanları oluşturan bu mekanizma, sıcak nokta volkanizmasından farklıdır.

Widmanstätten desenleri. Demir göktaşlarında bulunan uzun nikel-demir kristallerinin dizilişi.

Yağ asidi. Doymuş (çift veya üçlü bağ içermeyen) veya doymamış (çift veya üçlü bağ içeren) uzun alifatik kuyruklu (uzun zincirde düzenlenmiş karbon atomları) bir karboksilik asit. 4'ten 28'e kadar çift sayıda karbon atomu zincirine sahiptirler.

Yakınsak evrim. Farklı soy türlerinde benzer özelliklerin bağımsız evrimi. Genellikle benzer çevresel koşullara veya seçim baskılarına maruz kalmaktan kaynaklanır.

Yakınsak Sınır. Yıkıcı levha sınırı olarak da bilinir (yitim nedeniyle), iki (veya

daha fazla) tektonik levhanın veya litosfer parçasının birbirine doğru hareket ettiği ve çarpıştığı, aktif olarak deforme olan bir bölgedir.

Yarı büyük eksen. Uzun ana ekseni boyunca bir gezegensel elipsin mesafenin yarısı.

Yarı ömür. Bir radyoaktif maddenin konsantrasyonunun orijinal konsantrasyonunun yarısına düşmesi için geçen süre.

Yastık lavı. Bazalt lav su altında püskürdüğünde oluşan farklı yastık şekillerine sahip lavlar.

Yaşanabilir bölge. Yüzey sıvı suyunun bir gezegen yüzeyinde kararlı olduğu bir yıldızın etrafındaki bölge.

Yaşanamaz çevre. Bilinen hiçbir organizmanın aktif olamayacağı bir ortam.

Yatay gen aktarımı. Geleneksel üreme dışında bir şekilde organizmalar arasında gen aktarımı. Ayrıca yanal gen aktarımı olarak da adlandırılır.

Yay saniyesi. Bir yay saniyesi (yay saniyesi, yay saniyesi) bir yay dakikasının 1/60'ı ve bir derecenin 1/3600'ü kadardır.

Kütleçekim kuyusu. Kütleçekimden kurtulmak için üzerinde enerji kullanılması gereken bir gezegen cismi yüzeyine atıfta bulunmak için kullanılan bir terim.

Kütleçekim odaklama. Gezegen oluşumu sırasında bir gezegenin kütleçekiminin diğer gezegenleri çekme şekli.

Yeterlilik. Bir hücrenin çevresinden DNA alma yeteneği.

Yıldız yılı. Bir cismin yörüngesini tamamlaması için geçen süre.

Yıldızlararası taneler. Buzlarla kaplı silisli ve karbonlu madde taneleri.

Yıldızlararası ortam. Bir galaksideki yıldızlar arasındaki boşlukta var olan madde.

Yok oluş olayı. Türlerin belirgin bir şekilde yok olduğu dönem (türleşme hızına göre yok olma hızı arttığında).

Yükseltgenme/indirgenme potansiyeli. Bir kimyasal türün elektron alma ve dolayısıyla indirgenme eğiliminin bir ölçüsü. Volt (V) veya milivolt (mV) cinsinden ölçülür. Her türün kendine özgü indirgeme potansiyeli vardır.

Zirkon. Toryum ve uranyum içeren sert bir silikat minerali. Zirkonlar birçok jeolojik süreçten kurtulabilir ve eski jeolojik özelliklerin tarihlendirilmesinde kullanılabilir.

Zorunlu. Mikroorganizmalara atıfta bulunularak, bir koşul için bir gereklilik (örneğin büyümek için oksijenin yokluğunu gerektiren zorunlu anaerob) –gereklilik olmadığı anlamına gelen fakültatifin tersi (örneğin, oksijen varlığında veya yokluğunda büyüyebilen fakültatif anaerob).

DİZİN

adenozin trifosfat 602
aerobik solunum 104, 117, 120, 123, 131, 140, 142, 144, 602
akondritler 232
akritarklar 380
alkalifiller 184, 195
Amazonian 431, 459
amfifilik moleküller 83
amino asitler 32, 34, 57, 58, 59, 60, 68, 90, 91, 182, 232, 245, 250, 252, 498
amonyak 54, 74, 75, 76, 127, 156, 197, 250, 280, 281, 283, 284, 408, 498, 597, 599
anaerobik solunum 137, 138, 307
antikodon 89, 90, 609
apatit 198, 314, 448
apoptoz 104
Archean 256, 263, 264, 265, 324, 325, 384
Arecibo mesajı 545
aromatik 64, 71, 115, 246, 247, 248, 249, 254, 464, 598, 600, 604, 605
aromatikler 248, 586
Arrhenius ilişkisi 418, 586
asidofiller 130, 184
astenosfer 336
astrometri 509, 512
atmosfer 42, 75, 139, 185, 196, 215, 256, 262, 264, 265, 269, 282, 362, 378, 391, 410, 411, 414, 416, 434, 475, 492, 496, 524, 567, 579, 607
ATP 99, 100, 104, 110, 113, 114, 115, 116, 117, 120, 122, 123, 128, 133, 134, 138, 142, 146, 290, 306, 307, 365, 379, 380, 585, 598, 602
Ay 15, 136, 195, 258, 259, 260, 266, 267, 328, 345, 346, 347, 415, 416, 421, 422, 478, 485, 502, 564, 565, 567, 571, 573, 582, 588, 593, 608
bakteriler 79, 81, 82, 84, 91, 94, 101, 105, 113, 115, 123, 131, 134, 137, 138, 140, 150, 166, 167, 168, 174, 185, 190, 193, 277, 305, 307, 312, 328, 369, 587, 591, 604
bakteriyofaj 107, 165
bakteriyoklorofil 134, 135, 136
Bantlı Demir Oluşumları 368, 373
barofil 604
basil 82
beyaz cüce 45, 210, 587, 588
binomiyal 151
biyobelirteçler 372
biyofilm 86, 96, 102, 140
biyojeokimyasal döngüler 141
biyolojik olarak etkili ışınım 271
biyomineralizasyon 316
biyomorflar 318
biyosentez 111, 120
Boulby 186
Bruno, Giordano 18
bucky küreleri 247, 248
Büyük Oksidasyon Olayı 364, 366, 374, 385, 390, 391, 588
Büyük Patlama 203, 204, 578

Callisto 225, 476, 477, 478, 482, 484, 485, 569, 570
Calvin döngüsü 127, 588
Ceres 224, 500, 568
CFC'ler 528, 561, 562
Chandrasekhar sınırı 588
Chicxulub 395, 396, 402
CHNOPS 54, 55, 56, 57, 76, 110, 173, 197, 198, 214, 408, 427, 457
Chroococcidiopsis 187, 190, 191, 195, 199, 468, 471

çörtler 316, 331

Dağınık Yıldızlararası Bulutlar 237
Darwin, Charles 149, 280
Deccan Tuzakları 396
deoksiribonükleik asit 31, 39, 66, 88
dinozorlar 358, 392, 546, 572
disülfit köprüsü 34, 59
diyajenez 342
DNA 31, 39, 40, 56, 57, 63-67, 71, 74, 79, 88, 89, 9-96, 98, 102-109, 114, 145, 149, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 163, 164, 165, 166, 168, 169, 171, 174, 177, 178, 187, 188, 189, 193, 194, 270, 271, 272, 289, 290, 291, 379, 453, 543, 545, 556, 585, 587, 589, 591, 593, 594, 599, 600, 601, 603, 605, 606, 609, 610, 611, 612
Dünya dışı zekâ 20
Dünya Dışı Zekâ Arayışı 535, 536, 552, 589
Dünya Dışı Zekâyla İletişim 541, 589
Dyson küresi 550, 590

Earthshine 530, 534
Ediyakaran faunası 380
eDNA 96
Einstein halkası 513, 590
ekstremofiller 174, 191, 300
enantiyomer 60, 250
Enceladus 20, 21, 68, 178, 409, 475, 486, 487, 488, 489, 490, 502, 504, 597
Enceladus'un Gayzerleri 488
endolitler 314, 321
ensefalizasyon 392
entropi 24, 111
erken Dünya 270, 304, 317, 372
EXPOSE 194, 470, 591

Fanerozoyik 596
fermentasyon 306
ferrodoksin 133, 295
filogeni 151, 154
flagellum 99, 100, 101
foraminifera 390
formoz reaksiyonu 284
fosforilasyon 114, 120, 133, 134, 135, 136
fotoferrotrofi 307
fototroflar 112, 423

Ganymede 20, 225, 475, 476, 477, 478, 482, 484, 485, 491
Geç Ağır Bombardıman 593
geçiş yöntemi 529
Genetik kod 67, 108
genom 91, 169, 588
Gibbs serbest enerjisi 141, 142, 144, 145, 593
Goldilocks bölgesi 410
grafit 55, 314, 523
granit 330, 335, 420, 608
Güneş rüzgârı 340, 594

habitat 180, 189, 200, 269, 390, 407, 423, 424, 428, 459, 489, 595
habitatlar 166, 304, 423, 424, 456, 457, 458, 459, 467
Hadean 256, 260, 262, 263, 264, 265, 273, 274, 303, 304, 333, 353, 354, 416, 605
Halley Kuyruklu Yıldızı 250
halofiller 307
hayvanlar 23, 80, 113, 196, 360, 361, 387, 558, 604, 610
Herschel, William 19, 209, 486, 512
Hesperian 431, 441, 442, 453, 454, 455, 456, 457, 466
hidrodinamik kaçış 432, 433
Hominidae 555
homoloji 154
homoplazi 154, 158
hopanoidler 323
Huronian buzullaşma 375
Huygens, Christiaan 19, 491, 492, 493, 494

ikili fisyon 96
insancıl ilke 209, 425
intronlar 590

Jeans kütlesi 201, 206

kaotropik 180
kara cisim 51, 201, 219, 220, 414, 415, 416, 527, 597
kara delik 202, 212
Kara Madde 28, 186
karbon 11, 20, 28, 29, 34, 54-58, 62, 63, 66, 70, 71, 74, 75, 76, 106, 112-114, 119, 120, 122, 124, 125, 127, 128, 129, 131, 134, 137, 138, 139, 156, 173, 179, 192, 197,

208, 209, 210, 211, 213, 214, 233, 234, 235, 236, 237, 240, 242, 243, 245, 246, 247, 248, 250, 251, 253, 254, 256, 264, 275, 286, 295, 301, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 316, 317, 318, 323, 329, 344, 346, 374, 377, 400, 408, 423, 437, 446, 447, 454, 461, 462, 475, 476, 488, 492, 499, 506, 518, 523, 526, 543, 566, 585, 592, 594, 597, 598, 602, 603, 605, 606, 611
karbonhidratlar 54, 61, 62, 76, 605
Kardashev ölçeği 550, 551
karşı-madde 203, 575, 605
Kartopu Dünya 375, 378, 597
kemiosmoz 117
kemootrofiar 127, 137
kemotaksi 99
Kepler yasaları 510
kerojenler 139
kıta sahanlığı 339, 390, 396, 398
Kızıl Dev 16, 426, 574, 606
kinonlar 248
kiralite 60
komatiitler 263
kondrüller 231
konjugasyon 165
Kopernik 18, 226, 227
kovalent bağ 27, 34, 589
Krebs döngüsü 122, 599, 609, 610
Kretase–Paleojen yok oluşu 388
Kretase sonu yok oluşu 392, 399, 406
kritik nokta 41, 599
kriyokonit delikleri 377
kromozomlar 97, 98
kuanta 48

Langmuir-Hinshelwood reaksiyonları 245
Lederberg, Joshua 21, 22, 26
Linnaeus, Carolus 151, 154
lizojeni 165
Lowell, Percival 19, 430, 465, 538

magmobeler 73
manyetit 305, 338, 376, 464
Mars 12, 19, 20, 42, 43, 73, 124, 140, 178, 183, 187, 194, 198, 222, 224, 225, 227, 232, 258, 259, 261, 266, 267, 268, 282, 286, 324, 326, 333, 337, 352, 410, 420, 424, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 472, 473, 474, 476, 491, 500, 501, 502, 503, 526, 528, 538, 548, 549, 565, 566, 567, 568, 571, 573, 576, 577, 582, 585, 586, 589, 591, 594, 596, 603, 608
mayoz 96, 97, 601
Mendel, Gregor 149
mesajcı RNA 88
metabolizma 111, 119, 131, 144, 291, 306, 307, 308, 315, 365, 380, 422, 449, 451, 460
metalik bağ 27, 36
metaliklik 214
metan 70, 71, 128, 129, 139, 250, 271, 281, 282, 311, 312, 374, 379, 390, 400, 451, 461, 476, 488, 492, 493, 494, 495, 496, 498, 499, 500, 518, 563, 567, 593, 597, 599, 602, 610
metanogenez 71, 129
metanojenler 56, 127, 128, 129, 139, 483
metanotroflar 128, 314
meteoritler 301, 598
metil tiyol 295
mikrobiyal matlar 322
mikrofosiller 318, 321, 466
mitokondri 104, 114
mitoz 97
moleküler bulutlar 248
moleküler saatler 169
monofiletik 159, 598
montmorillonit 289, 299
mutasyon 156, 157, 158, 272, 289, 381

Neolitik Devrim 558
Noachian 431, 439, 441, 442, 447, 449, 451, 452, 454, 456, 459, 472, 603
nükleosentez 204, 605

oksijensiz fotosentez 307, 308, 400
Oort Bulutu 603
Oparin-Haldane hipotezi 281
optik DDZA 535, 540

ökaryotik 79, 80, 94, 96, 103, 104, 105, 164, 196, 312, 358, 380

ötektik noktası 180, 300

paleosoller 368
Paleozoyik 366
panspermi 280, 466
parsek 202
Pasteur, Louis 278, 279
peptid bağları 59
peptidoglikan 84, 86, 194
periplazma 85
perkloratlar 447
Prekambriyen 354, 355, 357, 405, 605
proteinler 32, 33, 57, 59, 64, 67, 69, 76, 84, 94, 100, 108, 116, 169, 179, 196, 289, 291, 379, 586, 591, 593, 595, 605, 609
protozoa 277
pulsarlar 542

quorum sensing 108

radyal hız yöntemi 230, 606
radyoaktif bozunma 344, 347, 348, 585, 587, 603
radyometrik tarihleme 326, 596
redoks çiftleri 118, 119, 450, 451
replikasyon 93, 94, 95, 96, 177, 291, 506, 609, 610
restriksiyon endonükleazları 107
riboz 40, 62, 64, 65, 66, 88, 113, 284, 289, 300, 606
ribozomal RNA 89, 148, 150, 156, 167, 585
ribozomlar 90, 91, 293
RNA 66, 67, 88, 89, 91, 92, 93, 94, 102, 105, 106, 107, 108, 148, 150, 155, 156, 167, 275, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 299, 301, 585, 587, 599, 601, 602, 603, 606, 609, 610
r-süreci 212

Schrödinger, Erwin 24, 26
Senozoik 161, 353, 354, 360, 361, 398, 591
serpentinizasyon 128
Sibirya Tuzakları 399
silikatlar 72, 222, 327, 336, 477, 600
silikon 197, 212, 327
silseskioksan 70
sintrofi 137
siyah bacalar 294
siyanobakteriler 81, 86, 113, 131, 138, 140, 182, 195, 312, 322, 365, 372, 373, 377, 379, 470, 567, 594
Spaceguard 402, 608
Strecker sentezi 284, 287, 298, 609
stromatolitler 86, 141, 322, 609
süblimleşme 42
süperkritik akışkan 41

taksonomi 151, 609
Taq polimeraz 609
Tardigradlar 196
Taşıyıcı RNA 609, 610
tektitler 394
termofiller 136, 168, 176
termotaksi 307
tetrapodlar 357, 358
Tikhov, Gavriil 20, 21
Titan 19, 20, 56, 77, 282, 298, 475, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 498, 503, 504, 523
transdüksiyon 165
transformasyon 96, 164, 165
transkripsiyon 78, 88, 291, 610
translasyon 78, 89, 291
transversiyon 157
trehaloz 179, 182
trigonotarbidler 357
trilobitler 398, 399, 404
Triton 258, 476, 499, 500, 503, 504
Troodontid 392
T-Tauri 223, 518, 610

urasil 66, 88, 286, 603, 606
Urey-Miller deneyi 281, 282
uyarlanabilir optik 514

Van der Waals etkileşimleri 36, 611
Viking görevleri 460
Volkanik Patlama 559

Widmanstätten desenleri 231, 611

yarı ömür 346, 348
yaşam ağacı 150, 162, 168
Yellowstone Ulusal Parkı 140, 559

zarlar 84, 108, 291, 292
Zirkonlar 262, 612

ASTROBİYOLOJİ

Evrendeki Yaşamı Anlamak

Evrenimizdeki kozmik ortam içerisinde yaşamı ele alan *Astrobiyoloji*, konuyu hakkını vererek anlatmak için astronomi, biyoloji, kimya, jeoloji, gezegen bilimi, fizik, sosyal bilimler gibi pek çok bilim dalını harmanlıyor. Standart kozmolojik modele göre, Büyük Patlamayla birlikte birinci kuşak yıldızlar ortaya çıkar ve daha sonra bu yıldızların ölüp patlamasıyla yaşam için gerekli olan elementler evrene saçılır. Gezegenler yeni yıldızların etrafında oluşmaya başlar. Bu gezegenlerden bazıları yaşamaya elverişlidir ve en az birinde v çoğu y yıld çıkar. Yaşam, tek hücrel k çok çc büyür ve tüm bu süre k sıyıldızın dağılıyo , uzak yıldızları çevre yılışam içi lişmeye başlar ve diğer uya ı an diğer gezegenlere gitme amaya el iğimiz tek veri, Dünya'dak , amlı kelidisidir. Yaşa elin Da kitap Dünya üzerindeki bildiğimiz yaşamın yapısı, ilişkileri ve yetenekleri hakkında kapsamlı bir değerlendirme yaptıktan sonra, bunu kozmik bağlam içerisinde incelemektedir.

"Cockell'in *Astrobiyoloji*'si hem genel okur kütlesine hem de üniversite öğrencilerine hitap eden harika bir kitap."
–Astrobiology Journal

"Sonuç olarak, mesleğiniz veya temel alanınız ne olursa olsun astrobiyoloji öğrenmek isteyenler için son derece yararlı bir kaynak."
–Lewis Dartnell, University of Kent

"Okurlar 4 milyar yıllık evrimin ürettiği göz kamaştırıcı çeşitlilikteki organizmaların sınırsız görünebileceğini, ancak hepsinin evrensel yasalara uyduğuna dair net ve kışkırtıcı argümandan zevk alacaklardır."
–Kirkus Reviews

ALFA
alfakitap
alfakitap
alfakitap
www.alfakitap.com
9 786254 497490
BİLİM