YAŞAMIN KÖKENİ

Moleküler Makineler Karmaşadan Düzene Nasıl Ulaşır?



Peter M. Hoffmann
İngilizceden çeviren: Mehmet Ali Döke

SAY

YAŞAMIN KÖKENİ
Peter M. Hoffmann
SAY

YAŞAMIN KÖKENİ

Peter M. Hoffmann
Michigan'daki Wayne State University'de fizik ve malzeme bilimi profesörü olarak görev yapmaktadır ve üniversitenin Biyomedikal Fizik programının kurucusudur. Michigan eyaletindeki Saint Claire Shores kentinde yaşamaktadır.

Mehmet Ali Döke
1984 yılında Mersin'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mersin'de tamamladıktan sonra Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nden Moleküler Biyoloji ve Genetik lisans ve Biyoloji yüksek lisans derecesi aldı. 2013'ten bu yana ABD'deki Pennsylvania Eyalet Üniversitesi'nde Entomoloji Doktora Programı'na devam etmekte ve balarısı genetiği, ekolojisi, hastalıkları, davranışı ve evrimi üzerine araştırmalar yürütmektedir.

YAŞAMIN KÖKENİ

Moleküler Makineler Karmaşadan Düzene Nasıl Ulaşır?

Peter M. Hoffmann

İngilizceden çeviren:
Mehmet Ali Döke

SAY

Say Yayınları
Popüler Bilim

Yaşamın Kökeni / Peter M. Hoffmann
Özgün adı: *Life's Ratchet: How Molecular Machines Extract Order from Chaos*

© 2012 Peter M. Hoffmann

Bu kitap ilk kez ABD'de Perseus Books Group'un bir üyesi olan Basic Books tarafından yayımlanmıştır.

Türkçe yayın hakları Kesim Ajans aracılığıyla © Say Yayınları
Bu eserin tüm hakları saklıdır. Yayınevinden yazılı izin alınmaksızın kısmen veya tamamen alıntı yapılamaz, hiçbir şekilde kopyalanamaz, çoğaltılamaz ve yayımlanamaz.

ISBN 978-605-02-0505-3
Sertifika no: 10962

İngilizceden çeviren: Mehmet Ali Döke
Yayın koordinatörü: Levent Çeviker
Editör: Sinan Köseoğlu
Sayfa düzeni: Artemis İren

Baskı: Öncel Matbaacılık
Topkapı-İstanbul
Telefon: (0212) 565 09 20
Sertifika no: 312182

1. baskı: Say Yayınları, 2016

Say Yayınları
Ankara Cad. 22 / 12 • TR-34110 Sirkeci-İstanbul
Telefon: (0212) 512 21 58 • Faks: (0212) 512 50 80
www.sayyayincilik.com • e-posta: say@sayyayincilik.com
www.facebook.com/sayyayinlari • www.twitter.com/sayyayinlari

Genel Dağıtım: Say Dağıtım Ltd. Şti.
Ankara Cad. 22 / 4 • TR-34110 Sirkeci-İstanbul
Telefon: (0212) 528 17 54 • Faks: (0212) 512 50 80
internet satış: www.saykitap.com • e-posta: dagitim@saykitap.com

İçindekiler

Giriş: Yaşam Nedir? 9

1. Yaşam Kuvveti 19
2. Şans ve Gereklilik 67
3. Gece Yarısı Entropi 97
4. Çok Küçük Bir Ölçekte 125
5. Maxwell'in İblisi ve Feynman'ın Cırcırı 171
6. Yaşamın Gizemi 193
7. Bur ve Gönder 225
8. Saat ve Ribozom 283
9. Ekmek Parası 303

Sonsöz: Yaşam, Evren ve Her Şey 323

Sözlük 327
Kaynakça 335
Okunması Önerilen Kitaplar 341
Teşekkür 345
Dizin 347

Sevgili eşim Patricia ve beni her daim
daha fazla bilmek isteyecek biçimde
yetiştiren anne-babama

Giriş

Yaşam Nedir?

Küçük Sinek
Yaz oyununu
Benim kaba elim
Savurdu uzağa.
Ben de değil miyim
Bir sinek, senin gibi?
Ya da sen değil misin
Bir adam, benim gibi?
Zira ben dans eder,
İçer, şarkı söylerim
Ta ki bir kör el
Benim kanadımı savurana kadar...

— WILLIAM BLAKE

Kaba maddenin mekanik kurallara göre kendisini oluşturmuş olması gerektiği; yaşamın, cansız olanın doğasından filizlenmiş olması gerektiği; maddenin kendisini, kendini koruyan bir maksatlılık biçiminde düzenleyebilmiş olması gerektiği; bu, akla aykırıdır.

— IMMANUEL KANT

Siyah bir leke gözlerimin önünde vızıldıyor. Dalgınlıkla bir tane yapıştırıyorum; sonra yalnızca bir meyve sineğini

öldürdüğümü fark ediyorum. Muhtemelen üzülmemeliyim, ama bir canlıyı; özerk, hareketli, kendi kararlarını verip etrafta uçuşan, kendi besinini bulan ve kendi benzerlerini nasıl üreteceğini bilen bir şeyi yok ettim. Muhteşem bir makineyi yok ettim; en iyi bilim insanlarımız ve mühendislerimiz ellerinden geleni yapsa onun kadar mükemmel bir varlık yaratamaz. Şimdi, ölü yaratığa bakarken, merak ediyorum: Bu hareketsiz su ve organik molekül yığınını yalnızca bir dakika önce o denli mutlu ve canlı kılan neydi? Bir şeyin "canlı" olması ne demektir?

Ben bir fizikçiyim, biyolog değil. Dürüst olmak gerekirse, resmi biyoloji öğrenimim lise son sınıfta bitti ve bu konuda hiçbir zaman tek bir üniversite seviyesi ders almadım. Neden bu kitabı yazıyorum? Lisedeyken, fen ve matematiği seviyordum ama biyoloji beni hiçbir zaman çok fazla heyecanlandırmadı. Gözüme bir sürü sıkıcı ezber gibi görünüyordu; fiziğin bütünlük, açıklık ve evrenselliğini barındırmayan geçici kuramlardı adeta. Almanya'da lisans öğrenimimi tamamlayıp lisansüstü öğrenim için Amerika Birleşik Devletleri'ne gittim. Orada yaşadığım yıllar süresince görüşüm aynı kaldı. Bir süre, Ernest Rutherford'un "Fizik yegâne bilimdir; gerisi pul koleksiyonculuğudur" sözünden kendine epey eğlence çıkaran, o bildiğiniz kibirli fizikçilerden biriydim.

Dönüşümüm, Johns Hopkins Üniversitesi'ndeki malzeme bilimi bölümünde doktora öğrencisi olduğum sırada başladı. Doktora danışmanım Peter Searson, yalnızca sekiz yıl önce icat edilmiş olan yeni, güçlü bir aygıtın büyüsüne kapılmıştı: atomik kuvvet mikroskobu (AKM). AKM'nin nasıl çalıştırılacağını bilmediğinden, nasıl çalıştığını çözme görevini bana ve arkadaşım Arun Natarajan'a vermişti. AKM, en iyi ışık mikroskobundan bin kat daha güçlüdür. Alışılagelmiş mikroskoplardan farklı olarak AKM'ler görüntü elde etmek için ışık

kullanmazlar, bunun yerine örnekleri dokunarak görselleştirirler: Çok küçük, sivri bir uç örnek üzerinde gezdirilir ve ucu iten çok ufak kuvvetler görüntü yaratmakta kullanılır. Uçlar çok sivridir, yalnızca birkaç nanometre genişliğindedir ve bu incelik, çok küçük nesnelerin görüntülenmesine olanak tanır.

Bir gün, öğrenci arkadaşlardan birisi görüntülenmek üzere örnekler getirmişti. DNA moleküllerini düz bir tabakaya çökeltmişti ve bizim AKM'nin onları görünür yapıp yapamayacağını merak ediyordu. Bilgisayar ekranında her biri yalnızca iki nanometre çapında tek bir DNA molekülü olan minik kurtçuk biçiminde iplikleri gördüğümüzde çok şaşırmıştık. Yaşam molekülüne dokunmuş bulunuyorduk.

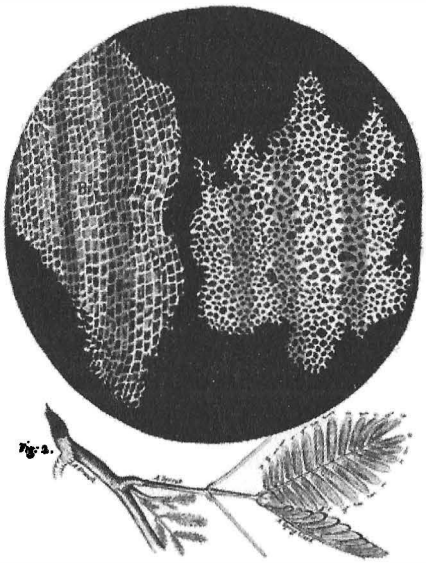
Ben biyolojinin harikalarına dönmeden önce yaşam birkaç dönemeçten daha geçti. Bir süre Oxford Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalıştıktan sonra yardımcı doçent olarak Detroit'teki Wayne Eyalet Üniversitesi'ne geldim. Başlangıçta bildiğime yoğunlaştım: Yüzeylerdeki atomlara ve moleküllere bakmak ve aralarındaki kuvvetleri ölçmek için AKM'yi kullanmaya çalıştım. İki konu beni büyülüyordu: Atomlar seviyesinde gelişigüzelliğin egemenliği ve atomların küçük ölçekli dünyası ile bizim büyük ölçekli dünyamız arasındaki bağlantılar. Atomların minicik ölçeğinde karmaşa hüküm sürer; buna rağmen insan ölçeğinde düzen egemendir (en azından çoğunda). Bu düzen nasıl ortaya çıkar? Bu, istatistiki mekaniğin konusudur ve araştırmalarımda küçük atom öbekleri ve moleküllerdeki kuvvetleri ölçerek "gürültü"den "düzen"e geçişi (ve dolayısıyla da istatistiki mekaniğin sınırlarını) irdeledim.

Yaşamda sık sık olduğu gibi, yeni fırsatlar çokça şans eseri doğar. Başka bir AKM araştırmacısı olan Heinrich Hoerber, Wayne Eyalet Üniversitesi'ne katıldı. Moleküler biyolojiye uygulanan yeni nanoteknoloji yöntemlerinde bir öncü olan

Hoerber, doktora sonrası araştırmalarını AKM'nin Nobel Ödülü kazanmış eş-mucidi Gerd Binnig'in yanında yapmıştı. Hoerber'in çalışmalarından büyülenmiştim ve daha sonra Birleşik Krallık'taki Bristol Üniversitesi'ne geçtiği zaman Wayne Üniversitesindeki görevini –kanserin yayılmasıyla ilişkili olduğu gösterilmiş belirli moleküler makinelerin hareketlerinin ölçülmesini– ben devraldım. Burada istatistiki mekaniğe olan ilgimi ve nanoteknolojinin aletlerini yeni bir şeyle, moleküler biyolojiyle birleştirme fırsatım olmuştu. Aynı zamanda kanser tedavisine katkıda bulunma fırsatı edinmiştim. Böylece kendimi biyoloji yönünden güçlendirdim ve yeni bir araştırmaya başladım. Moleküler biyoloji ile ilgili daha fazla şey öğrendikçe moleküler makinelerin büyüleyici bilimini keşfettim. Fark ettim ki yaşam, milyarlarca yıldır evrilegelmiş olan oldukça karmaşık moleküler makinelerin oluşturduğu yapılardan süzülen gürültü ve karmaşanın sonucudur. O zaman fark ettim ki bu makinelerin nasıl çalıştığını, karmaşayı nasıl yaşama çevirdiklerini anlamaktan daha büyüleyici bir amaç olamaz. Bu kitapta paylaşacağım öykü budur.

Yaşam nedir? Bilim var olalı beri bilim insanları bu soruyu yanıtlamaya çalışmışlardır. Aristoteles'e göre beden maddedir ama bedene yaşam vermek için bir ruh gereklidir. Bugün bile, benzer görüşlere toplumun genelinde sıkça rastlanır. *The Secret (Sır)* gibi kitaplar bize, zenginlikleri ve mutluluğu kendimize çekmemize yardımcı olabilecek, engin miktarda atıl bekleyen "yaşam enerjisi"ne sahip olduğumuzu söyler. Ama özel bir yaşam kuvveti hiçbir zaman saptanamamıştır. Eğer bir canlı organizmanın enerji girdisi (besin) ve çıktısı (hareket, ısı) denge cetveline bakacak olursak, kayıp enerji ya da atıl bekleyen enerji kaynağı yoktur.

Diğer uçta ise canlıların karmaşık ve çapraşık makineler olduğu görüşü vardır. Fransız filozof René Descartes hay-



Şekil 0.1. Gözlenmiş ve kayıt altına alınmış ilk canlı hücreler. Robert Hooke'un *Micrographia* adlı eserinden, 1665.

vanların (ama insanların değil) ruhsuz makineler olduklarına inanıyordu. Bu inanca göre hayvanlar acı hissetmiyordu. Hayvanların iç düzeneklerini keşfetmek için bugün barbarca bulduğumuz dirikesimi teşvik ediyordu.

On yedinci yüzyıldan itibaren, mikroskobun icadı ile birlikte, bilim insanları yaşamın sırrını hiç olmadığı kadar küçük ölçeklerde aradılar. Biyolojik hücreler ilk defa 1665'te Robert Hook'un *Micrographia* adlı eserinde tanımlanmıştır (Şekil 0.1). Kromozomların kalıtımın taşıyıcıları olarak tanımlanması 1902'yi bulmuştur. DNA'nın yapısı 1953'te çözümlendi ve ilk atom ölçekli protein yapısı 1959'da elde edildi. Yine de, bilim insanları yaşamı daha küçük parçalarına ayırırken bile yaşamın sırrını çözemediler.

Bu indirgemeci yaklaşım kaybetmeye mahkûm mudur? Pek çok kişi, pek çok saygın biyolog da dahil olmak üzere, öyle olduğunu düşünüyor. Ama ben onların hatalı olduğuna inanıyorum. Elbette indirgemecilik yeterli değil: Pek çok beklenmedik ve önemli olay ancak çok sayıda parçanın karmaşık etkileşimlerinden doğar. Ortaya çıkan bu olaylar yalnızca parçalara bakarak açıklanamazlar. *Bütüncülük* (bütünün, kendisini oluşturan parçaların toplamından daha fazla olduğu anlayışı) olmaksızın yaşamı açıklamak mümkün değildir.

Bununla birlikte, canlıların gittikçe daha küçük parçalarına bakan indirgemeci yaklaşım süreğen bir başarı öyküsü olagelmiştir. Ve en sonunda çok büyük bir ödülü almaya, yaşamın büyük gizemlerinden birini çözmeye yaklaşmış olabilir: Yaşayan varlıklardaki "amaçlı hareket"i ne yaratır? Bu, Aristoteles tarafından iki bin küsur yıl önce ifade edilmiş, yaşamın özgün gizemlerinden birisidir. Aristoteles, bu hareketi amaca bağlamıştı. Ama bugün, moleküller diyarının derinliklerine indiğimizde bir amaç bulmuyoruz. Onun yerine, gelişigüzel hareket buluyoruz. Bugün, bu büyük soru başka bir soruya dönüşmüştür: *Moleküller*, hücreleri ve bakterileri niteleyen "amaçlı" eylemi nasıl yaratabilirler? Salt atom topluluklarından bir hücrenin içindeki düzenli, karmaşık hareketlere nasıl gideriz?

Bu kitapta, binlerce yıldır bilimin ve felsefenin başına bela olmuş bu sorulara yanıtlar bulacağız. Bu sırrı çözmemiz neden bu kadar uzun sürdü? Yaşamı yeterince küçük ölçeklerde incelememize yarayacak doğru aletler ve kavramlardan yoksunduk. Yeterince küçük ne kadar küçük? Yaşamın etkinliğinin sırrı nanometre ölçeğinde bulunur, yani bir metrenin milyarda birinde.

Nanoteknolojideki gelişmeler sayesinde artık yaşamın en küçük kısımlarını iş başında görebiliyoruz: belirli görevleri

ufak robotlar gibi yerine getiren kendiliğinden hareket eden moleküller. Hücrelerimiz büyülüymüş gibi, kendilerini inşa eden, lazım oldukları yere giden, yapmaları gerekeni yapan ve tekrar geri dönüşen moleküler boyda işçi arılarla dolu şehirlerdir. Salt moleküller nasıl belirli görevleri yerine getirmek üzere belirli biçimlerde hareket edebilirler? Bu hayranlık verici moleküler robotlar özel bir yaşam gücü ile mi dolular? Daha yüksek bir bilinç tarafından mı yönetiliyorlar? Şaşırtıcıdır ki, yaşamı en küçük ölçekte ilerleten kuvvet gizemli, doğaüstü bir kuvvet değildir; yine de beklenmediktir. Yaşamı ilerleten kuvvet karmaşadır.

Moleküler biyolojiye yeni girmiş birisi olarak ve fiziğin özgün bakış açısı ile, kendimi yaşama dair nano-ölçekteki yeni keşiflerin öyküsünü anlatmaya çok uygun hissediyorum. Bu alanda, hiçbir şeyi kanıksayacak kadar uzun zamandır bulunmuyorum; her şey yeni ve heyecan verici ve bu heyecanı okurlarımla paylaşmak istiyorum. Fakat bu öyküyü benden önce gelmiş harika araştırmacılara; hücresel etkinliğin ayrıntılı yolaklarını bin bir zahmetle çözen biyologlara, hücrelerimizin moleküler makinelerinin kimyasal doğasını tanımlayan biyokimyacılara ve son dönemde hücrelerimizdeki harala gürelenin ardında yatan genel ilkeleri bulmaya çalışan fizikçilere borçluyum. Bu kitabın temel amacı bu bilim insanlarının keşiflerini izlemek ve bir molekülü bir makineye ve birçok moleküler makineyi bir hücreye çevirmek için ne gerektiğini bulmak.

Yaşamı anlamak için indirgemeciliğin yolunu izlediğimizde yolculuğumuzun başlangıç noktası moleküler ölçek olmak zorundadır. Özünde yaşam, moleküllerin fizik bağlamında anlaşılabilecek karmaşık bir dansıdır. 1945'te, Nobel Ödülü sahibi fizikçi Erwin Schrödinger kalıtsal bilginin, bir insan yapmanın taslağının, moleküller biçiminde kodlandığını ön-

görmüştü. *Yaşam Nedir?* adlı kitabında kalıtsal kodun (genetik şifrenin) düzensiz bir kristalin (günümüzde buna polimer diyoruz) parçalarını oluşturan kimyasal "harfler"den ibaret olduğunu ve kalıtsal koddaki her bir harfin büyüklüğünün birkaç nanometre boyunda olduğunu zihninde canlandırmıştı. Fizik temelli bu öngörüler yalnızca on üç yıl sonra genç Francis Crick'in DNA'nın gizemini çözmesine esin kaynağı olmuştur. Crick ve çalışma arkadaşı James Watson, Schrödinger'in tahminlerinin oldukça hatasız olduğunu gördüler. Yaşamla ilgili moleküler ölçekte öğrendiğimiz her şey bilinen fizik ilkelerine uymaktadır. Bu kitapta, Schrödinger'in önceden geçtiği yolu izliyorum ve yaşama bir fizikçinin bakış açısından bakıyorum.

Fakat, moleküler ölçekte bile, yaşam akıl almaz derecede karmaşıktır; bu karmaşıklık olmasa yaşam işleyemezdi. 1970'te, bir başka Nobel Ödülü sahibi, Fransız biyokimyacı Jacques Monod, *Rastlantı ve Zorunluluk* adlı eserinde hücrelerimizin karmaşık düzeneğinin inanılmaz bir şans eseri meydana gelen bir evrensel kazanın sonucu olması gerektiğine karar verdi: "Evren, yaşama gebe değildi ya da yaşamküre (biyosfer) insana. Şans oyununda bizim sayımız çıkageldi. Kendimizi kumarda bir milyon kazanmış birisi gibi tuhaf ve biraz gerçek dışı hissetmemiz şaşılacak bir şey mi?" Birçok bilim insanı Monod'un gereklilik (zorunluluk) yerine şansı (rastlantıyı) destekleyen yaklaşımını benimsemiştir. Bu bilim insanlarının bilimi dirimselcilik (yaşamın özel kuvvetler gerektirdiği düşüncesi, vitalizm) ve dinin etkisine açmakla ilgili endişeleri var. Gereklilik, yaşamın var olabilmesi için dışsal bir neden olduğuna işaret eder. Eğer böyle bir neden varsa, fizik ya da biyolojinin dışında yönlendirici bir kuvvet olması gerekir.

Başka bilim insanları bu meseleye farklı bakıyor. 1917'de, İngiliz biyolog ve matematikçi D'Arcy Wentworth Thompson

eşsiz bir kitap yayımladı: *Büyüme ve Biçim Üzerine* (*On Growth and Form*). Thompson, yaşayan bitki ve hayvanların biçimlerinin cansız fiziksel dünyada nasıl benzeşlerinin (analog) olduğunu gösterdi. Bedenlerimizin biçimlerinin şansa bağlı değil de fiziksel kuvvetlerin ve geometrik kısıtlamaların *gerekli* sonucu olduğunu savundu. Thompson, din ya da dirimselciliğe dokundurmadan gerekliliği şansın üstünde tutmanın bir yolunu buldu. Ona göre, canlının yapısı matematiğin ve fiziğin gerekli sonucuydu.

Yaşam moleküllerinin mikroskobik dünyasına girdiğimizde karmaşa, gelişigüzellik, şans ve gürültünün müttefiklerimiz olduğunu görürüz. Atomların titreme ve tangırdamaları olmaksızın, yaşam molekülleri yerinde donup kalmış, kıpırdayamaz halde olurlardı. Fakat yalnızca karmaşa olsaydı, bütün bu titremenin bir yönü, bir amacı olmazdı. Yaşam için işe yarar bir kuvvet haline getirilebilmesi için moleküler fırtınanın fizik yasaları ve karmaşık yapılar tarafından dizginlenmesi ve ehlileştirilmesi gerekir; moleküler makinelerce ehlileştirilmesi gerekir.

Şans ve gerekliliğin bereketli etkileşimi, karmaşa hasat eden makinelerin evrim tarafından nasıl "tasarlandığını" da açıklar. Şans ve gereklilik zihinlerimizin nasıl çalıştığını, nasıl yeni kavrayışlar edindiğimizi ve neden sezgiye sahip olduğumuzu bile açıklayabilir. Bu kitap gelişigüzelliğin, çokça karalanmış bir kuvvetin, aklanmasıdır. Gelişigüzellik olmadan ne evren olurdu; ne yaşam, ne insanlar, ne de düşünce.

Karmaşa nereden gelir? Atomlar neden süreğen gelişigüzel hareket halindedir? Bedenlerimizdeki atomların gelişigüzel hareketleri evrenin oluşumunun, büyük patlamanın bir kalıntısıdır. Büyük patlama, enerji dolu bir evren yarattı ve zamanla bizim güneşimiz gibi yıldızları meydana getirdi. Büyük patlamanın enerjisi, Güneş aracılığıyla bizim hücrele-

rimizdeki atomları titretir ve böylece Dünya üzerinde yaşamı olası kılar.

Beğenseniz de beğenmeseniz de (kitabı okurken bu düşünceyi beğeneceğinizi umuyorum), karmaşa yaşam kuvvetidir. Bir tutam gereklilik ekleyen fizik yasaları ile tavlanmış şans, evrenimizin yaratıcı kuvveti, itici gücü ve titreticisi haline gelir. Gök adalardan günebakanlara kadar etrafımızda gördüğümüz bütün güzellikler karmaşa ile gereklilik arasındaki bu yaratıcı işbirliğinin sonucudur. Yaşam olasılığı, evrenimizin kitabına fizik yasası ilkel parçacıkların şiddetli hareketleri ile buluşur buluşmaz zaten yazılmıştı. Benim için bu kavrayış, yaşamın öyküsünü güzel hatta spiritüel bir öykü haline getirir.

Yaşamı anlamak kolay bir görev değil. Yaşamın temel doğası, bilimin çözmeye çalıştığı en zor sorunlardan biri. Bilimsel yazın, yaşamın çeşitli yönlerini açıklamayı deneyen makalelerle dolu; yine de çoğu hâlâ varsayımsal, çokça tartışmalı. Toplum nadiren bilimdeki heyecan verici gelişmelerden haberdar olur çünkü anlaşılmaları ileri biyoloji, kimya ve fizik bilgisi gerektirir. Bu yetmezmiş gibi, bilimsel yazın, bilim insanlarının bile birbirini anlamasını güçleştiren bir dilde kaleme alınır. Bu kitapta, anlaşılmaz bilimsel metinleri sıradan okurun anlayabileceği bir dile tercüme edeceğim ve yaşama dair en yeni kuramları hevesli okura aktaracağım. Bütün yanıtları bilmiyorum ve bu kitapta yazdığım bazı şeyler ileride yanlış çıkacak. Ama bilim, değişmez gerçeklerden oluşan eski, tozlu bir kitap değil. O yaşayan, soluk alıp veren bir keşif öyküsü, insan zihninin yaşadığı gerçek bir maceradır.

Macera başlasın.

1

Yaşam Kuvveti

İnsan bedeni kendisini kuran bir makine,
süreğen hareketin yaşayan bir resmidir.
—JULIEN OFFRAY DE LA METTRIE

Gel, dedi ruhum, Böyle mısralar
yazalım Bedenim için, (zira biz biriz).
—WALT WHITMAN, *ÇİMEN YAPRAKLARI*

Yaşam bir arının dansı ve bir aslanın kükremesidir. Bir yağmur ormanının karmakarışıklığı ve bakteri ile konağı arasındaki amansız savaştır. Yaşam amip ve fildir, evrim ve yok oluştur ve bir gezegeni dönüştürecek güçtür. Yaşamın karmaşıklığı ve çeşitliliği afallatıcıdır, ama fizikçi için yaşam daha temel bir seviyede başlar. Bütün yaşam, birkaç milyar yıl önce moleküllerin dansıyla başladı. Aslan ve arı, mütevazı maya ve dev mavi balina... Her birinin hücrelerinde aynı seğiren moleküller bulunur; hepimiz akrabayız.

Ama yaşam moleküller ve enerji üzerine kurulu olsa da salt fiziksel bir açıklamaya meydan okur. Yaşayan bir varlığa baktığımızda hemen onu bir kaya ya da buluttan ayırt ederiz. Fakat yaşamı tanımlamaya çalıştığımızda zorluklarla karşılaşırız. Görünüşe göre tanımlanamayan bir şey var; cansız

maddeyi yaşayan bedenden ayıran bir çeşit özel bileşen. Sevdiğimiz birisi öldüğünde yaşamı yeniden yaratamadığımız için kederleniriz. Sanki özel bir bileşen, bir "yaşam kuvveti" bedeni terk etmiştir. Yaşam bizim güçlerimizin ve anlayışımızın ilelebet ötesinde görünür.

Ve biliyoruz ki çağdaş bilimin yaşamı yönlendirme gücü var. Kalıtım mühendisliğinden beyin görüntülemeye bilim, yaşayan maddenin en merkezine kadar girmiştir. Yaşamın bir amacı ve büyüsü olduğu hissini taşımamıza rağmen bu büyülü bileşeni aramaya kalktığımızda yalnızca madde ve düzenek bulmamız sonucu yaşadığımız ikilem, zihnimizi binlerce yıldır meşgul etmektedir. Bu, yaşamda bir amaç görenler ile bir düzenek görenler arasında bitmek bilmeyen bir savaşa yol açmıştır. Bu savaşta bazen bir taraf bazen de diğeri üstünlüğü ele geçirmiştir. Savaş bitti mi? Eğer bittiyse, kim kazandı?

Sır

Eğer en çok kötüye kullanılmış bilimsel kavramları seçmem gerekseydi *enerji*, *güç* ve *kuvvet* bu kısa listede yer alırdı. Motivasyon konuşmacısı Bob Practor'a göre insanlar inanılmaz bir güç kaynağıdırlar ve "bedenlerindeki gücü" "bütün bir şehri yaklaşık bir hafta boyunca" aydınlatmak için kullanabilirler.*

Proctor bu kadar kesin konuştuğuna göre (tam bir hafta demez, "yaklaşık bir hafta" der) hesaplamalarını gözden geçirmekte fayda var. İşe bakın ki bir insanın ne kadar güç ürettiğini hesaplamak oldukça kolaydır. Fizikte güç, kullanılabilir

* Bob Proctor, motivasyon konuşmacısı. *Sır* (*The Secret*) adlı filmden. Yönetmen Drew Heriot (Prime Time Productions, 2006). IMDb "Memorable Quotes for *The Secret* (2006)," adlı yapımdan alıntılanmıştır. Bkz.: www.imdb.com/title/tt0846789/quotes (8 Temmuz 2010'da erişildi).

enerji miktarının değil, enerjinin bir biçimden başka bir biçime ne kadar çabuk dönüştüğünün ölçüsüdür. Proctor gücü enerji ile karıştırıyor. Ama bu konuda söz oyunu yapmak istemem. Gelin Proctor'un bir insanın ürettiği güç bir şehri aydınlatan yüz binlerce ampulü yakmak için gereken güce eşittir demek istediğini farz edelim.

İnsanlar besindeki enerjiyi hareket, ısı ve düşünceye dönüştürür. Enerji korunur. Gün içinde harcadığımız enerji yediğimiz besinden gelir. Besinden ortalama enerji alımı günlük 2500 besin kalorisidir. Bir besin kalorisi 4184 Joule enerjiye eşittir. 2500 besin kalorisi tüketen bir insan besinden enerji olarak bir günde yaklaşık 10,5 milyon Joule alır (2500 kalori x 4148 Joule). Kulağa çok geliyor. Ne var ki, bir gün 86.400 saniyedir ve bu yüzden bedenlerimizin enerjiyi dönüştürme *oranı* 10,5 milyon Joule bölü 86.400 saniye ya da yaklaşık 120 Watt'tır (1 Watt = 1 Joule bölü saniye olmak kaydıyla). Bütün bir şehri aydınlatmak bir yana dursun, bir insan yaklaşık olarak *bir* ampulünkü ile aynı güç oranına sahiptir.

İnsanlar, saniye başına bir ampulle –ışık saçmak ve ısınmaktan başka hiçbir şey yapmayan bir aletle– aynı miktarda enerji kullanarak konuşur, yazar, yürür ve severler. Bu hayret verici gerçek, insanlara kara çalmak şöyle dursun, insan bedeninin ne kadar verimli olduğunu kanıtlar. Ama daha da önemlisi, bu kadar azla bu denli çok şey yapabilen bedenlerimizin harikulade karmaşıklığının da bir kanıtıdır.

İnsanlar ve diğer canlılar enerji kaynakları değildir. Bizler, yüksek kaliteli enerjiyi besin biçiminde alıp çevreye düşük kalitede ısı biçiminde salan enerji tüketicileriyiz. Yemek yemeyi bıraktığımızda açlıktan ölürüz. Bu basit gerçeğin yeni bir yanı yok, fakat Rhonda Byrne'ın –"insanların kendi cezbedici enerjilerini yönettikleri"ni iddia eden– *Sır* (*The Secret*) adlı kitabı gibi milyonlarca adet satılan kitaplar bizi içimizde

atıl bekleyen enerji kaynakları bulunduğuna inandırır.* Bu düşünce neden bu denli inandırıcıdır? Bu yaşam kuvveti ya da enerjisi düşüncesi nereden çıktı?

Yaşamın özel enerjiler ya da kuvvetler ile dolu olduğu düşüncesi insanlığın kendisi kadar eskidir. Bugün insanların *Sır* (*The Secret*) gibi kitaplara ilgi duymaları, bir yaşam kuvveti düşüncesinin ruhumuzun derinliklerine kök salmasından olabilir. En azından yüz bin yıldır insanlar kaybettikleri ile birlikte mezarlara çiçekler, yiyecekler ya da aletler yerleştirerek yaşam ile ölüm arasındaki uçurumu aşmaya çalıştılar. Doğanın tamamı sürekli değişen, hareketli ve canlı göründüğünden, atalarımıza göre ölüm doğal olmayan bir durumdu.

Doğanın hareket ve değişim güçleri *anima* yani ruh ile ilişkilendirilmişti. *Canculık* (animizm), doğanın tamamının canlı olduğu ve ruhani kuvvetlerce yönetildiği inancı, yüzyıllarca varlığını sürdürdü ve yirminci yüzyılın bir kısmında bile saygıdeğer Avrupalı düşünce akımlarının bir bölümünü oluşturdu.** Bazı insanlar bugün hâlâ "sihirli" kristalleri ve mıknatısları sağaltım amacıyla kullanmayı sürdürür, çünkü bu cisimlerin yaşamı ve sağlığı etkileyen özel enerjileri olduğu-

---

* Rhonda Byrne, *Sır* (*The Secret*) (New York; Atria Books, 2006). Mutlaka, her şey enerjidir. Byrne'ın "insanlar, kendi çekim enerjilerini yönetirler" iddiasından sonraki cümlesi daha da yoldan çıkmış: "Siz bir enerji mıknatısısınız, yani her şeyi elektriksel olarak kendinize doğru enerjilendirirsiniz." Bu ifade çok az anlam taşır ve hiçbir fizik kitabında bulunmaz. Ama iş kitap basmaya gelince bilimsel anlam çok az önem taşır. Sonuçta, *Sır* (*The Secret*) milyonlarca adet satıldı.

Yaşama dair inanç ve bilgilerin tarihte izini sürerken kendimi Batı düşünü ve bilimi ile kısıtlayacağım. Niyetim diğer kültürlerin düşünce ve kazanımlarını azımsamak değil; ama Batı düşüncesi yaşamla ilgili düşünme yollarının pek çok örneğini sağlamaktadır. Ve Batı düşüncesi pek çok önemli dış etkiye maruz kalmış olmasına rağmen çağdaş bilim büyük ölçüde eski Yunanlılarla başlayan Avrupa düşünce tarihinin bir uzantısıdır.

na inanılır. Cancılıkta yalnızca hayvanlar değil aynı zamanda kayalar, rüzgâr, nehir de canlıydı. Böyle bir inanç düzeninde ölme kavramı çok fazla şey ifade etmemekteydi. Eski insanlar, ölen birinin aslında ölmediğine, ruhunun başka bir yere gitmiş olduğuna inanırdı. Ölüye bu yeni varoluş biçimi içerisinde faydalı olacak aletler ve armağanlar sağlamak önemliydi. Yaşayan varlıklar ile cansız madde arasında şu anda aşina olduğumuz ayrım çok sonra evrimleşti. Bu gerçekleştikten sonra çoğu şey (kayalar, su, hava) cansız olarak tanındı ve *canlı* açıklanmaya gereksinim duyan bir gizem haline geldi. Artık, yaşayan madde diğer tüm maddelerden ciddi anlamda farklı olarak görülmeye başlanmıştı ve dolayısıyla sıra dışı kuvvetler ya da bir ruh ile donatılması gerekiyordu. Bu gibi bir inanç düzenine *dirimselcilik* (vitalizm) diyoruz.

Dirimselcilik Yunanlarla, özellikle filozof ve bilim insanı Aristoteles (MÖ 384-322) ile başladı. Aristoteles için yaşam, cansız maddeden farklıydı çünkü bir "ruh"u vardı; "canlandırılmış" idi. *Canlandırılmış* sözcüğünü hareket halinde olmakla özdeşleştiriyor olmamız rastlantı değildir. Aristoteles'e göre yer değiştirme, gelişme ve canlının iç hareketlerini kapsayan amaçlı hareket, yaşamın en bariz özelliğiydi (ve bugün halen öyle bilinir).

Ruh Üzerine adlı kitabından anlaşıldığı gibi, Aristoteles ruh hakkında düşünmeye epey zaman harcamıştır. Ruhu tanımlamakla ilgili bir dizi sorun belirlemiştir: Ruh bir bütün müdür yoksa parçalardan mı oluşur? Atlar, köpekler ve insanlar için farklı ruhlar mı vardır? Ruhun bedenle ilişkisi nedir? Aristoteles ruhu bedenden ayırt etme sorununu fark etmişti: "Bütün bunlar beden ile ruh karışımının gösterişli halleri mi, yoksa içlerinde ruhun kendisine has olanlar var mı? ... ruhun, bedeni katmadan etken ya da edilgen olabileceği bir durum yok gibi görünmektedir."



Şekil 1.1. Demokritos. Çoğunlukla sakallı, güleç yüzlü bir düşünür olarak gösterilir. Bilim tarihinde son gülen kesinlikle o oldu. En nihayetinde atomlar hakkında büyük ölçüde haklı çıktı.

Fakat bu sorunu ortaya attığı halde Aristoteles, ruhun gerekliliği ile ilgili soruyu asla ele almamıştır. İşin aslı, kendisi böyle bir soruyu saçma bulurdu; o ve Yunan arkadaşları için ruhun varlığı su götürmezdi: "Ruh hakkında bilgi sahibi olmak ... genel anlamda gerçeğin geliştirilmesine ve, her şeyden öte, Doğa'yı anlamamıza büyük katkıda bulunur; zira ruh ... yaşamın ... özüdür."

Atomculuk

Lisede Yunan Felsefesi öğrendiğimde, ilkin Yunanların hatalı olduğu pek çok şeyi fark ettim. Ergen halimle, toprak ya da ateşi element olarak düşünmek saflık gibi görünmüştü. Gerçekte Yunanlar, Olimposlu tanrıları Zeus ve Hera'dan dört elementli doğa modellerine, çok büyük ilerleme kaydetmişlerdir. Yunanlar aynı zamanda düşünceleri bilimsel gözlemlere dayandıran ilk insanlardır. Filozof Miletoslu Anaksimenes (MÖ 585-529), havanın temel element olduğunu belirlemişti; çünkü yoğunluğu azaltılıp artırılabiliyordu. Bu düşünceyi buharlaşma, yoğunlaşma, kuruma ve ıslanma üzerine gözlemlerine dayandırmıştı. Yunan felsefesini yönlendiren diğer gözlemler arasında tohumların gelişmesi (Anaksimandros), nefes alıp verme (Anaksimenes), kayaçlardaki fosiller (Xenophanes), yaşam ve yüzerlik için suyun gerekliliği (Tales) ve

havada asılı tozun gelişigüzel hareketleri (Demokritos, Şekil 1.1) vardı.

Aristoteles bütün Yunan filozoflarının kuşkusuz en üretken (ve en bilimsel) olanıydı. *Ruh Üzerine*'de, kendisinden önce gelenlerin ruh gizemi ile ilgili düşündüklerinin kapsamlı bir özetini sunmuştur. Kadim filozoflar cılız deneysel kanıtlara dayanarak çağdaş düşüncelere şaşırtıcı derecede yaklaşan girişimlerde bulunmuşlardır: Aristoteles'e göre, filozof Demokritos ruhu itişip kakışan sayısız parçacıktan oluşan bir ateş olarak kurgulamış, bu parçacıklara da "atom" demişti. Demokritos, atomların süreğen hareketleri ile ilgili düşünceyi toz taneciklerinin gelişigüzel hareketlerini güneş ışınları altında gözlemleyerek edinmişti. Göreceğimiz üzere, atomların ve moleküllerin kesintisiz hareketleri, çağdaş yaşam anlayışımızda çok önemli bir rol oynar; bu, adını haklı biçimde *moleküler fırtına* koyabileceğimiz bir harekettir.

Ne yazık ki Aristoteles, Demokritos ve Pisagor'un düşüncelerini saçma bulmuştu. Ona göre, yer değiştirme atomların gelişigüzel hareketlerinin değil, düşünce ve iradenin sonucuydu: "Demokritos diyor ki ... atomlar ... sürekli yer değiştirmeleri sayesinde ... bedeni peşlerinden sürüklerler ve böylece onun yer değiştirmesini sağlarlar ... ruhun, hayvanlarda hareketi oluşturmasının bu yolla gerçekleşmediği itirazında bulunabiliriz; kasıt ya da düşünme süreci aracılığıyla gerçekleşmektedir."

Böylece, Yunan filozoflarından on dokuzuncu yüzyıl başlarında yaşamış biyologlara kadar yaşamı açıklama sorununa üç olası çözüm vardı: Tüm evrenin amacını belirleyen, kapsayıcı, evrensel bir ilke varsayın (cancılık); yaşamı maddeden ayırt eden, böylece amacı yalnızca yaşama ayıran özel bir yaşam kuvveti varsayın (dirimselcilik) veya amacı hepten yadsıyın (mekanizm, atomculuk). Bu yaklaşımların hepsinin

kendine özgü sorunları vardı. Cancılık, cansız ile canlı arasındaki belirgin ayrımı silmişti; dirimselcilik görünmez, keyfi bir kuvvet ileri sürmüş ve fazladan bu kuvvetin bedenle nasıl etkileşime girdiği sorusunu doğurmuştu ve atomculuk, yaşamın etkinliklerinden gelişme ve üreme gibi belirgin amaçlılık sergiliyormuş görünenleri açıklamaktan aciz görünüyordu.

Atomculuk, filozof Epikuros (MÖ 341-270) ile kısa bir geri dönüş yapmış ve daha sonra Romalı filozof Lucretius (MÖ 99-55) tarafından ünlü şiiri *Evrenin Yapısı*'nda (*De rerum natura*) diriltilmiştir. Evreni atomların hareketinin bir sonucu olarak açıklayan Epikuros "sapma" fikrini ortaya attı (bu gelişigüzel ani sapmalar olmasa atomlar düz, öngörülebilir yollarda ilerlerdi). Sapma, atomların nasıl bir araya toplandığı ya da birbirleri üzerinden sektiklerini açıklıyordu. Yaratılış, kendiliğindenlik, tesadüf ve hür iradeyi açıklıyordu. Sapma düşüncesi keyfi görünse de Epikuros, evrenin atomcu açıklamasının şans ile gerekliliğin bir karışımını gerektirdiğini anlamıştı.

Ne var ki, atomların gelişigüzel hareketini evrenin bariz amaçlılığı ile uzlaştırmanın zorluğu atomculuğu asırlarca başarısızlığa mahkûm etmiş ve yaşamı anlama çabamızı günümüze dek güçleştirmiştir. Terimler değişmiş ve biyoloji bilgisi daha saflaştırılmış olsa da ruh ile atomun savaşı yaşamın anlaşılmasında önemli yer tutmayı sürdürmüştür. Eski insanlar cancılık ile dirimselcilik arasında çoğu zaman bocalamışlardır. Aristoteles, yaşamın özel olduğunu gayet iyi anlamış ve dağların-taşların ruhu olduğunu öne sürmemiştir. Ne var ki hareketin bir amaca bağlı olduğunu düşünmüştür. Bir kaya düşmek "istiyordu" çünkü toprak elementinden yapılmıştı ve toprağa geri dönmek istiyordu. Diğer yandan, Stoacılar (Citiumlu Zenon tarafından MÖ 300 dolaylarında kurulmuş bir felsefe öğretisi) gizemli bir düzenleyici kuvvet

olan *pneuma* yani "nefes"in tüm varoluşa neden olduğu daha cancı bir dünyaya inanıyorlardı. Nefes, *Yıldız Savaşları*'ndaki "kuvvet"in eski hali gibiydi; tüm canlılar tarafından yaratılan kurgusal bir enerji alanıydı.

Hıristiyanlığın yükselişiyle hem Epikuros'un atomculuğu hem de Stoacıların cancılığı itibarsızlaştırılmıştı. İlk Hıristiyanlar için Platon'un maddi gerçekliğe değil de düşüncelerin deneyüstü dünyasına dayanan felsefesi çok daha makbuldü. Platon'un evreni rastlantının değil "neden"in sonucuydu. Platon felsefesi ile pişmiş gezgin vaiz (evanjelist) Yuhanna "Başlangıçta Söz vardı ve Söz Tanrı ileydi; ve söz Tanrı idi," diye yazmıştı. Yuhanna'yı takiben erken dönem Kilise ve özellikle Aziz Augustinus bu "Söz" ya da "neden"i Tanrı ile ve düşünceler dünyasını Tanrı katıyla eşitlemişti. Maddi dünya, asıl gerçeği yani Tanrı gerçeğini barındıran ruhani dünyanın yoz bir yansımasına dönüştürülmüştü.

Aristoteles'in Batı'da neredeyse bin yıllığına kaybolan pek çok yazılı eseri Müslümanlarca kurtarıldı. Eserleri, Batı felsefesine on ikinci yüzyılda yeniden girdi. Daha sonra üniversiteye dönüşen Paris, Oxford, Toledo ve Köln'deki erken dönem ilahiyat okulları mantıktan fiziğe, devlet idaresinden biyolojiye, Aristoteles'in sayısız eserinin barındırdığı kapsamlı bilgilerle karşılaştıklarında afallamışlardı. Platon'un aksine, Aristoteles maddi dünyayı esas ve düşünceleri yalnızca gözlenen nesne ve olayların genellemeleri olarak görüyordu. Bunda, bilim insanlarının bugün inandığı şeye oldukça yaklaşmıştı.

Düşünceleri zamanın yerleşik yeni-Platoncu teolojisini tehdit eden Aristoteles göz ardı edilemezdi. Onun felsefesi, reddedilemeyecek kadar kapsamlı ve iyi düşünülmüştü. Aristoteles'in felsefesi ve bilimini Hıristiyan dinbilimi ile bağdaştırmak üzere yeni bir düşünce sistemi, *skolastik felsefe*

doğdu. Aristoteles'in kitaplarındaki her şey Hıristiyan inançlarına ters değildi. Örneğin, atomculuk ve ona eşlik eden rastlantının evrende önemli bir oyuncu olduğu düşüncesini açık bir biçimde reddediyordu. Aristoteles için en önemli kuvvet amaçtı. Hareket de bir açıklama gerektiriyordu ve atomların açıklanmamış, gelişigüzel hareketlerine dayandırılamazdı. Bunun yerine Aristoteles, on ikinci yüzyıl skolastik düşünürlerinin en ünlüsü olan Aziz Thomas Aquinas'ın Tanrı'yla eşleştirdiği, "ilk hareket ettirici"yi öne sürdü. Canlı varlıklarda ilk hareket ettirici ruhtu. Aristoteles'e göre "ruh etken, beden edilgendir ve beden hareket ettirilir ve ruh hareket eder" idi.

Aristoteles'in ruh kavramı günümüze kadar gelmiştir ve Katolik Kilisesi'nin ilmihalinde görülür: "'Ruh' aynı zamanda insanın içinde büyük değerde olan, sayesinde her şeyden önemlisi Tanrı'nın görüntüsünde bulunduğu, en derin yönüne de göndermede bulunur: 'ruh', insanın içindeki ruhsal ilkeyi belirtir. Ruh ile bedenin birliği o kadar derindir ki ruhu bedenin 'biçimi' olarak görmek gerekir: yani, maddeden yapılmış bedenin bir canlıya, insan bedenine dönüşmesi tinsel ruhundan ötürüdür; tin ve madde, insanda iki birleşmiş doğa değildir, daha ziyade bunların birleşimi insan doğasını ortaya çıkarır." Ruhun, bedenin biçimi olduğu ve onu canlı kıldığı düşüncesi Aristoteles'ten gelir. Katolik ilmihali, *ruh* sözcüğü için iki anlam barındırır: Aristoteles'in can veren "biçim"i ve bir "tinsel ilke". Her ne kadar bu iki anlam çokça eş tutulsa da temelden farklı kavramlardır.

Çağdaş fizik, kimya ve evrim, bir hücre ya da canlıyı neyin yaşar kıldığını ve neyin onlara "biçim" verdiğini açıklayabilir. Bedenler hücre DNA'sına işlenmiş, evrilmiş bir yazılıma göre işleyen, etkileşen hücrelerden oluşan, karmaşık topluluklardır. Biçim, hareket, beslenme ya da üremenin kaynağı olarak bir ruha (Aristoteles'in düşündüğünün aksine) gerek

yoktur. Ruh kavramı, ikinci anlamında yani insanın cisimsiz, özgün bir niteliği olarak; bir canlının kişilik, onur, zekâ, zihin ve başkalarıyla olan bağlarını kapsayan yönlerinin kısa ifadesi olarak akla uygun gelebilir.

Aristotelesçi düşüncelerin Hıristiyanlıkça benimsenmiş hali, başta epey radikal görünse de, bilime yüzyıllarca deli gömleği giydirmiştir. Yunan filozoflarının tartışmayı buyur ettiğini düşünecek olursak, Aristoteles'in, kendi düşüncelerinin şimdi dinsel öğretiler olarak ele alındığını öğrense dehşete kapılacağını varsaymak akla yatkındır.

Tıp ve Büyü

Yunan filozoflarının bilimsel gözleme olan düşkünlükleri kadar dirimselci düşünceleri de uygulamalı yaşam bilimi olan tıbba derinden etki etmiştir. İlkin büyü ve inançla sağaltıma dayanan tıp, Hipokrat ve Aristoteles dönemindeki Hipokratçı düşünürlerce daha akılcı temellere oturtulmuştu. Evrenin kavranma biçimine bağlı olarak tıp, akılcı bir bilim haline gelmiştir. Yunan (ve daha sonra Roma) tıbbı, kitapları Batı tıbbına bin dört yüz yıl egemen olan Galen'in (MS 129-217) düşüncelerinde doruğa ulaşmıştı. 1559'da Londra Tıp Okulu üyelerinden biri, meslektaşları önünde Galen'i eleştirmeye cüret edince toplum önünde bu sözlerini geri almak zorunda kalmıştı.

Galen'in, Aristoteles felsefesini ve Stoacı düşünceleri temel alan tıbbı ciddi ölçüde dirimseldi: Genel hatlarıyla, Galen'in bedenin yaşamsal sıvıları (ya da "salgı") dediği, dört Yunan elementinden hareket ediyordu. Galen, havada dolaşan "yaşam özü"nün yani "nefes"in bedene akciğerlerden girdiğine inanıyordu. Kalpte nefes, kan (dört hümordan biri) ile karışarak hareketten sorumlu olan "yaşamsal özler"i oluş-

turuyordu. Ruhun bir parçası olan bu yaşamsal özler, Galen'e göre kan hava ile karıştığında kalpte üretilen ısı ile ilişkiliydi. Hava, ısı ve ruh arasındaki bağlantılar eski Yunan'dan bilim çağının şafağına kadar yinelenmiştir. Ve göreceğimiz üzere, ısıyı "yaşam gücü" olarak düşünmek gerçeklikten düşündüğünüz kadar uzak değildir.

Kadim tıp, gözlemler (Galen'in durumunda çoğunlukla hayvanların kesilerek incelenmesi) ile evrenin felsefi bir kavranışını birleştirmişti. Kadim tabipler için yaşam ısı ile ilişkiliydi ve ısı dört geleneksel elementten biri olan ateşten ortaya çıkardı; onun da elementlerden bir diğeri olan hava ile beslenmesi gerekirdi. Bu tür bir akıl yürütme, doğru yanıtlara bazen yaklaşmıştır; ama en nihayetinde eskiler, kendi felsefi yeğlemelerinin kurbanları idiler. Çağdaş bilimin yöntemlerinin (kontrollü deneyler, önermelerin sınanması ve nicel savların) yokluğunda tıp bin dört yüz yıldan uzun süre ne uzamış ne kısalmıştır.

Yeniden Doğuş (Rönesans) sırasında, insan doğasının incelenmesi sahneyi kapınca tıp, gökbilim ve fizik sonunda Aristotelesçi ve Galenci düşüncenin kafesinden kurtuldu. Yeniden Doğuş, bilginlerin kadim el yazmaları için dünyayı taradığı bir yeniden buluş ve yeniden değerlendirme dönemiydi. Yeniden Doğuş tabiplerinin Galen ve Aristoteles'ten kopmasına olanak veren çağdaş bilimsel yöntemlerin değil, kadim *büyülü* el yazmalarının bulunuşudur. Kadim büyücülerin savları insan bedeni ile evrenin bütünlük içinde iletişimine dayanıyordu ve simyacı tıbbın gelişimine yol açtı. Örneğin, Benedikten keşişi ve simyacı Basil Valentine *Doğal ve Doğa Üstü Şeylere Dair* adlı kitabında "Ödem, verem, damla, taş, sara, inme, cüzzam ya da genel olarak ne deniyorsa her derde derman Cıva Özü" tarifi vermiştir. Bu, inmeyi iyileştirmektense tetiklemesi kesinlikle daha olası bir tariftir.

Bu yeni tıbbın başlıca savunucusu, asıl adı Phillipus Theophratus Bombastus von Hohenheim olan, İsviçreli tabip Paracelsus (1493-1541) idi. Hohenheim kesinlikle tumturaklı sözler sarf eden biriydi: "Size şunu söylememe izin verin: ensemdeki minik kılların her biri siz ve sizin yazmanlarınızdan daha bilgilidir ve ayakkabı bağcıklarım sizin Galen'inizden ve İbni Sina'nızdan daha bilgilidir ve sakalım sizin bütün tıp fakültelerinizden daha fazla deneyime sahiptir." Her ne kadar Paracelsus'un simyacı tıbbı çoğu zaman Yunan tıbbından daha iyi olmasa da Yunan geleneğinden kararlı kopuşu ve kimya kullanmanın üzerinde durması ileri yönde önemli adımlardı. Paracelsus kulağa bazen şaşırtıcı bir biçimde çağdaş geliyordu: "Tıp yalnızca bir bilim değil; aynı zamanda bir sanattır. Hap vermek ve sarıp sarmalamaktan ibaret değildir; kılavuzluk etmeden önce anlaşılmaları şart olan, yaşamın tam da içindeki süreçlerle uğraşır."

Tıbba yönelik çeşitli yaklaşımlar (geleneksel ve bitkisel tıp, salgıların dengesi üzerine kurulu Galenci tıp ve Paracelsus'un yeni, simyacı tıbbı) bir arada var oldular ve bize bugün çoklukla sağlam görünmeyen zeminlerde çokça tartışıldılar. Yine de *tartışılmaları* çağdaş eleştirel bilim çağının önünü açmıştır.

Mekanistik Felsefe

Kadim ve simyacı tıp arasındaki savaş doruk noktasında iken yeni bir düşünce belirdi: insan bedenlerinin yalnızca birer makine olduğu ve bedenin işleyişinin ayrı ayrı parçaların çalışmasından ibaret olduğu düşüncesi. Mekanistik yaşam görüşünün kazara kahramanlarından birisi, İngiliz tabip William Harvey (1578-1657) idi. Harvey halen Galen'in "yaşam özleri"ne inanan tam bir dirimselciydi. Fakat kalbin gerçek işlevini ilk anlayan kişi Harvey idi. Galenci tıbba göre kalp, kandaki ısının kaynağı ve kanın, "yaşam özlerini" oluştur-

mak üzere hava ile karıştığı yerdi. Galen, atardamarların kalpten, toplardamarların karaciğerden çıktığına inanıyordu. Atardamarlar ve toplardamarlar, yalnızca kalpteki gözenekli duvar (septum) ile birbirine bağlanan ayrı düzeneklerdi.

Kalp duvarının gözenekli yapısını destekleyen çok az kanıt bulunmasına rağmen, az sayıda tabip Galen'in kuramlarını eleştirecek kadar cesurdu. İnsan anatomisi üzerine en etkili ve ayrıntılı kitapların bazılarının yazarı olan ünlü tabip Andreas Vesalius (1514-1564) kalpte herhangi bir gözeneklilik bulamamıştı; yine de, eseri *De fabrica*'nın ilk basımında Galen'e uymuştur: "Duvar, kalbin en yoğun malzemesinden meydana gelir. Her iki yanında çok sayıda çöküntü barındırır. Bunlardan hiçbiri, duyularla algılanabildiği kadarıyla, sağ karıncıktan sol karıncığa uzanmaz. Görünmez gözeneklerden ... kanı geçiren Yaratan'ın sanatına şaşıyoruz." Ama, kitabının ikinci baskısında, Vesalius biraz da pişmanlıkla Galen'in kuramının doğru olmasının hiçbir yolu olmadığını kabul etmek zorunda kalmıştı.

Şimdi, kendinden önceki Vesalius gibi Padova Üniversitesi'nde okumuş Harvey için izlenecek yol açıktı. Harvey'in Galen'i yanlışlama yolu son derece etkiliydi: İnceleme ve gözlemlerin ötesine giden Harvey daha önce görülmemiş ve güçlü, basit, *nitel* bir sav kullandı. Eğer kanın kaynağı kalp ise; kalpte üretilen toplam kan miktarı, kalbin hacmi ile atma hızı çarpılarak kolaylıkla kestirilebilirdi. Bu, saatte 245 litre kan demek olurdu. Bu korkunç bir miktardı. Hepsi nereye gidecekti? Tek mantıklı açıklama, sınırlı bir miktar kanın bedende dolaştığı ve kalpten atılanın kısa bir süre sonra kalbe dönmesi gerektiğiydi. Harvey'in sayısal akıl yürütmesi, yaşam bilimleri tarihi üzerine çok büyük etki yapmıştır: doğanın geri kalanı gibi yaşam da nitel çözümlemeye ve özenli deneylere yanıt verebilirdi.

Çağdaş bilimsel yöntemlerine rağmen, Harvey'in çalışmaları Paracelsusçu tabip Robert Fludd'ın (1574-1637) övgüsünü almıştır. Fludd, yıldızların büyük âleminin insan bedeninin küçük âleminde yankı bulduğu yönündeki simyacı görüşlerine kanıtı kan dolaşımında gördü: Gezegenlerin güneş çevresinde dönmesi gibi kan da kalp etrafında dönüyordu. Ama Harvey'in buldukları daha çağdaş bilim insanları ve filozoflarca da onaylandı. Özellikle Rene Descartes (1596-1650) İnsan Bedeninin Tarifi'nde Harvey'i güçlü bir biçimde desteklemiş ve bedenin bir makine olduğunu savunmuştur.

Descartes'ın felsefi düşünceleri mekanistik bir yaşam görüşüne doğru atılmış önemli bir adımdı. Hayvanlar üzerinde (bazen tüyler ürperten) deneyler yaparak, bedenin pompaları ve boruları olan bir makine gibi davrandığının farkına vardı. Bedenin, bütün gizemli kuvvetlerden arındırılmış mekanistik bir bakış açısı ile incelenmesini savunan ilk doğa filozoflarından biriydi. Bu düşünceler, dini bütün birisi olduğu halde, Descartes'ın başını Katolik Kilisesi ile belaya sokmuştu. Descartes, doğada gördüğü ile Katolik ilahiyatını bağdaştırmak için elinden geleni yaptı. Çözümü, benimsediği mekanistik dünya görüşü ile "zihin" arasında ayrım yapmaktı. Beden tamamen makine iken zihin ya da can, ruh ve tansık alanına kalacaktı. Bir zamanlar bitkilerin büyümesinden insan zihnine kadar her şeyi açıklayan ruh şimdi yalnızca zihinle sınırlanmıştı. Geri kalan her şey hareket halindeki madde idi.

Ortaçağda atomculuğun neredeyse tamamen baskılanmasından sonra ilk çağdaş atomcular Hollandalı felsefeci ve bilim insanı Isaac Beeckman (1588-1637) ve Fransız Cizvit rahip Pierre Gassendi (1592-1655) idi. Descartes'ın öğretmeni ve arkadaşı Beeckman, o sırada, Avrupa'nın en eğitimli adamları arasında görülüyordu. Gassendi, atomculuğun yeniden canlandırılmasını savunmakta Beeckman'ı izledi ve Epikür-

cü atomculuğu Katolik Kilisesi'nin hoşuna gidecek hale getirmek için çabaladı. Gassendi, Descartes'ınkinden değişik bir yaklaşıma sahipti: Descartes madde ile ruhu ayırmak için *ikilik*'i yaratırken Gassendi, atomlarını Tanrı'nın gücü ile canlandırarak cancı bir evren görüşüne dönmüştü. Eğer yaşamdan atomlar sorumluyduysa gerekli akıl onların içinden gelmeliydi. Ve atomlara bu aklı kim vermişti? Tabii ki Tanrı.

Daha sonra bu düşünce, atomları düşüncenin atomik birimleri olan "zerreler" (monads) ile değiştiren Alman felsefeci Gottfried Leibniz (1646-1716) tarafından kabul görmüştür. Bununla birlikte, daha sonraki maddeci filozoflar Tanrı'yı tamamen bir kenara bırakacak ve bunun yerine atomlara yaratılmış olmayan bir amaç bahşedeceklerdi; bu, Aydınlanma çağında Fransız filozof Voltaire'in (1694-1778) gülünç bulduğu bir düşünceydi. Voltaire'e göre, atomların özünde bir çeşit yaratılmamış akıl bulunduğu düşüncesi saçmaydı. Tanrı'ya inanmak daha basit değil miydi? Filozoflar, iki bin yıllık tartışmadan sonra, Aristoteles ve Demokritos'un çok ötesine geçememişler gibi görünüyordu.

Ama bu, haksızlık olurdu: Mekanistik dünya görüşü, atomculuğun yeniden dirilmesi ve akılcı irdeleme ile deneyin birleşimi bilim tarihindeki en etkili dönemlerden birinin, on altıncı yüzyılın sonlarından on sekizinci yüzyıla kadar süren bilimsel devrimin temeliydi. Bu dönemde çağdaş bilim doğmuş ve doğa filozofları bilimi gizemcilikten (mistisizm) ayırmaya başlamışlardı. Bu dönemin öne çıkan isimleri Galileo Galilei (1564-1642) ve Isaac Newton (1642-1726) idi. Hem Galileo hem de Newton atomcuydular ve doğa ile ilgili yeni gerçekler bulmak için deneye ve akıl yürütmeye başvurmak gerektiğine inanıyorlardı. Newton'un, atomların büyük ölçekli maddeyi nasıl oluşturduğu ile ilgili Lucretiusçu düşünceleri vardı; maddenin daha büyük parçacıkları oluşturmak üzere

birbirine yapışan küçük, sert parçacıklardan oluştuğunu düşünüyordu. Bu düşünce malzemelerin nasıl parçalanabildiğini açıklıyordu; cisimler "katı parçacıkların ortalarından değil de bu parçacıkların yan yana dizildiği ve sadece birkaç noktada birbirlerine dokundukları yerden" ayrılıyorlardı.

Newton, Yeniden Doğuş gizemciliği ile çağdaş bilim arasındaki eşikte duruyordu ve simya ile ilahiyata dair muğlak uğraşlarına çokça değinilmiştir. Fakat simyacılığı, deneysel yöntemlere değer vermesine ve atomculuğunu doğrulamasına neden olmuştu. Newton, gizemcilik ile bilim arasındaki farkı bilir görünüyordu ve simyası ile ilahiyatını bilimsel ve matematiksel yazılarından özenle ayrı tutmuştu. O kadar ki, yeni gizemli kuvvetlerin savunuculuğunu yaptığını düşünenlere karşı bilimsel buluşlarını savunmuştur: "Bu ilkeleri nesnelerin özel biçimlerinden doğan esrarlı Nitelikler olarak değil; nedenleri henüz bulunmamış olsa da gerçeklikleri bize olaylar sayesinde görünen nesnelerin kendi biçimlerini almalarını sağlayan genel doğa yasaları olarak görüyorum."

Bilimsel devrim sırasında mekanistik felsefe ve yeni atomculuk, bilim insanlarını canlı dünyaya daha yakından bakmaya zorladı; ve optikteki gelişmeler doğadaki "atomlar"ın aranması için yeni araçlar sundu. Mikroskop, 1500'lerin sonlarında Felemenk gözlük üreticisi Zacharias Janssen ile oğlu Hans tarafından Hollanda'da icat edilmişti. Mikroskoba yapılan iyileştirmeler Galileo (1609) ve Cornelius Drebbel (1619) tarafından tamamlanmıştı. Galileo, 1614'te, sineklerin "kürk"ü olduğunu gözlemlemişti. Başkaları, akarları gözlemledi ve sinek gözünü incelediler. Mikroskopik gözlemlere dair erken dönem kitaplardan en ünlüsü Hooke'un 1665'te yayımladığı *Micrographia*'dır. Usta bir deneyci olan Robert Hooke (1635-1703), pirelerden idrardaki "çakıllar"a kadar her şeye bakmak için kendi ev yapımı mikroskobunu kullan-

dı. Erken dönem mikroskopçular, Hooke'un "doğanın küçük makineleri" dediği şeyleri pirelerin bacaklarından tek hücreli hayvanlara kadar her yerde keşfettiler. Hücreleri ilk defa şişe mantarında keşfeden Hooke'tu. Bundan kısa bir süre sonra ilk hayvan hücreleri, kırmızı kan hücreleri, Antonie Philips von Leeuwenhoek (1632-1723) tarafından keşfedildi; ama bu hücrelerin canlıların en küçük yapı birimi olduğunu ne o ne de Hooke fark etmişlerdi.

Hooke ve çağdaşları, en küçük "hayvancıklar"dan insan bedenine kadar tüm yaşamın büyüleyici bir düzenekler seçkisi olduğunu keşfettiler. Gitgide daha küçük birimlerin aranması iki yüz yıldan fazla sürerek 1800'lerin ortalarında hücre kuramına önayak oldu. Mekanistik felsefe, Hooke ile mikroskopçu yoldaşlarını canlıları oluşturan parçalara dikkatle bakmaya zorladı. Gördükleri, mekanistik yaşam görüşlerini doğruladı. Küfün gelişimini gözleyen Hooke şöyle demişti: "Bu ilkel yaşam ve bitki çeşidinin doğasına bakabildiğim kadarıyla, beni saf mekanistikten başka uygun bir neden olduğuna ikna edebilecek en ufak bir sav bulamadığım sonucuna varmak durumundayım."

L'homme machine

Bazıları ne zaman çenelerini kapatacaklarını bilmez.

Breton'da doğmuş tıp doktoru ve radikal Aydınlanma filozofu Julien Offray de La Mettrie (1709-1751) bunu kesinlikle bilmiyordu (Şekil 1.2). İlk felsefe kitabı *Ruhun Doğal Tarihi* (1745) küfür olduğu gerekçesiyle Paris'te yakıldıktan sonra, La Mettrie bu kez Fransa'nın pek de yetkin olmayan tabiplerine bir saldırıya girişti. Hem tıbbi hem de dini kurumları enikonu kızdırdıktan sonra Hollanda'ya kaçtı. Daha sonra, saldırılarını 1747'de tabipleri hedef alan *Kindar Fakülte* ve rahipleri



Şekil 1.2. Julien Offray de La Mettrie. Bir diğer güleç yüzlü, maddeci düşünür; gerçi Demokritos'un aksine onun sakalı yok.

hedef alan İnsan Makinesi (*L'homme machine*) adlı kitaplarla sürdürdü. Artık Hollanda güvenli değildi ve La Mettrie, Berlin'de Büyük Friedrich'in yanına sığındı. Prusya kralı Fransızları ve Aydınlanma'yı seviyordu ve Aydınlanmacı olmakta La Mettrie'yi geçemezdiniz.

La Mettrie, *L'homme machine*'de çağdaşlarını bu kadar kızdıracak ne yazmıştı?

La Mettrie tıp doktoru unvanını Reims Üniversitesi'nden aldıktan sonra Fransız Ordusu'nda tabip subay olarak hizmet etmiş ve bir dizi kanlı çarpışmaya katılmıştı. Bu deneyim sonucunda, savaşın katliamına karşı derin bir tiksinti geliştirmiş, vahşetin ve yaralanmanın insan zihnine neler yapabildiğini görmüştü. Ruhun kısımları olması gereken akıl yürütme ve duyguların yaralanma sonucu tamamen değişebildiğini fark etmişti. Bu, Descartes'ın ruh için bulduğu son sığınak olan zihnin en sonunda saf düzenekle açıklanabileceğini açıkça göstermiyor muydu? La Mettrie'nin daha dindar çağdaşlarının gücenmesine şaşmamak gerek.

Kışkırtıcı yazıları yüzünden La Mettrie bazen Aydınlanma'nın haylaz oğlanı olarak görülür. Pahalı sülün ezmesini çok fazla yemekten öldüğü dedikodusu da saygınlığına katkıda bulunmamıştı (gerçi gıda zehirlenmesinden ölmüş olabilir gibi görünüyor). Ne var ki, metinlerinin hırçın kisvesi ardında düşünceli bir filozof ve mekanistik felsefenin en uzlaşmaz temsilcilerinden biri vardı.

La Mettrie'nin kışkırtıcılığı ve filozofluğu, bilim insanlığından daha iyiydi. Ama onu, bunun için suçlamamız zor: Üreme ve "irkilebilirlik" (sonraki paragrafa bakınız) ile ilgili açıklamaları bize saf ve gülünç gelse de o, bunları simya ve eski Yunan düşüncelerinin hâlâ yaygın olduğu bir zamanda insan fizyolojisi hakkında sahip olunan az miktardaki bilgiye dayandırmıştı. Ama felsefesi böyle ayrıntılara dayanmıyordu.

En bilinen eseri *L'homme machine*'in kalbinde iki gözlem yatıyordu: Birincisi, bedenin ve zihnin işlevleri fiziksel etkilerle ciddi biçimde değiştirilebiliyordu ve dolayısıyla bunlardan bağımsız olamazdı. İkincisi, kas gibi canlı dokular bedenden ayrıldığında dahi kendi başlarına hareket edebiliyordu. La Mettrie zamanında yapılan deneyler, ayrıştırılmış dokuların "irkildikleri" (uyarıldıkları) zaman hareket edebildiklerini göstermişti. Bu sözüm ona irkilebilirlik La Mettrie'ye yaşamın "doğasında olan amaçlı hareket kuvvetleri"ni işaret etmişti. İrkilebilirliği savlarının merkezine koyup on örneklik bir liste hazırlamıştı; bunlardan bazıları, kafasız tavukların çılgınca çırpınması gibi, oldukça korkunçtu. La Mettrie, bu gözlemlerin ışığında bedenin veya zihnin işlevleri ile fiziksel doğalarını birbirinden ayıramayacağımız sonucuna vardı. Bunun yerine; işlevler, fiziksel ve mekanik yapının sonuçları olmak zorundaydı.

La Mettrie'nin ruhu yadsıması tanrıtanımazlıkla suçlanmasına neden oldu. (Bu, Kilise öğretisine karşı seslerini yük-

selten filozofların hepsine yapılan olağan bir suçlamaydı.) Ama o, daha çok samimi bir bilinemezci (agnostik) idi: "Ulu bir varlığın bulunup bulunmadığını sorgulamıyorum; aksine, bana göre onun bulunması daha olası. Ama bu, herhangi bir dinin bütün diğerlerine karşın doğru olması gerektiğine kanıt oluşturmaz; bu, çok sınırlı uygulama sunan kuramsal bir doğrudur." Ona göre, bir yemek "ruh"u mutlu ve memnun edebilirken ve "acımasız açlığın bizi ne tür aşırılıklara itebileceği"ni görüyorken ruh hakkındaki doğaüstü ve dini tahminler pek işe yaramıyordu. La Mettrie, bıyık altından gülerek, "Birileri zaman zaman ruhumuzun midemizde olduğunu söyleyebilir," gözlemini yapıyordu. Açlık, yaralanma, ilaçlar ve uykunun insanların zihnini etkilediğini gözleyerek her ne kadar nasıl işlediğini ayrıntısıyla açıklayamasa da ruhun yalnızca bedenin bir parçası olduğuna emin olmuştu: "Düzeneğini keşfetmeye çalışarak zaman harcamak ahmaklıktır. ... Maddenin nasıl harekete geçtiğini bulmanın imkânı yoktur."

La Mettrie, düzenli maddenin nasıl hareket ettiğini bulmanın "imkânı yoktur" derken yanılıyordu; ama ruh, bedenin fiziksel haline bu denli bağımlı olduğundan bizi canlı kılmak için Aristoteles'in inandığı gibi doğaüstü bir ruha büyük olasılıkla gerek olmadığı konusunda kendisiyle anlaşabiliriz. La Mettrie "ruhun becerileri"nin açık bir biçimde "beynin ve tüm bedenin belirli bir biçimde düzenlenmesi"ne dayandığı sonucuna varmıştı. Bu bakımdan ruh, bedenin düzenlenmesinden öte bir şey değildi ve ayrı bir kavram olarak boştu. Birisinin bedenin hareketlerini açıklamak için ruha gerek olmadığını özgürce kabul edebilmesi iki bin yıl almıştı.

La Mettrie'nin bilinemezciliği onu bilimsel yönteme modern gözlerle bakmaya (gerçi çağdaş bilim insanları daha diplomatiktir) ve gereklilik tarafından yönetilen doğayı biraz dindarca bir hayranlıkla gözlemeye itmiştir. "[Y]apılmış her

şey için fiziksel nedenlerin bulunduğuna inanmak neden saçma olsun" diye düşünüyordu. "Bir Tanrı'ya sığınmak zorunda kalmamızın sebebi, nedenler hakkında hiçbir şey bilmeyişimiz" değil miydi? Ona göre, yaşamın ve zihnin gizeminin yanıtları şansta ya da Tanrı'da değil, doğada yatıyordu.

La Mettrie'nin şansı reddetmesi, Darwin öncesi dünyanın ruh haliyle çok yakından ilişkiliydi. Yaşam dediğimiz düzenli madde durumunun ortaya çıkışında şansın nasıl bir payı olabileceğini görmek zordu. La Mettrie, yaşamın tamamıyla fiziksel bir açıklamasının olabileceğine inanıyordu; ama mekanistik bir açıklama, yaşamın daha önceden din tarafından açıklanmış bütün yönlerine açıklık getirmek zorundaydı. Tanrı "gereksiz bir önerme" haline gelince, doğa bu boşluğu doldurup yaşamı ve insan neslini gereklilikten ötürü üretmek zorundaydı. Dönemin çok tutan düşüncelerine bel bağlayan diğer açıklamalar gibi mekanistik felsefe de canlıları saatler gibi mekanik düzeneklerle karşılaştırıyordu.* Saatler, iyi bakıldıklarında, hiçbir şeyi şansa bırakmazlar; gerekliliğin elle tutulur örnekleridirler.

La Mettrie'ye göre doğa, basitten karmaşığa pek çok düzeyde işliyordu. Fiziksel açıklamalara koyulan yapay engellere karşı çıkmış ve fizikle ötesinin okunamadığı bir duvarın var olduğu düşüncesini reddetmişti. Düşen bir kaya ile insan zihni arasındaki ayrım, değişik maddeler ya da değişik doğa yasaları değil de karmaşıklıktaki çok büyük artış yüzündendi. Ve bu karmaşıklık, bizi insan zihninin nasıl çalıştığını tama-

* Diğer örnekleri buhar makineleri (termodinamik) ve kimya ya da bilgisayarlara (bilgisayar olarak beyin) dayanan açıklamalardır. Bu açıklamaların hepsi yaşamın bir yönünü en azından mecazen yakalamıştır, ama en sonunda başarısız olurlar ve yalnızca tedbiri elden bırakmamak kaydıyla kullanılmalıdırlar. Kalp bir saat ve beyin bir bilgisayar değildir.

men açıklamaktan alıkoymuşsa da bu başarısızlık, anlayışımızdaki bu boşluğa bir ruh ya da Tanrı sokuşturmamızı haklı çıkarmazdı. "Tıpkı belirli fizik yasaları dahilinde denizin gelgit yapmamasının olanaksızlığı gibi aynı ... hareket yasaları ... görebilen gözler, duyabilen kulaklar, hissedebilen sinirler, düzenlenişlerine göre konuşabilen ya da konuşamayan diller oluşturur ve en sonunda düşünce organını üretirler. Doğa, insan makinesinin içinde, düşünceleri barındırabilen ve yenilerini üretebilen başka bir makine yapmıştır ... görmeksizin yapmıştır görebilen gözleri; düşünmeksizin yapmıştır düşünen bir makineyi."

Hayvan Isısı

Mekanistik felsefe hareket sorunuyla, dirimselciler de büyüme ve üremeyle oldukça iyi başa çıkabilmişken hayvanlar tarafından ısı üretimi sorunu kırılmayı bekleyen bir çetin ceviz olarak kalmıştı. Isı neden bu kadar önemliydi? Çoğu canlı ılıktır ve öldüklerinde soğurlar. Kuşkusuz, ısının yaşamla bir ilgisi vardı. Pisagor ve Demokritos zaten ısıyı ya da daha kesin bir biçimde "doğuştan gelen ısı"yı, yaşamı anlamanın anahtarı olarak görmüşlerdi. Eski Yunanlar için ısı sorunu yaşamın gizeminin (tam anlamıyla) kalbindeydi. Kalpte bir tür ateşin var olduğuna ve kalpteki ateşin soğutulup dumanın çekilmesi için akciğerlere gerek olduğuna inanıyorlardı. Platon, *Timaios* adlı eserinde "Her hayvanın içinde en sıcak kısım kanın ve damarların çevresidir; bu, dış kısımları havadan oluşurken kendisi ateşten dokunmuş gevşek bir sepete benzettiğimiz, içsel bir tür ateş pınarıdır." Bu düşünce yüzyıllarca sürüp gitti; Harvey bile kalbin ısı kaynağı ve kendi keşfettiği kan dolaşımının ısıyı bedene dağıtmanın bir yolu olduğuna inanıyordu.

Bu gibi düşünceler gözlemlerden doğan mantığa uygun çıkarımlara dayanıyordu: Kuşkusuz, kalp bedenin merkezine yakın bulunuyordu (soba kurmak için iyi bir yerdi) ve ılık, yaşam verici kanı bedene dağıtıyordu. Kalbin bu ısıyı nasıl ürettiğine gelince, ısının genelde ateşle ilgili olduğu anlaşılıyordu. Bu yüzden, kalpteki bir tür "yavaş ateş", bedenin ısısını üretiyor gibi görünüyordu. Eskiler yaşamı ısıtan yakıtın besin olduğunu da doğru tahmin etmişlerdi. " Alev yağı nasıl tüketiyorsa bizim ısımız da [besini] öyle kullanır," diye gözlemlemişti Galen.

Galen ve eskiler, hem ateşin hem de yaşamın havanın yokluğunda sönüp gideceğini biliyorlardı; ama nedenini bilmiyorlardı. Galen, "Bu durumlarda (havasız kaldığında) ateşin neden söndüğünü bulabilseydik, hayvanlardaki ısının solunumdan nasıl bir yarar sağladığını da belki bulabilirdik," diye yazıyordu. Gelecekteki araştırmalara yol gösterecek bu taslak doğa filozofları tarafından bin beş yüz yıl sonrasına kadar ciddiye alınmamıştı. On altıncı yüzyılın başlarında doğuştan gelen ısı ile ilgili dirimselci düşünceler hâlâ kol geziyordu. Fransız tabip Jean-François Fernel (1497-1558) doğuştan gelen ısının bedene dölet bir bireye dönüştüğü zaman girdiğine inanıyordu. Doğuştan gelen ısıyı dinsel ruh düşüncesi ile karıştırıyor görünüyordu. Mekanistik açıklamaları ısının kalpteki işlevi ile ilgili tahminde bulunduğunda onu yanlış yola saptırmış olsa da ısıyı bilim dünyasına geri getirme şerefi Descartes'a bahşedilebilir. Harvey'in kan dolaşımına inanırken, kalbin hareketlerinin kas kasılmalarından değil de kanın kalpteki yüksek ısıdan dolayı genleşmesinden kaynaklandığına inanıyordu.

Isının yaşamın temel ilkesi olmadaki önceliğine, kurbağaların oldukça soğuk ama aynı zamanda da oldukça canlı olduklarına dikkat çeken Belçikalı tabip Jan Baptist van Hel-

mont (1579-1644) meydan okumuştu. Dahası, hayvanlar ısı onları terk edince ölmüyordu; hayvanlar ölünce ısı onları terk ediyordu. Van Helmont, Paracelsus'un geleneğine uygun olarak, kimyasal açıklamaları seviyordu ve bu yüzden ısıyı bu tür süreçlerin nedeni olarak değil bedendeki kimyasal süreçlerin sonucu olarak görüyordu. Isının doğuştan geldiğini, yani bir ruh gibi canlılara ait içsel bir özellik olduğunu savunan eskilerden ayrılmıştı. Van Helmont ısıyı, doğru nedenler belirlenebildiği sürece, açıklanabilir bir olgu olarak görüyordu.

Galen'in sorusunu yanıtlamak için tasarlanmış ilk deneyler Robert Boyle (1627-1691), John Mayow (1641-1679) ve Robert Hooke (İngiliz mekanist felsefeciler ve o sırada henüz genç olan Londra Kraliyet Topluluğu'nun üyeleri) tarafından gerçekleştirilmişti. Havadaki bir şeyin hem yanma hem de solunumla ilgisi olduğunu ortaya koymuşlardı. Her iki durumda da ısı üretiliyordu. Bu bakımdan, akciğerlerden alınan hava kalpteki ısıyı soğutmanın aksine her şeyden önce ısıyı üretmekte kullanılan bir malzemeydi. Mekanist felsefeciler, kandaki kükürtlü birleşiklerle bir tür mayalanma içinde bir araya gelerek ısı üreten, havadaki "azotlu özler" ile ilgili tahmin yürüttüler. Bilimleri hâlâ simya ile içli dışlıydı ve gizemi çözmek için daha gelişmiş deneyler gerekliydi.

Doğuştan gelen ısı için sağlam bir kimyasal açıklamanın yokluğu, on sekizinci yüzyılda ibrenin tekrar mekanistik açıklamalara dönmesine izin verdi. La Mettrie'nin öğretmeni, Felemenk tabip Herman Boerhaave (1668-1738), ısının kanın atardamarlarda itilmesi sırasında sürtünme ile ortaya çıktığına inanıyordu. Dönemin mekanistik felsefesinde iyice demlenmiş olan diğer pek çok tabip ve bilim insanı bu düşünceyi paylaştılar. Ne var ki, bu mekanistik görüşler, dirimselcilerce ağır bir biçimde eleştiriliyordu. Edinburgh'lu tabip John Stevensen, 1747 tarihli "Hayvan Isısının Nedeni" başlıklı maka-

lesinde şöyle yazmıştı: "Kaldıraç, ip ve makaraların kaslara ve kirişlere ustaca uygulanmasından hoşnut değilim; mideye değirmen taşları getirildi, kan damarlarına çakmak taşı ve çelik, akciğerlere çekiç ve mengene. Ama mekanistik ilkelerin ve kanıtların ötesine geçemeyecekleri belli sınırlar olduğundan, bunların hepsi iyi bir amaç olmadan yapıldı." Sürtünmeden doğan hayvan ısısı kuramı Benjamin Franklin'in 1769'da yaptığı da dahil olmak üzere deneylerle yanlışlanmıştır. Franklin, damarlarda dolaşan sıvıların asla yeterince ısı üretemeyeceğini gösterdi. Kimyasal açıklamalara başvurdu ve mayalanan meyvenin canlılarla hemen hemen aynı sıcaklıkta olduğunu gözlemleyerek Hooke ve Boyle'un mayalanma kuramını yeniden diriltti.

Gelişme, tıpkı Galen'in bin beş yüz yıl öncesinden öngördüğü üzere, ısının kaynağına dair daha iyi bir kavrayışı beklemek zorundaydı. Hava, ısı *ve* solunum için çok önemli göründüğünden doğa filozofları havanın, yaşamdan metallerin paslanmasına (ya da oksijenden habersiz oldukları için verdikleri adla "kireçlenme") kadar, çeşitli süreçler üzerine etkisini anlamaya çalıştılar. Kafa karıştırıcı biçimde, ısı ve ateş bazen değişik türden "havalar" salıyorlar ve ısıtılan ya da yakılan maddenin doğasını değiştiriyorlardı. Bu hava maddelerin içinde "sabitlenmiş" olup yanma sonucu mu salınıyordu? Nasıl oluyordu da hava, bir katının içinde sıkışıp kalıyordu? Havaya bir element gözüyle bakıldığı sürece, neden bazı tepkimelerde belli havalar yok olurken diğerlerinin ortaya çıktığını anlamak zordu.

Alman simyacılar (kimyacılar da diyebiliriz) Johann Joachim Becher (1635-1682) ve Georg Ernst Stahl'ın (1659-1734) filojiston kuramını geliştirmesiyle ateşin gizemi çözülmüş görünüyordu. Bu kurama göre filojiston; yanma, solunum ve kireçlenme sonucunda salınan bir maddeydi ve bu da üre-

tllen ısıyı salıyordu. Bu kuram, on sekizinci yüzyılın büyük kısmında geniş çapta kabul görmüştü. Ne var ki, bu kuramla ilgili sorunlar çabucak belirmişti: Örneğin, bir metal havada ısıtıldığında "maden külü"ne (oksit) dönüşüyordu. Filojiston kuramı, maden külünün metalden hafif olacağını öngörüyordu; çünkü maden külü, filojistonun metalden salınmasıyla oluşuyordu. Ama deneyler aksini gösteriyordu: maden külü, metalden daha ağırdı. Filojiston kuramının savunucuları bu ilgi çekici gerçeği filojistonun hafiflik ya da itişim (kütle çekimine ters yönde işleyen kütle itimi) özelliğine sahip olduğunu iddia ederek açıkladılar. Filojiston karşıtı güruhsa bu tür umutsuz açıklamalarla alay etti. Bu güruhun başı, eşi ve yoldaş kimyacısı Marie-Anne Pierrette Paulze (1758-1836) ile birlikte filojiston kuramını bozguna uğratan Fransız kimyacı Antoine Lavoisier (1743-1794) idi.

Lavoisier vergi toplayarak geçimini sağlayan bir Fransız soylusu (bu, onu 1794'te giyotine gönderen bir meslekti) ve "ek iş olarak" kimya devrimi yapan biriydi. Lavoisier'i kimyanın Newton'u addetmek çok az abartı olur. Çeşitli havaların değişik kimyasal özelliklerini açıkça ayırt eden ilk insan olarak su, toprak ve havanın bileşik ya da karışım olduğunu keşfetti. Dolayısıyla bu keşif, on sekizinci yüzyılda hâlâ ciddiye alınan eskilerin çoğu elementini yok etti. Lavoisier'in kimyayı elden geçirmesinden sonra arta kalan tek element ("ısıl" [kalorik] olarak yeniden adlandırdığı) ateş ya da ısıydı. Bu son element de çok geçmeden terk edilecekti: on dokuzuncu yüzyılın şafağında Benjamin Thompson ısının bir enerji biçimi olduğunu gösterdi (bununla ilgili daha fazla bilgi Bölüm 3'te bulunabilir).

Lavoisier'in hayvan ısısı üzerine en önemli deneyi bir kobay faresinin solunumu ile kömürün yanması sırasında ortaya çıkan karbondioksit / ısı çıktısı oranının karşılaştırma-

lı ölçümünü içeriyordu. Bu, ustalık isteyen bir deneydi: Isı çıktısını ölçmek için Pierre-Simon Laplace (1749-1827) ile ortaklaşa icat ettikleri bir buz ısı ölçerini kullanıyordu. Bu alet, boşluklu duvarları buzla doldurulmuş yalıtımlı bir kovadan oluşuyordu. Isı, kovanın içinde her ne işlem gerçekleşiyorsa onun sonucunda eriyen buz miktarı ile ölçülüyordu. Çevredeki havadan kaynaklanan erimeyi önlemek için bu deneyler kışın, sıcaklık donma noktasının kıtı kıtına üstünde iken gerçekleştiriliyordu. Karbondioksit çıktısı, kömür ya da hayvanı bir fanusa yerleştirip, buradan çıkan havayı toplayıp inceleyerek ölçülüyordu. Lavoisier, soluk alıp verme ile yanmanın aynı miktarda karbondioksit başına aynı miktarda ısı ortaya çıkardığını buldu. Şimdi, solunumun "yavaş ateş" olduğu kanıtlanmıştı. Hücrelerden haberi olmayan Lavoisier, bu ateşi akciğerlere yerleştirdi.

Lavoisier ısının nerede ve nasıl ortaya çıkarıldığını bulamazken nitel fizyoloji çağına öncülük etti ve biyoloji ile termodinamik arasındaki bağlantıyı kurdu. Bu buluşlar ve gerçek kimyasal elementler, onların bileşikleri ve karışımlarına dayanan akılcı bir kimya geliştirmesi, ona tüm zamanların en büyük bilim insanları arasında bir yer edindirmiştir. Fransız devrimcileri 1794'te onu ölüme mahkum ettiklerinde duruşma hâkimi şöyle buyurdu: "Cumhuriyet'in ne bilim insanlarına ne de kimyacılara gereksinimi var, adaletin gidişatı geciktirilemez." Matematikçi Joseph Louis Lagrange ise bu olaya değişik bir gözle bakıyordu: "Kafasını kesmeleri sadece bir saniyelerini aldı; ama Fransa buna benzer bir başka kafayı bir yüzyılda yetiştiremeyebilir."

Bilimsel bir dehanın yaşamının böyle korkunç bir biçimde sona ermesi, bilimi desteklemeye değer vermeyenler için bir uyarı olabilir. Lavoisier'in ölümüyle, Almanya ve İngiltere bilimde (ve sanayide) Fransa'yı çabucak geride bıraktı.

Mekanizm Başarısız Olur

Skolastik düşünceden, Yunan felsefesine körü körüne bağlılıktan ve her tür gizemcilikten duyulan tatminsizlik mekanistik felsefeyi ortaya çıkardı. Akılcı düşüncenin ve deneysel kanıtın savunucuları olan mekanistik felsefeciler, bilim ve felsefede devrim yapmışlardı. Fizik, kimya ve gökbiliminde zaferden zafere koşmuşlardı.

On sekizinci yüzyılın sonlarında, gelin görün ki, mekanistik yaklaşımın sınırları görünür olmaya başlıyordu. Yaşamın mekanistik resmi, gözlem ve deneylerle bilgilenirken, duygusuz ve yetersiz çıkmıştı. Bedenin işlevleri, canlıların etkileşimleri, yaşamın gelişimi ve zihnin yaşamı saf mekanistik benzetmelere boyun eğmemişti. Amaç vesvesesini defetmek zordu. Bir meşe palamudunun "amacı" meşe ağacı olmaktı; bir beynin "amacı" düşünmekti. Bir meşe palamudu, ağaca dönüşmesi gerektiğini nereden biliyordu? Bir öbek gri madde nasıl düşünebilirdi? Bu gibi gizemleri bir saat düzeneği açıklayabilir miydi?

Bu gidişat, yaşama şizofren bir yaklaşıma yol açtı: Bir yanda, mekanistik yaklaşımın yaşamın nasıl işlediğine dair önemli içgörüler sunduğu yadsınamazdı; öte yandan, bu yaklaşım maddeyi *neyin* canlı kıldığına açıklık getirmekte yetersiz görünüyordu. Yaşamın temel özelliği olan kendi varlığını sürdürme ve kendini düzenleme etkinliği saf mekanistik açıklamaların kavrayışının dışında kalmıştı. Bu gerginlikten çağdaş biyoloji doğdu.

On dokuzuncu yüzyılda Almanya ve diğer merkez Avrupa ülkeleri, Rusya ile birlikte, biyolojik araştırmaların merkezi olmuşlardı. *Biyoloji* sözcüğü bu dönemde ortaya atılmıştı. Alman biyologlar döletlerin gelişimini ve organlarla kasların işlevlerini incelemek için ustalıklı yöntemler geliştirmişlerdi. Almanlar, mikroskop kullanma ve örnek hazırlama yordam-

larını ilerletmiş ve duyu organlarının işlevlerini incelemişlerdi. Bu çalışmalarda, bir noktaya kadar yaşama dair süreçlerin mekanistik bir resmini kabul etmişlerdi; ama canlıların bir saat ya da buhar motoruna hiç de benzemediğinin pekâlâ farkındalardı. Başka bir şey olması zorunluydu.

Mekanistler için, özellikle, döletbilim bir sorundu. Bir civciv ya da iribaşın gelişimini ayrıntısıyla inceleyen biyologlar, maddenin biçim alışını ve bir öbek hücreden, karmaşık bir canlının gizemli bir açılıp gelişmeyle belirişini gördüler. Bu denli mucizevi bir süreci kaldıraçlar, tulumbalar ve gelişigüzel hareket eden atomlarla açıklayamazdınız. Bu, saçmalıktı. Besbelli, canlı yapılar bir amaca hizmet ediyorlardı. Canlılar, cansız dünyada karşılaşılan her şeyden hepten farklı olmalıydı.

Döletbilimin can sıkıcı sorunu ön-oluşum ile *oluşum-öncesi* yandaşları arasındaki tartışmalarda kendini göstermiştir. Bu tartışmalar mekanistler ile dirimselciler arasında şaşırtıcı bazı fay hatlarını ortaya çıkardı. Ön-oluşum, her canlının yumurta ya da sperm içerisinde önceden oluşmuş halde bulunması gerektiği düşüncesiydi. Eğer bir ön-oluşumcu idiyseniz, küçük Annie doğmadan önce mikroskopla belirlenemeyecek kadar küçük, ufacık bir Annie'nin ebeveyninin üreme hücrelerinde zaten var olduğuna inanmalıydınız. Babasının spermi tarafından etkinleştirilen ufacık dölet, annesinin dölyatağında büyümeye başlıyordu; böylece, biçim zaten annenin yumurtasında olduğundan, biçimsiz maddenin biçim kazanmasına gerek yoktu. Ön-oluşumculuk, şaşırtıcı bir şekilde, bu iki taraf içinde bizim safça daha bilimsel olarak görebileceğimiz mekanistlerin sıklıkla yeğlediği görüştü. Fakat, ön-oluşum çok saçma görünüyordu: Kendi mantıksal sonucuna göre bütün insanlık, gelmiş geçmiş milyarlarca insan, Havva'nın yumurtalıklarında kendilerinin ufacık bir örneği olarak bulunmalıydı.

Oluşum-öncesi, bundan farklı olarak, biçimsiz maddenin döletin gelişimi sırasında karmaşık bir canlıya dönüştüğünü iddia ediyordu. Bunun da sorunları vardı. Bu gelişimi ne yönetiyordu? Bir öbek farklılaşmamış madde nasıl oluyor da bir tavuğa ya da kurbağaya dönüşüyordu? Mekanizm bu kendiliğinden öz-düzenlemenin nasıl işlediğini ilkesel olarak bile açıklayamıyordu. Oluşum-öncesi, dirimselcilerin gözdesiydi. Biçimsiz maddeden biyolojik karmaşıklığın oluşması ancak çok sevdikleri yaşam kuvvetinin yapabileceği bir işti; gerçekten de böyle bir kuvvetin bulunmak zorunda olduğunun kanıtıydı.

Mekanistlikten duyulan bu tatminsizlik daha düşsel bir yaşam felsefesine önayak oldu. *Naturphilosophie* yani doğa felsefesi savunucuları doğanın her yerinde işleyen, gitgide daha yüksek varlık biçimleri oluşturmaya didinen bir yaşam kuvveti görüyorlardı; kulağa epeyce cancılık gibi gelen bir kanıydı bu. Ne var ki, pek çok Alman biyolog doğaüstü kuvvetlere başvurur görünen açıklamalara karşıydı. Bir yaşam gücünün gerekliliğine açık kapı bırakırken bu yaşam gücünün doğanın bir parçası ve bilimsel incelemenin nesnesi olması gerekiyordu.

Mekanizm ile dirimselcilik arasından bir yol bulmaya çalışan Alman filozof Immanuel Kant (1724-1804) ile arkadaşı biyolog Johan Friedrich Blumenbach (1752-1840), yaşamın araştırılmasında yeni bir yaklaşım oluşturdular: *teleomekanizm.** 1790'da Kant, Blumenbach'a şöyle yazmıştı: "Herkesin bağdaşmaz gördüğü bu iki ilkeyi, yani fiziko-mekaniği ve te-

* Teleomekanizm kavramı, *Yaşamın Taktiği: On Dokuzuncu Yüzyıl Alman Biyolojisinde Teleoloji ve Mekanik* adlı eserinde Timothy Lenoir tarafından öne sürülmüştü (*The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology.* Chicago, Chicago University Press, 1989; 1982).

leolojiyi, yakın zamanda bir araya getirişiniz şu sıralar beni oyalayan düşüncelerle yakından ilişkilidir." Aristotelesçi gelenekte, Kant ve Blumenbach yaşamın amaç (Yunanca *teleo*) tarafından yönetildiğine inanıyordu. Özellikle Blumenbach "[sayesinde canlıların] öncelikle kesin bir biçim edinip sonrasında koruyabilecekleri ve hasar gördüklerinde kendilerini olabildiğince onarabilecekleri" (Almanca'da *Bildungstrieb* denen) biçimlendirici bir dürtünün varlığını benimsemişti. Blumenbach ve ardından gelen biyologlar bu yaşam kuvvetini canlıdan bağımsız bir varlık olarak görmüyorlardı. Daha çok, özel düzenlenmesinin ve yapısının bir sonucu olarak canlının içinde bulunan bir kuvvetti.

Organik olarak düzenlenmiş bedenlerin kendilerinde barındırdıkları özel kuvvetler görüşü biyolojinin özerk bir bilim haline gelmesine yardım etti. Yaşamın özel olduğu düşüncesinin pekişmesinden sonra yaşambilimciler kendi yöntemlerini, düşüncelerini ve yaklaşımlarını geliştirebilirlerdi. Biyologlara düşen, özel yaşam kuvvetlerinin organik maddeye nasıl etki ettiğini bulmaktı. Alman biyolog Carl Friedrich Kielmeyer (1765-1844) yaşam kuvvetlerinin uyacağı bir dizi Newton yasası oluşturmaya kadar gitmişti. Önce, canlıların içinde işleyen kuvvetleri belirledi: duyarlılık, irkilebilirlik, üreme, salgılama ve itki. Sonra, bu kuvvetler için (çoğu sonradan yanlışlanan) çeşitli yasalar öne sürdü ve bunlara "hayvanlar âleminin fiziği" dedi.

Kant ve Blumenbach tarafından başlatılan biyoloji geleneği döletbilim ve fizyolojide birtakım önemli buluşlara önayak oldu. En geniş etkili buluşlardan biri hücre kuramıydı; bütün canlıların, en küçük yapıtaşları olan hücrelerden oluştuğu kabul edildi. Bu içgörünün zamanı gelmiş de geçiyordu; ne de olsa Hooke, şişe mantarında gördüğü küçük bölmeler için *hücreler* kavramını ta 1600'lerin sonunda ortaya atmıştı. Her

ne kadar pek çok ülkeden sayısız bilim insanı son kurama katkıda bulunmuş olsa da hücre kuramı genelde Alman botanikçi Matthias Jacob Schleiden (1804-1881), Alman zoolog Theodor Schwann (1810-1882) ve Alman tabip Rudolph Virchow'a (1821-1902) atfedilir.

Hücre kuramı, hücrelerin yaşamın "atomları" olduğu, bir tür biyolojik atomculuğa denk geliyordu. Ama hücreler, atomlar gibi parçalanamaz değildi. Mikroskopçular hücrelerin içinde, 1833'te Robert Brown tarafından adı konan çekirdek ile başlayarak, daha da küçük yapılar keşfettiler.

Cancı Alman biyologların çağı araştırılacak yeni ufuklar açtı. Teleomekanistler üstün deneyselcilerdi ve döletbilim, gelişimsel biyoloji, bitki bilimi ve fizyolojide yeni ekoller başlattılar. Eğer bu bilim insanları yaşam kuvvetleri ile ilgili kuramsal düşüncelerinde yanlış yola sapmışlarsa onları bağışlayabiliriz: deneysel bulguları çoğunlukla zamanın sınavına karşı koyabilmiştir.

İrkilebilir Bir Frankenstein

> Neredeyse ıstıraba varan bir kaygı ile, sorumlu olduğum cansız şeye bir varlık kıvılcımı aşılayabileceğim yaşam aygıtlarını çevreme topladım. Saat gecenin biri olmuştu bile; yağmur, pencerelerde kasvetli bir biçimde tapırdıyordu ve mumum bitmek üzereydi ki yarı sönmüş ışığın titrek ışığında yaratığın donuk sarı gözünün açıldığını gördüm; zorlukla nefes alıyordu ve uzuvları bir çırpınma hareketiyle sallanıyordu.
>
> — MARY SHELLEY, *FRANKENSTEIN*

Kielmeyer'in yaşam kuvvetlerinden biri olan irkilebilirlik bilim insanlarının, filozofların ve yazarların hayal gücünü kamçılamıştı. Bunlardan biri, en çok hayvan konaklarından

ayrılmış kasların hareketlerinden etkilenmiş olan La Mettrie idi. La Mettrie yaşamın saf mekanizma, karmaşık bir zemberek olduğu savının merkezine irkilebilirliği yerleştirmişti. Ama irkilebilirlik dirimselci düşünceleri de destekliyordu: Eğer kaslar kendi başlarına kıpırdayabiliyorsa; bu, bir yaşam kuvvetinin varlığını kanıtlamıyor muydu? Ve eğer böyle bir yaşam kuvveti özüne damıtılabilse, ölü dokuya yaşam vermek için kullanılamaz mıydı? Romantik dönemin zirvesi olan 1800'lerin başlarında bu tür tahminler, Cenevre Gölü'nde sevgilisiyle tatilde olan edebiyat tutkunu genç bir kadının bir roman kaleme almasına esin olmuştu.

Mary Wollstonecraft Shelley (1797-1851) romanı *Frankenstein* ya da Çağdaş Prometheus için ilhamı kendisi ve eşi Percy Bysshe Shelley'nin, içlerinde şair Lord Byron'ın da bulunduğu pek çok arkadaşlarıyla kapandıkları Diodati Villası'nda edinmişti. Tarih, Endonezya'daki yanardağ Tambora'da gerçekleşen devasa bir püskürmenin Avrupa göğünü kararttığı kasvetli "yazsız yıl", 1816 idi. Gecenin geç saatlerinde yapılan söyleşilerde o ve arkadaşları, irkilebilirliği göstermek için ölü hayvanlara ve insanlara yüksek gerilim uygulayan bilim insanlarının gittikçe daha korkunçlaşan deneyleri hakkında konuşuyorlardı. Arkadaşları, kendilerini eğlendirecek bir öykü ya da şiir yazmada birbirlerine meydan okurlarken Shelley bir bilim insanının ölü etten yaşam yaratması ile ilgili gotik bir korku öyküsü düşündü.

La Mettrie'nin yaşamın mekanik doğasına kanıt olarak kullandığı irkilebilirlik çalışmaları, o günün bilim insanlarının henüz kurulmuş elektrik biliminin canlıları incelemede kullanılabileceğini bulmasıyla iyice yerinde duramaz olmuştu. Bu dönemin simgeleşmiş deneyi, yüklü bir Leyden kavanozunu (yüksek miktarda elektrik yükü tutabilen bir sığaç) bedenden ayrılmış kurbağa bacaklarına bağlayan ve üzerlerinden akım

geçerken tekmelediklerini ve seğirdiklerini gözlemleyen Luigi Galvani (1737-1798) tarafından gerçekleştirilmişti. Bu gibi deneyler, filozofların yüzyıllardır peşinden koştuğu gizemli yaşam kuvvetinin elektrik olabileceği izlenimini uyandırıyordu. 1803'te Galvani'nin yeğeni Giovanni Aldini insan ölüleri üzerinde deneyler yaparak yüzlerini seyirtme, gözlerini açma, uzuvlarını havaya kaldırmaya kadar gitti. Bu deneylerin amacı "hayvan elektriği"nin sinir ağı üzerinde yol alırken kasların hareketlerinden sorumlu bir yaşam kuvveti olduğunu göstermekti. Ne yazık ki, bu deneylerin gerçekte uyandırdığı (Shelley'nin romanının da epeyce yardımıyla) haddini bilmez, çılgın bilim insanı düşüncesiydi; bu, o zamandan bu yana toplumun düş âleminin büyük kısmına egemen olan bir resimdi.

Bu kitabı yazmaya başlayana kadar Shelley'nin kitabını okumamıştım (gerçi Boris Karloff'un canavarı oynadığı klasiğin de aralarında bulunduğu pek çok film uyarlamasını biliyordum) ve Shelley'nin, Dr. Frankenstein'ın yaratımını tam olarak nasıl dirilttiğinden hiç söz etmediğini gördüğümde şaşırmıştım. Shelley'nin kahramanı okuyucuyu bilerek karanlıkta bırakır, güya gelişmek üzere olan felaketin yinelenmesini önlemek için: "Hevesiniz ve gözlerinizde ifade bulan merak ve umuttan taşıdığım sırrı öğrenmeyi beklediğinizi görüyorum arkadaşım," diye açıklar romanda Dr. Frankenstein, "ama bu gerçekleşemez; öykümü sonuna kadar sabırla dinleyin, bu konuda neden ağzı sıkı olduğumu kolaylıkla algılayacaksınız." Çeşitli film uyarlamalarında görünen dev anahtarlar ve yıldırımlı fırtınaların hepsi Hollywood'un icatları, ama 1800'lerin başlarında haberleri yayılan irkilebilirlik çalışmalarının Shelley'nin simgeleşmiş romanına esin kaynağı olduğu açıktır.

Yunanlar tarafından bulunuşundan beri (*electron* Yunanca'da "kehribar" demektir ve kehribar sürtünme ile durgun

elektrik üretir) elektrik, gizemli bir kuvvet ve görünmez bir sıvı olarak düşünülüyordu. Bu kadar gizemli bir kuvvetin, yaşamın büyük gizemi ile bir bağı olmak zorundaydı. Newton bile hayvan hareketinden elektriğin sorumlu olduğunu öne sürmüştü. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*'nın ikinci baskısında elektriğin "görünmez özü"nün sinirlerden iletilip "duyuları uyardığı" ve "uzuvları kıpırdattığı" tahmininde bulunmuştu.

Shelley'nin Dr. Frankenstein'ına esin kaynağı olan kimdi? Hayvan elektriği bilimin gözde nesnesi iken bu pek aşağılayıcı nişana layık görülebilecek çok aday vardı. Londra'da geniş kitleler önünde henüz asılmış suçluların uzuvlarından –bu korkunç etkiyi göstermek adına– yüksek akımlar geçiren Aldini kesinlikle bunlardan birisiydi. Bir diğeri, yüksek akımı kendisine uygulamayı seçen Alman bilim insanı Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) idi. Elektrik akımı, gözüne uyguladığında, hangi elektrik kutbunu göz küresine bağladığına göre değişmek kaydıyla, kırmızı ve mavi parıltılar görmesine neden olmuştu. Ritter, bilinmeyen nedenlerden genç yaşta ölmüştü; insanın kendine tekrar tekrar elektrik vermesi pek sağlıklı bir şey olmasa gerek.

Kuvvetin Korunumu veya Dirimselciliğin Bir Kurbağa Bacağı Tarafından Yıkılışı

On sekizinci yüzyılın sonlarından on dokuzuncu yüzyılın ortalarına kadar teleomekanistlerin ve dirimselcilerin çağı olmuşsa da mekanistlik yeniden üste çıkmıştı. Mekanistik açıklamalara bu dönüş, temelde iki adamın işiydi: Teleolojiyi yıkan İngiliz doğabilimci Charles Darwin (1809-1882) ve yaşam kuvvetini bozguna uğratan Alman fizyolog ve fizikçi Hermann von Helmholtz (1821-1894).

Helmholtz gerçek anlamda evrensel bilim insanlarının sonuncularındandı. Tıp, biyoloji ve fiziğe; hayvanlarda ısı, irkilebilirlik, yaşam kuvveti, termodinamik, elektrodinamik, enerjinin korunumu, sıvılarda çalkantı ve duyuların fizyolojisi gibi çeşitli alanlarda kayda değer katkılarda bulunmuştur. Açıklamaları ezber bozan türdendi ve bunların çoğu zamanın sınavından geçti. Ayrıca, göz doktorlarının ağ tabakayı görmek için gözlerinize doğrulttuğu özel bir mikroskop olan göz aynası dahil pek çok deneysel araç icat etti. Engin bilgisi, değişik bilimler arasında özgün bağlantılar kurmasına izin verdi. Canlı doku kadar karmaşık bir düzeneğe bakıp onu cansız, mekanik dünya ile bağlantılandıran tek değişkeni belirleyebiliyordu. Bu değişkenin enerji olduğuna karar vermişti.

Daha kibirli türden fizikçiler sıklıkla, fizik ile biyoloji arasındaki etkileşimlerin yalnızca bir yönde olduğunu düşünürler: Fizik, biyolojiyi açıklayabilir ama biyolojinin fizik üzerine hiçbir etkisi yoktur. Böyle yanlış yola saptırılmış bir bilim görüşünü düzeltmek için Helmholtz'ün, enerjinin korunumu (ya da kendi verdiği adla kuvvetin korunumu) yasasını savunmaya nereden geldiğini düşünmeniz gerekir. Fizikçi olarak eğitilmiş Helmholtz bilimsel uğraşısına fizyolojik deneyler üzerinde çalışarak başlamıştı. Onu, enerjinin korunumu yasasına ikna eden bu biyolojik deneyler olmuştu.

Enerjinin korunumu bir süredir ortalıkta dolanıyordu. Descartes, Newton ve Leibniz her ne kadar korunan niteliğin türü hakkında anlaşamasalar da hepsi madde tanecikleri arasındaki etkileşimlerde korunan bir nitelik olması gerektiğini savunuyorlardı (Newton momentum ya da hareketin niteliğini savunurken Leibniz kinetik enerji ya da *vis viva* ["canlı kuvvet"] savunucusuydu). Başkaları iş ve kinetik enerjinin, örneğin düşüş sırasında, birbirine dönüştürülebileceğini gös-

termişlerdi. Isının bir hareket türü olduğu gösterilmişti ve kinetik enerjinin sürtünmeyle ısıya dönüşebileceği zaten biliniyordu. 1845'te James Joule (1818-1889) sabit miktarda işin sabit miktarda ısı çıkaracağını gösterdi (buna, ısının mekanik karşılığı diyordu): "Eşit miktarlarda mekanik etki herhangi bir yolla saf ısıl kaynaklardan üretildiğinde ya da saf ısıl çıktı olarak kaybedildiğinde eşit miktarlarda ısı yok olur ya da oluşur."

Kendi biyolojik gözlemlerinden ve özenli matematiksel fizik çalışmalarından hareketle Helmholtz enerjinin korunumunu bütün enerji türlerini kapsayacak biçimde genişleterek enerjinin korunumunun bir evrensel yasa olduğunu ilan etti. Enerjinin korunumunun basit varsayımlardan matematiksel olarak nasıl çıkarılabileceğini gösterdi. Matematiksel uygulama yalnızca Helmholtz'ün kazanımı olsa da evrensel enerji korunumu düşüncesi birkaç yıl öncesinde başka bir Alman bilim insanı Julius Robert von Mayer (1814-1878) tarafından açıkça ortaya konmuştu. Helmholtz gibi Mayer de fiziğe atılan bir tabipti ve evrensel enerji korunumu yasasını açıklamak için biyolojiden de esinleniyordu. Altı yıl sonra kendi düşüncelerini yayımladığı sırada Helmholtz, Mayer'in 1841'deki makalesinden habersizdi. Mayer makalesinde yaşam kuvvetlerini, kısa bir süre sonra Helmholtz'ün de yapacağı gibi, reddetmiş ve "bitkide üretilen kimyasal gerilimin nedeni fiziksel kuvvettir," demişti. Bu fiziksel kuvvet ya da bugünkü adıyla enerji, eğer bitkiyi yaksak elde edilecek olan enerjiyle aynıydı. Dahası, bu enerji bir yerden gelmeliydi. Eğer gizemli bir yaşam kuvveti ortaya atsaydık (kaynak gerektirmeyen bir kuvvet) "ipini koparmış kurguya sürüklenmiş" olurduk ve ileride yapılacak araştırmaların tamamının "önü kesilmiş" olurdu. Hayır diyordu Mayer, gerçek açıklama, enerji ve maddenin yalnızca bir biçimden diğerine dönüştüğü olmak

zorundaydı ve "birinin ya da diğerinin yaratılması asla söz konusu değildi." Diğer bir deyişle, bir bitki ya da hayvan kadar karmaşık bir şeyde bile enerji yalnızca dönüşüyordu; ama asla yaratılıp yok edilmiyordu. Bu, enerjinin korunumunun evrensel beyanıydı.

1847'de "Über die Erhaltung der Kraft" ("Kuvvetin Korunumu Hakkında") başlıklı ünlü yazısında, o zaman yalnızca yirmi altı yaşındaki Helmholtz, Mayer'in ortaya koymuş olduğu düşüncelerle hemen hemen aynı yolu izledi. Helmholtz, gizemli yaşam kuvvetleri öne sürmenin yaşamın nasıl işlediğinin araştırılmasına hiçbir şey katmadığını hissediyordu. Dahası, yoktan mekanik kuvvet üretebilen yaşam kuvvetlerinin varlığı bir devridaim makinesi, yoktan enerji yaratan bir makine, yapmayı olası kılıyordu. Bunun olamayacağı yaygın kabul görüyordu. Enerji dönüşümü doğru olmak zorundaydı ve özel yaşam kuvvetleri var olamazdı. Helmholtz, enerjinin korunumu yasasının matematiksel olarak kanıtlanabileceğini göstermişti. Sadece, maddenin yalnızca aralarındaki uzaklığa bağlı kuvvetler sayesinde etkileşen noktasal parçacıklardan oluştuğu varsayımında bulunması gerekmişti. Yasaya dair bu matematiksel kanıt ve kapsamlı görüş kendisinden yaşlı meslektaşları tarafından biraz direnişle karşılanmıştı. Ne var ki, çok geçmeden yeni deneyler Helmholtz ve enerji korunumcusu arkadaşlarının haklılığını kanıtlamıştı.

Helmholtz ta en başından beri kendini mekanizme adamış bir bilim insanıydı. Her ne kadar teleomekanist güruhtan olan etkili araştırmacı ve öğretmen Johannes Peter Müller (1801-1858) ile birlikte çalışmış olsa da herhangi bir şeyi açıklamak için bir yaşam gücüne başvurma düşüncesini bile hor görüyordu. İrkilebilirliği açıklamak için yaşam kuvvetlerinin gerekmediğini kanıtlamak üzere pek çok deney tasarladı. Bu deneylerin çoğu, dalga geçercesine, Galvani'nin en gözde

deney nesnesi olan kurbağa bacakları üzerinde gerçekleştirilmek üzere tasarlanmıştı. Galvani, tabii ki, kendi kurbağa bacağı deneylerini dirimselciliğe kanıt olarak sunmuştu.

İlk deney grubunda Helmholtz kaslardaki hareketin kimyasal süreçlerden kaynaklandığını, yani hayvan hareketinin fizikokimyasal bir süreç olduğunu ve herhangi bir yaşam kuvvetiyle ilgili olmadığını kanıtlamaya girişmişti. Bunu kanıtlamak için, tıpkı Galvani'nin yaptığı gibi, üzerlerinden elektrik akımı geçirerek kurbağa bacaklarının yüzlerce defa irkilmesine neden oldu. Daha sonra irkilmiş kurbağa bacaklarından çok sayıda kimyasal özüt çıkardı ve bunları irkilmemiş kurbağa bacaklarından çıkan özütlerle kıyasladı. Kasların irkildiği durumda su esaslı özütün kütle kaybettiğini ve etilalkol esaslı özütün eşit miktarda kütle kazandığını buldu. Kaslardaki bir kimyasal bileşiğin kasların etkinliği ile suda çözünür halden alkolde çözünür hale dönüştürülmüş olduğunu kanıtlıyordu. Bu, kasların hareketinin kaslarda kimyasal bir değişime neden olduğunu kanıtladı ve Helmholtz kasların kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren makineler olduğu sonucuna vardı.

Bu enerjinin tamamen kimyasal olduğunu kanıtlamak için daha sonra besinin kimyasal yıkımıyla çıkabilen, gizli ısı denen ısı ile hayvanlardan atılan maddelerin gizli ısılarını karşılaştırdı. Bu, Lavoisier'in deneyiydi. Ne var ki, Lavoisier'in zamanından beri kobay faresinin üstüne daha incelikli deneyler geliştirilmişti. Helmholtz bu deneyleri gözden geçirdi ve besin ile atık arasındaki enerji farkının gözlenen hayvan ısısını açıklamakta yeterli olduğu sonucuna vardı. Lavoisier ve ünlü Alman kimyacı Justus von Liebig (1803-1873) tarafından uygulamaya konan bir hatayı düzeltebilmişti: Liebig (kendinden önceki Lavoisier gibi) bir hayvan tarafından harcanan enerjinin hayvanın besininin, soluduğu oksijene oksitlenmesi

(yanması) ile açığa çıkan enerjiyle tamı tamına aynı olduğuna inanıyordu. Ama Fransız fizikçi Pierre Louis Dulong (1785-1838) ve Belçikalı fizikçi César-Mansuète Despretz (1798-1863), Lavoisier'in deneyini özenle tekrarlayarak hayvanın sadece solunumla gerçekleşebilecek oksitlenmeyle açıklanabileceğinden yüzde 10 daha fazla enerji ürettiğini göstermişlerdi. Bu, yaşam gücünün katkısı olarak kayıp yüzde 10'a dikkat çekebilecek olan dirimselcilere açık bir kapı bırakmıştı. Bunun yerine Helmholtz kayıp yüzde 10'un besinde, özellikle karbonhidrat ve şekerlerde hazır bulunan oksijenden geldiğini gösterdi. Bu oksijen fazlası hesaba katılınca besin enerjisi, hayvan ısısı artı atıkların enerjisi ile tam örtüşüyordu ve hiçbir yaşam kuvvetine gerek yoktu.

Yaşam kuvvetine gereksinimi tamamen ortadan kaldırmak için son bir deney gerekiyordu: Helmholtz kasları kıpırdatmak için gereken enerjinin, kasların besinden edindiği kimyasal enerjide bulunduğunu ve başka bir yerden gelmediğini su götürmez bir biçimde kanıtlamalıydı. O zamanlar, sinir sisteminin kaybının bedenin soğumasına yol açtığı biliniyordu. Bu yüzden, bazı biyologlar sinir sisteminin hayvan ısısı ya da yaşam kuvveti için bir kaynak sağladığına inanıyorlardı. Helmholtz, yaşam kuvvetinin bu son sığınağını yok etmek için ustalıklı bir düzenek kurdu. Dokunun üç farklı kısmının (siniri ayrılmamış bir kurbağa bacağı, siniri alınmış bir kurbağa bacağı ve bacak olmaksızın yalnızca sinir) irkilmesini sağlayarak, bacağın hareketine bağlı herhangi bir sıcaklık artışının sinirlerden bacağa iletilen herhangi bir yaşam enerjisinden değil de bacağın kendisinden kaynaklandığını göstermeye soyundu. Kıpırdayan bir kurbağa bacağının küçük sıcaklık değişimlerini kaydetmek için bir ısılçift (sıcaklığı gerilime dönüştüren bir tür elektrikli ısıölçer), doğan gerilimi yükseltmek için bir manyetik makara ve ayarların yapılma-

sından sonra sıcaklığı gösterecek olan bir kadrandan oluşan çok hassas bir düzenek kurmuştu. Düzeneği, derecenin binde biri kadar küçük sıcaklık değişimlerini kaydedecek hassasiyetteydi. Dahası bu düzenek, enerji korunumunun bedene gelmiş haliydi: Kurbağa bacağındaki (elektriksel irkilme ile serbest bırakılmış) kimyasal enerji hareket enerjisine (bacağın kıpırdaması), sonra sırasıyla ısıya, elektrik enerjisine (ısılçift), manyetik enerjiye (makara) ve son olarak kadranın mekanik hareketine dönüşüyordu.

Helmholtz, sinirlerin varlığının bir fark yaratmadığını ve tek başına bir sinirin hiç ısınmadığını buldu. Kaslar aynı miktarda kıpırdadığı sürece, sinirin varlığına bağlı olmaksızın aynı miktarda ısınıyorlardı. Helmholtz'e göre yaşam kuvveti düşüncesi artık savunulamazdı.

Fizikçilerin kazandığı sonucuna varmak çok kolay olurdu. Evet, Helmholtz ve diğerlerine göre bedende gerçekleşen her şey (hayvan ısısından irkilebilirliğe kadar canlılığın bütün ayırıcı özellikleri) fizikokimyasal dünya tarafından düzenlenen enerji bütçesinin içinde gerçekleşmek zorundaydı. Eğer yaşam kuvveti diye bir şey vardıysa enerjisiz ve dolayısıyla etkisiz bir kuvvet olmak zorundaydı. Helmholtz'ten sonra yaşam güçleri hızla gözden düştü ve o zamandan bu yana, en azından ciddi bilimde, hortlatılmadı. Yine de, yaşam gücünü kararlılıkla yok etmesine karşın Helmholtz ve yoldaşı olan fizikçiler, biçimsiz maddeden karmaşık canlının nasıl meydana geldiğini açıklayamıyordu. Bu değişimin enerjinin korunumu yasası dahilinde gerçekleşmek zorunda olduğunu göstermişlerdi ama canlıların nasıl oluştuğunu açıklayamıyorlardı. Araştırmaları, yalnızca yaşam güçlerini olası açıklamalar listesinden çıkarmıştı.

Helmholtz ve diğerleri sayesinde biyoloji on dokuzuncu yüzyılın sonunda mekanizme dönmüştü; ama on yedinci

yüzyıl mekanist felsefecilerinin ilkel, çaylak mekanizmine değil. Bütün biyolojik süreçlerin kimya ve fizik çerçevesinde gerçekleştiği artık açıktı. İrkilebilirlik ya da hayvan ısısı gibi fizyolojik süreçleri açıklamada anahtar bu iki bilim dalıydı. Ama biyolojinin fizik ve kimyadan temelde farklı olduğu da bir o kadar açıktı: Karmaşıklık ve gelişimin açıklanması gerekiyordu. Amaç henüz defedilmemişti.

Darwin ve Mendel: Şanstan Amaca

Yaşamın gizemleri etrafında dolanan temel tartışmalar aslında hiç değişmedi. Yeni bulgular amaç-mekanizma çekişmesini rahatlatmıştı ama biyolojinin on dokuzuncu yüzyılın sonundaki ikilemi, Aristoteles ile Demokritos arasındaki kadim tartışma ile temelde aynıydı. 1850'lere gelindiğinde yaşamın süreçlerini açıklamak için fiziksel, kimyasal ve mekanik kuvvetlere başvurulmak zorunda olunduğunu kimse yadsıyamıyordu. Fakat mekanik, yaşamın sıra dışı karmaşıklığını ve amaçlılığını açıklamakta üzücü bir biçimde yetersiz görünüyordu. Mekanistik açıklamalar güçlenmişti ve Helmholtz ile çağdaşlarının çalışmaları sayesinde yaşamda etkin olan bütün kuvvet ve enerjilerin cansız maddede de bulunduğu artık açıktı. Ama bu, amacı açıklayamazdı. Fizikçilerin ikilemi, Demokritos'un karşı karşıya kalmış olduğu ikilemle aynıydı. Karmaşıklık nasıl olup da karmaşadan doğabilir?*

---

* "Karmaşadan karmaşıklığın doğması" ifadesi Türkçe yazıldığında bir söz oyunu gibi görünse de bu terimlerin İngilizce karşılıklarında böyle bir kök benzerliği olmadığını belirtmek gerek. Burada karmaşa (*chaos*) ile belirtilmek istenen şey (en azından yüzeysel olarak incelendiğinde) görülür bir kalıbı ve düzeni olmayan durumlar iken karmaşıklık (*complexity*) ile anlatılmak istenen şey çok sayıda parçanın birlikte çalışmasıyla ortaya çıkan düzeneklerdir. Örneğin, "trafik karmaşasını önlemek için karmaşık bir tabela ve ışık ağı kullanmak gerekir". (Çev. n.)

Mekanizmi amaç kaygısından kurtaran kişi Charles Robert Darwin'di. Darwin, Alfred Russell Wallace (1823-1913) ile birlikte doğal seçilime bağlı evrim kuramını geliştirdi. Evrim düşüncesi tümüyle yeni değildi. Değişik yaşam biçimlerinin birbirleriyle ve yok olmuş yaşam biçimleriyle nasıl ilişkili olduğunun farkına vardıklarından beri bilim insanları türlerin zamanla değişebilip değişemeyeceklerini merak edegelmişlerdi. Ama doyurucu bir mekanizma olmadan, evrim düşüncesi bir yere varamamıştı.

Özenle tartışılmış ve şaşırtıcı biçimde açık bir dille yazılmış Darwin'in devrimci eseri *Türlerin Kökeni*, doğal seçilimin evrimin itici kuvveti olduğuna dair güçlü bir iddia sunmuştu. Darwin'in kuramı çağdaş bilimce yaygın şekilde kabul edilmiş olmasına rağmen, 1859'da yayımlandığında kesinlikle sarsıcı olmuş ve akla aykırı bulunmuştu. Çağdaşları, fevkalade tasarlanmış bitki ve hayvanlara baktıklarında Darwin'in, bu yaşam biçimlerinin körlemesine ve adım adım ilerleyen bir süreçle ortaya çıkabileceği iddiasını çok saçma buluyorlardı.

Fakat kuram ikna ediciydi: Darwin'in sadık destekçisi biyolog Thomas Henry Huxley (1825-1895), kitabı okuduktan sonra "Bunu düşünmemiş olmam ne büyük aptallık!" diye yakınmıştı. Gerçekten de pek çok parlak düşünce gibi Darwin'inki de son derece basitti: Tüm türler, her biri diğerinden biraz değişik bireylerden oluşan bir toplum halinde bulunur. Darwin bu değişikliklerin nasıl ortaya çıktığını bilmiyordu (biz bunu bugün oldukça iyi biliyoruz) ama var olduklarını açıkça görebiliyordu. Zaman içinde, daha fazla üreme başarısına yol açan değişimler toplumda mutlaka artacaktı. Diğer bir deyişle daha başarılı bir biçimde eşleşmelerine izin verecek bir değişime sahip olan bireyler daha çok sayıda yavru yapacak ve bir zaman sonra bu belirli değişime sahip

olan daha çok sayıda birey olacaktı. Koşullar değiştikçe ya da toplumlar diğer toplumlardan koptukça farklı değişimler yeğlenir ve yeni türler doğar. Süreç aşırı yavaş olduğundan ömrü boyunca insanın eline yeni bir türün doğuşunu gözlemlemek için az sayıda olanak geçer.

Darwin'in kuramı dini nedenlerle ciddi anlamda direnç gördü. 1802'de basılmış gözde bir kitap olan *Doğa İlahiyatı*'nda ilahiyatçı William Paley (1743-1805) canlılardaki karmaşık düzenekleri (çok daha az dindar olan La Mettrie'nin de yapmış olduğu gibi) bir saatin çalışmasına benzetmişti. Kuşkusuz; saat, bir saatçiyi varsayıyordu. Kendisini tasarlayıp üretmemişti. Canlıların sonsuz kez daha karmaşık tasarımlarının kendilerini ürettiklerini nasıl ileri sürebilirdik? Paley'nin kitabı o dönem çok tutulmuştu ve yükseköğrenimini sürdürdüğü yıllarda Darwin'in gözdelerinden biriydi. Darwin'in, Paley'nin hatalı olduğunun farkına varması ancak aşamalı bir biçimde ve binlerce titiz gözlem sonucunda gerçekleşebilmişti. Darwin'in evrim kuramı amacın son kalıntılarını da ortadan kaldırarak doğal dünyayı açıklamada Tanrı'yı gereksiz kılmıştı. Bu, tabii ki, Tanrı'nın ilk gereksiz kılınışı değildi. Fizik, Tanrı'yı zaten tahtından indirmişti (Napoleon tarafından kendisine Tanrı'nın evrende ne gibi bir rol oynadığı sorulan fizikçi Pierre-Simon Laplace, "Bu varsayıma hiç gereksinim duymuyorum," yanıtını vermişti) ve Helmholtz yaşam kuvvetlerini saf dışı etmişti. Doğaüstünün son sığınağı yaşam biçimlerinin şaşırtıcı çeşitliliği gibi görünüyordu. Şimdi, bu bile doğanın kör kuvvetlerinin sonucu olmuştu.

Darwin'in düşünceleri dini bakımdan epeyce eleştirilmelerinin yanı sıra önceleri bilim insanları tarafından da benzer biçimde çekincelerle karşılanmıştı. Burada, nedenler başkaydı. Darwin'in kuramı can alıcı öğelerden yoksundu: Değişimler sonraki nesle nasıl aktarılıyordu ve yeni değişimler nasıl

meydana geliyordu? Elbette, Darwin köpeklerin, orkidelerin ve süslü güvercinlerin çiftleştirilmek (yetiştirilmek) suretiyle görece kısa sürede çarpıcı bir değişim geçirebileceklerine dair güçlü bir iddia ortaya koymuştu. Ama bu, bir yetiştiricinin yönlendirmesini gerektirir görünüyordu. Doğadaki çeşitlilik nereden geliyordu? Bu çeşitlilik, gözlenen değişimlere nasıl yol açabilirdi? Değişimler nasıl kalıt bırakılıyordu? Neden yavrular ebeveynlerine benzerdi ama aynı değildi? Darwin evrimi açıklamak için can alıcı olan işleyişe (çeşitlenim ve doğal seçilim) parmak basmış olsa da pek çok boşluk vardı.

Darwin'den habersiz, bahçesinde bezelye bitkilerinin nesilleri arasındaki ilginç örüntüleri kaydeden Moravya'lı bir keşiş yapbozun kayıp parçalarının bir kısmını bulmuştu bile. Gregor Mendel (1822-1884) adlı bu keşişin çalışmaları epey sönük bir dergi olan *Brno Doğa Tarihi Topluluğu Bildirileri*'nde yayınlanmış ve yirminci yüzyılın başlarında yeniden keşfedilene kadar fiilen unutulmuştu. Sevgili bezelye bitkileriyle yaptığı araştırmada Mendel'in bulduğu, kalıtımın yasalarıydı; bu yasalar bireysel özelliklerin bütün halde nasıl kalıt bırakıldığını ve her ebeveynden gelen farklı özelliklerin yavrularda çeşitli biçimlerde nasıl birleştirilebileceğini açıklıyordu. Onun çalışmasına kadar, kalıtımın nasıl işlediği açık değildi ve *karışımlı* kalıtım yok sayılamıyordu. Karışımlı kalıtımda yavruların özellikleri ebeveynlerdeki özelliklerin bir karışımıdır. Mendel bunun yanlış olduğunu buldu: Eğer doğru olsaydı, bezelye bitkileri kısa sürede, ebeveynlerinin ve büyük ana/babalarının renklerinin bir karışımı olan ortalama bir renk alırdı. Olan bu değildi. Örneğin, eğer kırmızı bir bezelye, beyaz bir bezelyeyle çaprazlanırsa sonraki nesilde Mendel pembe bezelyeler alıyordu; ama şaşırtıcı bir biçimde "torun" bezelyeler yeniden saf beyaz ya da kırmızı olabiliyordu. Beyaz özelliği karışıp gitmemişti; ama yalnızca eylemsiz

(çekinik) idi ve izleyen nesilde yeniden belirmişti. Özelliklerin kalıtımının karışımlı değil de korunumlu olduğu gözlemi, Darwin'in kuramı için son derece önemliydi. Yalnızca gelecek nesle bütün halde aktarılabilen özellikler bir toplumda yaygınlaşabilirdi ve yeni türlerin ortaya çıkışını açıklayabilirdi. Eğer özellikler karışıyor olsaydı, yeni herhangi bir özellik kısa sürede karışıp ortalamaya uyardı.

Darwin'in çalışması dönemin dirimselcilik karşıtları tarafından iyi karşılanmıştı. Helmholtz, Darwin'in düşüncelerini benimsemişti; "organik amaçlılığın yepyeni bir yorumlaması olasılığı" sunuyorlardı. Gerçekten de şimdi amaç, yaşam kuvveti ile birlikte bilim tarihinin raflarına kaldırılabilirdi. Ama hâlâ bir sorun vardı. Helmholtz, "Şimdi [Darwin'in kuramı hakkındaki] çekişme temel olarak türlerdeki çeşitlenimlere ne kadar etki alanı verilmesi gerektiği üzerinde yoğunlaşmıştır," diyordu. Sorun, Darwin'in kuramının *gereklilik* ile uğraşan kısımlarının sorun olmamasıydı. Yeni, yararlı bir özellik belirmesi halinde, Darwin'in kuramı onun doğal seçilimle bir toplumda nasıl yayılacağını düzgünce anlatıyordu. Fizikçilerin bununla hiçbir sorunu yoktu; on dokuzuncu yüzyıl fiziği düzenlilik ve katı doğa yasalarına dayanıyordu. Ama yeni özelliklerin nereden geldiğini hangi yasalar açıklayabilirdi? Bir yaşam gücü mü? Tanrı korusun! Gelişigüzellik mi? Çok daha iyi açıklamıyordu ve Helmholtz gibi katıksız bir mekanist için akıl almazdı. Gerçekten de, Aristoteles tarafından iki bin yıl önce reddedilmesinden o zamana dek gelişigüzelliğin bilimdeki yeri pek gelişmemişti. Her şey yasalara uymak zorundaydı. Ama değişimlerin yasası neydi?

2

Şans ve Gereklilik

Evrende var olan her şey şans ve gerekliliğin meyvesidir.
— DEMOKRİTOS

Tanrı'nın, evreni kendi bilgeliğine göre yarattığına inanıyoruz. Evren herhangi bir gerekliliğin ya da kör yazgının veya şansın ürünü değildir. Tanrı'nın özgür iradesinden ileri geldiğine inanıyoruz.
— *KATOLİK KİLİSESİ İLMİHALİ*, MADDE 295

Belli belirsiz hidrojen ve helyum demetleri evrenin sonsuzluğunda dönüyor. Kâinat engin ve boş. Ziyaretçilerin gözüne birden minicik, aydınlık bir ada ilişiyor: hiçlik denizinde bir gökada. Daha yakından bakınca adanın, daha küçük ışık noktalarından oluştuğunu fark ediyorlar: yıldız denen ufak çekirdek enerjisi ocakları uzayın soğuk karanlığına serpiştirilmişler. Pek çok yıldızın etrafında küçük kum taneleri ve gaz kabarcıkları, yıldızlarının aydınlığı çevresinde usulca dönüyorlar. Yıldızı tarafından 293 Kelvin dereceye dek güzelce ısıtılmış, kum tanesi gibi görünen gezegenlerden birinin üzerinde beyaz su buharı bulutları tuzlu su okyanuslarının koyu mavisi ve kıtaların sarı-kahvesi üzerinde güzelce süzülüyor. Bu küçük dünyayı ev edinmiş ufak, iki-ayaklı yaratıklar kendilerini çevreleyen sonsuz gizeme karşılık henüz

göz ucuyla birkaç çelimsiz yanıta erişmişken, evrenin merkezi olduklarına inanıyorlar. Kıkır kıkır gülen ziyaretçiler dev uzay gemilerini saklayarak yollarına gidiyorlar.

O sırada Dünya'da, dış uzaydan gelen güçlü varlıklar tarafından gözlemlendiklerinden tamamen habersiz insanlar, üstünlük sanrılarından sıyrılmaktan aciz görünüyorlar. Bildikleri kadarıyla yaşam barındıran tek gezegen bu ve milyonlarca tür arasında tek zeki yaşam biçimi kendileri. Yalnızca birkaç insan, bunda bir yanlışlık olduğunu hissediyor. Onlardan biri, *Calvin and Hobbes* adında bir kısa çizgi dizi hazırlıyor. Bu dizide, Calvin adlı küçük bir oğlan, "Evrende zeki yaşam bulunduğunun en iyi kanıtı bizimle iletişime geçmemiş olmalarıdır" gözleminde bulunuyor. Belki de gülmekten ölecekleri içindir.

Evrenin merkezi olduğumuza inanarak, tekrar tekrar yanlışlanan bir dolu varsayımda bulunduk: Hayır; Güneş Sistemi, Dünya'nın çevresinde dönmüyor. Hayır; evren, Pluton'un ya da Samanyolu gökadasının ötesinde sona ermiyor ve düşündüğümüzden çok daha büyük, bazı yerlerde yıldızlarla dolu ama çoğu yerde büyük şaşkınlık verici bir boşlukla kaplı. Hayır; özel bir yaşam kuvveti yok, bedenlerimiz doğanın bir parçası, moleküllerce işletiliyorlar. Ve hayır; tüm diğer hayvanlardan ayrı bir yaratım değil de onların yakın akrabalarıyız; biz dahil hepsi evrimin tarihi hataları. Kısacası, burada olduğumuz için şanslıyız.

Gururumuza bu son hakaret, burada (en azından kısmen) kazara, şans eseri bulunuyor olmamız, tüm cevizlerin en çetini olabilir. Ama şansın nesi bu kadar kötüdür?

Gelişigüzellik

Uzak bir yerde, söz gelimi Türkiye ya da Singapur'da gezerken kuzeninizin komşusuyla karşılaşırsınız. Komşu, bir şirkette tam size uygun bir iş pozisyonu açılacağı haberini

almıştır. Kısmet, değil mi? Beklenmedik olan gerçekleşince çoğu kişi bundan gizli anlamlar çıkarır. Kimi batıl inançlar edinir, kimi karmaya inanır, başkalarıysa Tanrı'nın takdirine. Şans eseri gerçekleştiğini, basit bir rastlantı olduğunu az sayıda insan kabul eder. Bu kadar insan, gelişigüzelliğin yaşamları üzerindeki etkisini neden reddeder? Gelişigüzellikten neden rahatsız oluruz? Gelişigüzellik karmaşayı, düzen yoksunluğunu getirir. Gelişigüzellik egemen olursa ne olacağı bilinmez. Ama bu, gerçekten doğru mudur?

On dokuzuncu yüzyılın sonuna kadar herkes gelişigüzelliğin dünyaya ilişkin herhangi bir açıklamada hiç yeri olmadığına inanıyordu. Ne var ki, insanlar gelişigüzellik kuruntusunun nasıl defedileceği konusunda anlaşamıyorlardı. Mekanistler, mekanik gerekliliğe inanıyorlardı: Eğer evrendeki tüm parçacıkların belirli bir andaki yerleri ile hızlarını bilseydik ve yeterince güçlü bir bilgisayarımız olsaydı gelecekteki her olayı öngörebilirdik. Dindarlar ise Tanrı'nın akıl sır ermez takdirine inanıyorlardı. Eğer bir şeyin neden olduğunu açıklayamıyorsanız, Tanrı öyle olsun istemiş demekti. Ve filozoflar ise ... gelişigüzellikten başka hemen her şeye inanıyordu. Eğer bir şey şans eseri olduysa, yalnızca bütün koşulları bilmediğimizden böyle göründüğü üzerinde uzlaşılıyordu.

Fakat açıkçası pek çok olay bizim öngörülerimizin ötesinde görünüyordu. Öngörülemezlik ile başa çıkmanın bir yolu onu kısmet, Tanrı'nın takdiri ya da insan bilgisizliği olarak görmekti. Bir diğer yol bilgisizliğimizi ölçmenin, öngörülemezi ıslah etmenin yollarını bulmaktı.

Kumarın Kısa Tarihi

Öngörülemezliği ölçmeyi ilk kez akıl eden kişinin kaygısı bilim yapmak değil kolay para kazanmaktı. Amaç, bir şans oyununda ne kadar para yatırılacağını bilmekti.

Kumar, kadim bir eğlencedir: Çarmıha gerilmiş İsa'nın yanı başında nöbet tutan Romalı askerler, onun bir avuç eşyasına konmak için kumar oynamışlardı. Bugün, kumar her zamanki kadar gözdedir. Las Vegas, en olmayacak yere kurulmuş koca bir şehir, bu günahkâr eyleme adanmıştır. Şehir, poker şampiyonalarına ev sahipliği yapar; rulet oyunları, yirmi bir, kumar makineleri ve paranızı yitirmenize yardımcı olmanın pek çok başka yolu burada her zaman bulunur.

Poker son yıllarda bir tür moda oldu; özellikle de fizikçiler arasında. Ne yazık ki, benim fizik sicilimin pek yardımı dokunmadı: berbat bir poker oyuncusuyum. Sorun şu ki blöf yapmakta çok kötüyüm. Bütün iyi poker oyuncuları duygularını saklayabilirler ve taktik ustasıdırlar. Ama neden fizikçiler genel olarak (benim dışımda) bu oyunda iyidirler? Nedeni, fizikçilerin olasılıklardan anlamasıdır.

Anladığım kadarıyla, pokeri kazanmanın iki yolu var: diğer oyunculardan daha iyi bir ele sahip olmak ya da diğer oyuncuları daha iyi bir ele sahip olduğunuza inandırmak. Pokerde bir eli ne daha iyi kılar? Pokerde bir el ne kadar az bulunursa, yani böyle bir ele sahip olmak daha az değerli bir ele sahip olmaktan ortalama olarak ne kadar daha seyrek gerçekleşiyorsa o kadar iyidir. Oyun kâğıdından gelişigüzel seçilmiş beş karttan belirli ellerin ortalama ne sıklıkla ortaya çıkacağına o elin *gelme olasılığı* denir. Bir "floş royal" –aynı destedeki kâğıtların as ile başlayan sıralı (ya da kesintisiz) dizisi– gelmesi olasılığı 649.740'ta 1'dir. Bir elde bir çift (aynı değerde iki kâğıt) gelmesi olasılığı çok daha yüksektir: 2,36'da 1. Bu, ne demektir? Demektir ki çok sayıda gelişigüzel dağıtılmış beş kâğıtlık elde bir "floş royal" yalnızca her 649,740 elde bir beklenebilirken, yaklaşık her 2,36 dağıtmadan birinde bir çift olacaktır. Tabi ki, bu, 650.000 defa oynarsanız elinize bir "floş royal" geçmesi kesin demek değildir. Daha ziyade, milyar-

larca ya da trilyonlarca defa oynarsanız elinize geçen "floş royal" sayısının toplam oyun sayısına bölümü 1/649.740'a yaklaşacak demektir. Ama kimse bir milyar defa poker oynamamıştır. O halde bunu nasıl bilebiliriz?

Poker ya da zar atma gibi şans oyunlarında değişik sonuçların değişik olabilirlikleri bulunduğu düşüncesi, kumarın kendisi kadar eski gibi görünüyor. Ne kadar yatıracağınızı başka nasıl belirlerdiniz? Fakat uzun zaman boyunca, değişik sonuçların tahmini nicel bilimdense deneyim ya da hisse dayandırılmıştı.

21 adlı filmde Kevin Spacey, öğrencilerine 21 oynayarak kasanın nasıl batırılacağını öğreten bozuk ahlaklı bir MIT matematik profesörünü canlandırmaktadır. Kâğıt sayan ve gizli işaretler kullanan öğrenciler Las Vegas kumarhanelerine üşüşür ve onları silip süpürürler. Bu, üniversite parasını çıkarmak için başvurulabilecek kesinlikle ilginç bir yol ve film için (gerçek bir hikâyeye dayanan) harika bir düşünce ama hiç de özgün değil: üniversite parasını kumarla ödeme fikrinin geçmişi *21*'den beş yüz yıl önceye dayanır.

Kumarı böyle dâhiyane bir şekilde kullanmayı ilk defa düşünen kişi 1501'de İtalya'nın Milano kentinde, evli olmayan bir çiftin istenmeyen erkek çocuğu olarak dünyaya gelmişti. Annesi Chiara'nın zaten çok sayıda çocuğu vardı ve bir tane daha istemiyordu. Bitkisel bir karışım kullanarak düşük yapmayı başaramamıştı, ama yaşaması umulmayacak kadar hasta bir bebek doğurmaktan memnundu. Bebek, annesinin yüzünü kızartarak, kırmızı şarapta yıkandıktan sonra kurtulmuştu. İşte böylece, bir olasılık kuramı geliştirecek ilk insan düşük olasılıklı yaşamına başlamıştı.

Kahramanımız büyürken avukat babası Fazio, beş yaşında çocuğun sırtına yığınla ağır kitaplar yükleyerek ve sokaklarda itip kakarak, onu kitap taşıyıcısı ve gezici yazı masası ola-

rak kullandı. Babası ancak oğlan sekiz yaşında ciddi biçimde hastalanınca pişman oldu ve ona Gerolamo Cordano adını vererek vaftiz ettirdi. Cordano, meraklı bir Yeniden Doğuş dahisiydi: fizikçi, matematikçi, kumarbaz, makine mühendisi ve olasılık kuramının kurucusu. Gerolamo büyürken, Fazio'nun geometri ve hukuk konusunda danışmanlık verdiği müvekkil ziyaretlerinin çoğunda babasına eşlik etti. Gerolamo on üç yaşında iken babası onu büyük Leonardo da Vinci ile tanışmaya götürdü. Oğlanın bilgiye, Latince öğrenmeye ve geometriye karşı sonsuz bir iştahı vardı; cadılık ve yıldız falından tutun da örümcek ağlarının yapımı ve kan dolaşımına kadar ilgisini çekmeyen hiçbir şey yoktu. Bilgin olma ve kendisine bir ün yapma yolunda ilerliyordu. Ne yazık ki, çok büyük umut vaat etmesine rağmen, babası öğrenimini sürdürmesi için onu uzağa göndermeyi reddetti.

Fazio bir gün öfkelenip karısına vurmuş ve zavallı kadın başını masaya çarpmıştı. Fazio şiddete başvurduğu için anında pişman oldu; ama istenmeyen oğlu Gerolamo'yu zamanla sevmiş olan Chiara bu olayı olabildiğince kullandı. Ha bire bayılıp, olaya tanıklık etmiş olan kız kardeşine yakınarak Fazio'dan oğlunun üniversiteye gitmesine izin vermesi için söz aldı. Bu şantaja istemeden razı gelen Fazio, kârlı bir alan olduğundan hukuku önerdi. Çıkarılması gereken bir cep harçlığı vardı ve Gerolamo'nun babası, pek çok baba gibi, harç ödemek zorunda kalmadan oğlunun öğrenim görmesini sağlamak istiyordu. Ne var ki hukuk Gerolamo'nun umurunda değildi. O, tıp doktoru olmak istiyordu; ama babası böyle pahalı bir alan için para harcamayı reddediyordu. Gerolamo parayı başka bir yerden bulmak zorundaydı.

Kumarda buldu. Gerolamo zar atmayı yeğliyordu çünkü oyunun olasılıklarına dair doğal bir sezgisi vardı. Hile yapmıyordu (bu, hilecilerin sık sık kendilerini çatı kirişlerine asıl-

mış sallanırken bulduğu bir dönemde tavsiye edilmeyen bir davranıştı); ama nasıl bahis yatıracağını biliyordu. Çok geçmeden, ünlü Padova Üniversitesi'nde tıp okumaya yetecek parayı biriktirdi. Kötü uygulamaları hakkında bir tez yazarak tabip arkadaşlarının sinirlerini bozmayı da içeren zorlu yıllardan sonra Cardano başarılı bir tabip ve Padova'daki tıp okulunun başkanı olmuştu. Tıp ve matematik, özellikle de cebir üzerine çok sayıda kitap yazdı. Ve kumar günlerini hiç unutmadı. Deneyimlerini paylaşmak için ilk kumar kuramını, *Liber De Ludo Aleae* yani Şans Oyunlarının Kitabı'nı yazdı.

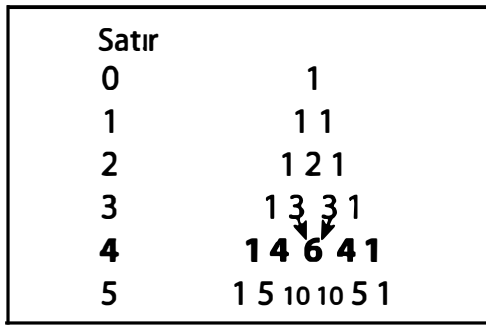
Cardano'nun kitabı yazılışından yüz yıl sonraya kadar basılmasa da olasılıkları hesaplama düşüncesini ortaya atan çığır açıcı bir yapıttı: eğer belirli bir durumun olası bütün durumlar arasında olabilirliğini bilmek istiyorsanız, durumun gerçekleşebileceği tüm yolları sayın ve bunu olası bütün durumların sayısına bölün. Bu hesaplama yöntemi, tüm durumların eşit derecede olası olduğunu varsayıyordu. İşte bir örnek: İki zarla toplam 5 atma olasılığınız nedir? İki zarı 66 yani 36 farklı biçimde atabilirsiniz: (1, 1), (1, 2), ... (6, 5); (6, 6). Toplam 5 atmanın kaç değişik yolu vardır? Sayalım: (1, 4), (2, 3), (3, 2), (4, 1). Dört yol eder. Böylece, iki zar atarak toplam 5 getirme olasılığı 4/36 = 1/9 eder. Biraz uğraşarak bir "floş royal" olasılığını bile bulabilirsiniz. Elli iki kâğıttan gelişigüzel beş kâğıt seçmek 2.598.960 değişik olası el sağlar. Bunlardan yalnızca 4 tanesi "floş royal" olacaktır (her deste için 1 tane). 4'ü 2.598.960'a bölünce 1/649.740 eder. Bunu hesaplamak için poker oynamanıza bile gerek yoktur.

Cardano, öykümüz için ilginç bir kahramandır. Bir tabip olarak insanların yaşamlarında rol oynayan şansa bağlı olayları anlıyordu. Karman çorman, gelişigüzel olaylar onun yaşamı idi. Olasılık kuramını kurdu, gizli iletiler yazmak için bir yöntem icat etti ve hatta benim şimdi yaşadığım şehir olan

Detroit ile bir ilgisi vardı. Hâlâ arabalarda kullanılan (ilkin bir su tulumbası düzeneği için tasarlanan) Kardan mafsalının mucidiydi. Ne yazık ki, sonunda gelişigüzelliğe yenik düştü ve bir dizi kötü şans onu önce hapishaneye sonra da fakirhaneye düşürdü.

Cardano'dan sonra, on yedinci ve on sekizinci yüzyıllarda şans oyunlarını matematiksel olarak ele almak olağan hale gelmişti. Zengin (ve herhalde yapacak işleri olmadığı için sıkıntıdan patlayan) soylular, çeşitli oyunların olasılık hesaplarını yapmaları için matematikçilere arka çıktılar. Matematikçi Blaise Pascal (1623-1662) ve Pierre de Fermat'ın (1601-1665) Chevalier de Méré tarafından *puan sorunu*nu çözmek üzere görevlendirilmesi de böyle bir olaydı: Eğer oyun çok erken kesilirse bahisler nasıl bölüştürülmeliydi? Durum şöyledir: Méré Şövalyesi, Dubois Kontu'nu basit bir zar atma oyununa çağırır (kurgulanmış durum) ve ilk 5 altıyı atan kazanır. On dakika oynadıktan sonra kont, aniden Versay Kralı ile görüşmeye çağrılır. Şu ana kadar, kont 3, şövalye ise 4 tane altı atmıştır. Hiçbiri diğerine güvenmemektedir. Ama on altı altından oluşan bahis parası, adil biçimde paylaştırılabilir mi? Kuşkusuz, bahis parası her bir oyuncunun hâlâ oyunu kazanabilme olasılığı ölçüsünde dağıtılmalıydı. Pascal, bu sorunun kendi başına çözemeyeceği kadar zor olduğuna karar verdi. Kendisine yardımcı olması için ünlü amatör matematikçi Fermat ile iletişime geçti. Fermat ile Pascal, bir süre bu sorun hakkında yazıştılar; ta ki Fermat sorunu Cardano'nun basit kuralını kullanarak çözmenin oldukça yorucu bir yolunu bulana kadar. Bu, Pascal'ın sayılardan oluşan bir üçgene dayanan genel bir denklem kurarak Fermat'ın sonucunu geliştirmesine esin kaynağı oldu; şimdi buna Pascal Üçgeni diyoruz.

Pascal üçgenindeki sayılar, n tane öğe içerisinden belirli sayıda öğe (söz gelimi k tane) seçebileceğiniz yolların sayı-



Şekil 2.1. Pascal üçgeni. Her sayı, hemen üstündeki iki sayının toplamına eşittir. Örneğin, dördüncü satırdaki 6 sayısı hemen üstündeki iki 3'ün (oklara bakınız) toplamına eşittir. Sayılar, toplam n (satır) olasılıktan k (sütun) nesnenin kaç değişik yolla seçilebileceğini gösterir. Bu üçgen, Pascal tarafından noktalar sorununu çözmek için kullanılmıştı. Metinde geçen dördüncü satır belirginleştirilmiştir.

sını veriyordu. Bir örnek lotodur. Lotoda, söz gelimi, olası 56 sayıdan 5 tane seçeriz. Bunu kaç yoldan yapabiliriz? Çok! Gelin önce daha kolay bir örnekte deneyelim: 4 öğeden; A, B, C ve D'den 2 öğe seçmenin kaç yolu vardır? Yanıtı bulmak için, Pascal üçgenindeki dördüncü satıra gideriz (Şekil 2.1). Bu satırda 1, 4, 6, 4 ve 1 sayıları vardır. Bu sayılar bize 4 öğe içerisinden (eğer 5 öğemiz olsaydı üçgenin beşinci satırına bakmamız gerekecekti vesaire) *k* tane öğeyi seçmenin kaç yolu olduğunu belirtirler. 1, 4, 6, 4 ve 1 sayıları soldan sağa sırayla eldeki 4 öğeden 0, 1, 2, 3 veya 4 öğe seçmenin kaç yolu olduğunu söyler.

Gelin adım adım ilerleyelim: Dördüncü satır üzerinde soldan sağa hareket ederken ilk sayı 1'dir. Bu sayı bize, 4 öğeden *sıfır* öğeyi kaç yoldan seçebileceğimizi söyler. 0 öğe seçmenin tamı tamına bir yolu vardır o da öğe *seçmemektir* (matematik bazen garip olabiliyor). Satırda bulunan bir sonraki sayı 4'tür;

4 öğeden *1* tanesini (yani A, B, C veya D'yi) kaç yoldan seçebileceğimizi anlatır. 4 içerisinden 1'den fazla öğe seçtiğimizde durum ilginç (ve daha az bariz) bir hal alır. 4 öğeden 2 tanesini seçmenin kaç yolu vardır? Dördüncü satırda bulunan bir sonraki sayıya bakarsak, bunu yapmanın 6 değişik yolu olmalıdır. Ve gerçekten de vardır: (A, B), (A, C), (A, D), (B, C), (B, D) ve (C, D) (aynı harfi iki defa seçmeye izin vermiyoruz).

Şimdi, 56'dan 5 sayı seçmenin kaç yolu olduğunu bulmak için üçgeni ta 56'ncı satıra kadar ilerletmemiz gerekir. Denemekte serbestsiniz, ama zor bir iş olduğunu çabucak anlayacaksınız. Sayılar epey büyür. Neyse ki, Pascal üçgenindeki herhangi bir noktayı, üçgeni çizmek zorunda kalmadan hesaplamak için bir denklem var. Buna, *ikiterimli katsayısı* denir ve öğe sayısı n, olasılıkların sayısı k, ve $n! = 12...n$ iken $n! / ((n - k)! k!)$ ile hesaplanır. $n!$ ifadesine n'nin çarpınımı (faktöriyeli) denir. Örneğin 3'ün çarpınımı $3! = 123 = 6$ eder. Bizim loto sorumuz için, 56 sayıdan 5 tane seçmenin 3.819.816 yolu olduğunu buluruz. Henüz lotoyu kazanamamış olmama şaşmamalı.

İkiterimli katsayıları, puanlar sorununu çözmeye nasıl yardımcı olur? Pascal ve Fermat, her bir kişinin hâlâ oyunu kazanabilmesinin kaç yolu olduğunu hesaplamak gerektiğini anlamışlardı. Eğer kazanmak için Méré Şövalyesi'nin iki ve Dubois Kontu'nun üç oyun alması gerekiyorsa, birisinin kazanması için en çok kaç el oynamaları gerekir? Yanıt, dört defadır (ya da 2 + 3 – 1 = 4). Neden? Eğer şövalye hiç oyun alamaz ya da bir oyun alırsa, kont en az üç el almış ve kazanmış. Eğer şövalye iki ya da daha fazla el alırsa, kont gereksinim duyduğu üçten daha azını almış demektir; ve oyunu kaybeder. Her iki durumda da birisi kazanacaktır.

Kazananı belirlemek için dört el daha atmaları gerektiğini artık bildiğimize göre, yalnızca şövalyenin dört elden ikisini

kaç yoldan alabileceğini hesaplamamız gerekir. Ve bu, daha demin çözdüğümüz sorunun aynısıdır: Kazanmasının altı yolu vardır (daha önceki A, B, C ve D öğelerimizi oynamaları gereken ellerin adı olarak düşünün). Eğer iki elden *fazlasını* alırsa, oyunu da kazanır; yani bu olasılıkları da hesaba katmak zorundayız. Eğer üç el alırsa, bunu yapmasının dört yolu vardır (Pascal üçgenine bakınız) ve eğer dört elin tümünü alırsa, bu başarıya ulaşmanın yalnızca bir yolu vardır. Bu durumda oyunu kazanmasının toplamda 6 + 4 + 1 = 11 yolu vardır. Buna karşılık kontun oyunu kazanmasının yalnızca 4 + 1 = 5 (dört elden üç ya da dördünü alarak) yolu vardır. Buna göre, dört el kalmışken oyunu durdururlarsa her birinin alacağı bahis parasının oranı (oyunu kazanmasının konttan daha fazla yolu olan) şövalye lehine 11/5 olur. Eğer ortada 16 altın varsa, şövalye 11 ve kont 5 almalıdır.

Bilgisizlik Bilimi

Pascal ile Fermat'ın puanlar sorununu çözdüğü sıralarda John Graunt (1620-1674) adlı bir düğme ve kurdele satıcısı Londra'nın ölüm kayıtlarında ilginç bir örüntü fark etti. Her ne kadar çok sayıda ölüm nedeni bulunsa ve her ölümün koşulları benzersiz olsa da ölüm sayıları her yıl aşağı yukarı aynı gibi görünüyordu. Yeterince büyük bir örnekleme (Londra nüfusuna) baktığı zaman Graunt tekil farkların önemsiz kaldığını ve genel örüntülerin belirdiğini bulmuştu. İstatistik bilimi doğmuştu.

İstatistik, bilgisizlik kuramı olarak adlandırılagelmiştir. Yerinde bir tanımlamadır. İçinde çok sayıda etmen bulunan karmaşık durumlarla karşılaştığımızda, olayların altında yatan nedenler hakkında bilgisiz olduğumuzda ve öncül olasılıkları hesaplayamadığımızda yaptığımız şey istatistiktir.

Atomların hareketlerinden hisse senetlerinin değerine pek çok durumda çok sayıda olay üzerinden ortalama aldığımızda ortaya örüntüler çıkar; tekil olaylara bakınca görünmeyen örüntülerdir bunlar. İstatistik, altta yatan düzenlilikleri ya da pek çok parçanın etkileşiminden doğan yeni olayları anlamaya yarayan ipuçlarını sağlar.

Graunt'un çalışması yeni doğan birinin belirli bir yaşa kadar yaşayabilmesinin olasılığını veren ilk *yaşam çizelgelerine* ön ayak oldu. Bu, yaşam sigortası şirketlerinin para kazanabilmek için gereksinim duyduğu türden bir bilgiydi: Yeterli sayıda insanı sigortaladıysanız ve yaşam çizelgelerini biliyorduysanız arada bir birileri zamanından önce ölse bile insanlardan, kâr etmenizi kesin kılmaya yetecek kadar para alabilirdiniz. Yaşam sigortası, gerçek yaşamdan alınmış olasılıklarla, iyi bilgilendirilmiş kumara dönüşmüştü. *Ayyaş* Yürüyüşü adlı kitabında Leonard Mlodinow, Graunt'un 1662 Londra'sına ait yaşam çizelgesini tekrarlar. 1600'lerin sonlarında Londralıların yüzde 60'ı on altıncı yaş günlerinden önce ölüyordu. Bu derece korkunç bir istatistiğin yanında çağımız Afganistan'ı cennet kalıyor. Orada yüzde 60 ölüm oranı altmış yaşa yakın. Karşılaştırmak açısından, Japonya'da yüzde 60 ölüm oranı doksan yaşa yakın.

İstatistik, iktisadi ve toplumsal verileri sayısallaştırma gereksiniminden doğmuş olsa da bu yeni bilimin doğa bilimlerine de yarar sağlayabileceği kısa sürede anlaşılmıştı. On sekizinci yüzyılda aynı doğa olayının tekrar tekrar ölçülmesiyle elde edilen verilerin, özellikle gökbiliminde, bir hatalar yasasını izledikleri gözlemlenmişti: Hatalar evrensel bir dağılıma uyuyor gibi görünüyorlardı. Ne var ki, hata dağılımlarına uyacak doğru matematiksel denklemi bulmak zordu. Ne de olsa, her bir ölçüm kümesi dağılıma sadece yaklaşık olarak uyuyordu ve ancak çok büyük sayıda ölçümden sonra yak-

laştırım, doğru denklemi kestirmeye yetecek kadar iyi hale geldi. Birçok saygın matematikçi tarafından yapılan birkaç yanlış tahminin ardından Alman matematikçi Carl Friedrich Gauss (1777-1855) kendi gökbilimsel verilerinin bir kısmını kullanarak bunların olağan dağılım denilen duruma uygun göründüğünü anladı.

Olağan dağılım, en başından beri matematikçilerin burnunun ucundaydı. Fransız matematikçi ve kumar kuramcısı Abraham de Moivre (1667-1754) 1733'te basılan Şansların Öğretisi adlı kitabında Pascal üçgenini çok büyük, Pascal'ın yöntemiyle fiilen elde edilebileceğinden çok daha büyük sayıda denemeye genişleten bir denklem yayınlamıştı. Büyük sayıların kısıtlamasında, Pascal üçgeni çana benzeyen bir eğriyi tanımlayan bir denklemle kestirilebiliyordu. Gauss'un gökbilim verilerindeki hataların dağılımında bulduğu, bu çan eğrisi ya da olağan dağılımdı. Fransız matematikçi Laplace, Gauss'un kaldığı yerden aldı ve bir dizi gelişigüzel etkiye dayanan her ölçümün olağan dağılıma uyan hatalara sahip olma eğiliminde bulunduğunu kanıtladı. Laplace'ın, insanların boylarından yıldızların kütlelerine kadar çeşitli dağılımları yordayabilen merkezi sınır kuramı bugün istatistiğin çok önemli bir parçasıdır.

İstatistikte olağan dağılımın kullanımı Belçikalı bilim insanı Adolphe Quetelet (1796-1874) tarafından kusursuzlaştırılmıştı. Quetelet, eline geçirebildiği her şeyi istatistiki çözümlemeden geçirmişti: denizcilerin göğüs çevreleri, erkeklerin ve kadınların boyları, çeşitli araçlarla işlenmiş cinayetler, ayyaşlık ve evlilikler. Nereye baktıysa olağan dağılımı buluyordu. Ve bulamadığında, bir şeylerin ters gittiğini anlıyordu. Örneğin, Fransız ordusundaki acemi askerlerin boylarının garip bir biçimde ölçeğin alt tarafında eksik kaldığını bulduğunda askerlik yaşına gelmiş pek çok kısa boylu erkeğin hizmetten

kaçmak için boyları ile ilgili yalan söylemiş olduklarını anladı. Askerlik hizmeti için boy alt sınırı 157 santimetre idi. Eğer boyunuz 157,5 santimetre idiyse, ölçüm sırasında dizlerinizi birazcık kırıp korkulan askerlik hizmetinden neden kaçmayaydınız ki?

Quetelet'in çalışması hata kanununun, olağan dağılımın ve merkezi sınır kuramının nasıl hemen her şey için geçerli olduğunu örneklerle göstermişti. Kitapları yalnızca geleceğin sosyologları tarafından değil aynı zamanda geleceğin fizikçileri ve biyologları tarafından da şevkle okunuyordu. İstatistik eğer iktisat, tıp ve gökbilimde yararlı idiyse başka alanlarda neden olmasındı? 3. Bölüm'de göreceğimiz üzere, James Clerk Maxwell ve Ludwig Boltzmann gibi on dokuzuncu yüzyıl fizikçileri atom ve moleküllerin istatistiğini geliştirmek için Quetelet'in çalışmasından yararlandılar.

Charles Darwin'in kuzeni matematikçi Francis Galton, Quetelet'in düşüncelerini geniş yelpazeli biyolojik olaylara ilk defa uygulayanlardandı. Olağan dağılımın, bir canlıya dair hemen her ölçüm için geçerli olduğunu buldu: boylar, organların kütleleri, uzuvların çevreleri. En önemli buluşlarından biri *ortalamaya doğru geri çekilme* idi: Galton, bir dağılımın uçlarında olan bir ebeveynin, örneğin çok kısa boylu bir erkek ya da çok uzun boylu bir kadının çocuğunun genelde dağılımın ortalamasına doğru "geri çekildiği"ni buldu. Diğer bir deyişle, sıra dışı biçimde kısa boylu bir erkeğin oğlu babasından daha uzun ve sıra dışı biçimde uzun boylu bir kadının kızı annesinden daha kısa olma eğilimindeydi. Mozart'ın çocukları, babaları gibi dahi değillerdi; Einstein'ınkiler de öyle. Ve ortalama zekâ seviyesinin altındaki ebeveynlerin genelde kendilerinden daha zeki çocukları oluyordu. Önünde sonunda hepimiz ortalamaya yöneliyorduk. Bu, bir bakıma iyi bir şeydir. Dehanın ne zaman, ne şekilde ortaya çıkabileceğini

kestirmek mümkün değildir ve bu, Galton'un insanların seçici bir şekilde çiftleştirilmesi yoluyla insanlığın geliştirilebileceği düşüncesi olan soyarıtımının (öjenik'in) kurucularından birisi olmasını daha da kafa karıştırıcı yapar. Bu korkunç düşünce ile gelen bariz insan hakları sorunlarının ötesinde, Galton'un kendi "ortalamaya doğru geri çekilme"si başarı beklentisinin epey kuşkulu olacağını sezdiriyordu. Zekâ seviyesi yüksek iki insanı "çiftleştirmek", çocuklarının ebeveynlerden daha zeki hatta ebeveynleri kadar bile zeki olacaklarını asla güvence altına alamazdı. Galton'un kendi "ortalamaya doğru geri çekilme" yasasına göre, daha zeki bir birey elde etmek için "daha az zeki" iki insanı "çiftleştirmek" daha mantıklı olacaktır.

Trajik biçimde yanlış yola sapmış bu düşüncelere rağmen Galton istatistiğe *ilinti katsayısı* gibi başka önemli katkılarda da bulundu. Bu istatistik, iki farklı değişkenin istatistiki olarak nasıl bağlı ya da ilintili olduklarını ölçüyordu. Çağdaş biyoloji ve tıbbın temel istatistik araçlarından olan ilinti katsayısı matematiksel olarak geçerlidir ama dikkatle kullanılmalıdır. Birkaç yıl boyunca leyleklerin sayısı ile bebek doğumları ilintili çıktı diye bebekleri leylekler getiriyor sonucuna varılamaz. İlinti, olası bir nedenselliğin belirtisidir; ama kanıtı değildir.

Galton'un ve Quetelet'in düşünceleriyle istatistik on dokuzuncu yüzyılda serpildi. Biyolojinin ayrılmaz bir parçası haline geldi ve Mendel istatistiği kullanarak soyaçekimin yasalarını keşfetti. Şimdi sahne, gelişigüzelliği yaşamın öyküsünde önemli bir oyuncu olarak tanımaya uygun hale gelmişti.

Gelişigüzellik ve Yaşam: Üç Görüş

Şans mı gereklilik mi sorusu insan zihnini binlerce yıl meşgul etmiştir. Bu sürenin büyük bir kısmında felsefeciler, dinbi-

limciler ve bilim insanları gelişigüzelliği doğada herhangi bir anlamlı işlevden mahrum bıraktılar. Gelişigüzellik korkusunun en bariz kurbanı atomculuktur. Ne var ki, on dokuzuncu yüzyılın sonları ve yirminci yüzyılın başlarındaki bilimsel gelişmelerle bu duruşu korumak gittikçe daha zor hale gelmişti. Gelişigüzellik önce, Quetelet ve Galton'un çalışmalarıyla biyolojide ve sonunda fizikte boy göstermişti. Gelişigüzelliğe dair son çatışmalar atomların varlığı, istatistiki mekanik ve kuantum mekaniğinin ortaya çıkışı ve moleküler evrim ve değişinimlere (mutasyonlara) dair yeni kavrayışlar üzerine tartışmalarla gerçekleşmişti.

Gelişigüzellik tartışmasında pek çok tanınmış öncünün adı geçer. On dokuzuncu yüzyılda istatistiki fiziğin kurucularından Avusturyalı fizikçi Ludwig Boltzmann, Demokritos ve Epikuros'tan iki bin yıl sonra hâlâ inanılmayan atomların varlığını savunmuştu. Yirmi yıl sonra, Brown Hareketi hakkındaki ünlü makaleleri ile Albert Einstein atomların varlığını kanıtlamıştı ama yeni kuantum mekaniği biliminin özünde gelişigüzellik üzerine kurulu olmasının doğurabileceği sonuçlar onu mutsuz ediyordu. Bu tartışmalar biyolojide de sürdü. Quetelet ve Galton istatistiğin fizyolojiye hâkimiyetini gösterdiğinden ve evrim kuramı, yaşamda yeniliğin etmeni olarak gelişigüzelliği ortaya koyduğundan beri yaşamın tarihinde şansın etkisi üzerine büyük kavgalar kopmuştu. En öne çıkan savaşçılardan üçü D'Arcy Wentworth Thompson (1860-1948), Pierre Theilhard de Chardin (1881-1955) ve Jaques Monod (1910-1976) idi.

İngiliz matematikçi ve biyolog Thompson en çok matematiksel ilkelerin, canlıların biçim ve kuvvetlerini nasıl yönlendirdiğine dair hayret verici kavrayışlarla (ve pek çok büyüleyici çizimle) dolu 1917 basımı başyapıtı *Gelişim ve Biçim Üzerine* ile tanınıyordu. Thompson ilahi yaşam kuvvetlerine

inanmıyordu. Matematiksel ya da fiziki bir açıklama işe yarayacakken belirsiz nedenlere sığınmak ona saçma geliyordu. Doğanın tamamında etkili kesintisiz bir karmaşıklık görüyordu ve bu yüzden de canlı ile cansız arasında bir ayrım görmüyordu. "Organik ve inorganik, canlı ve cansız olgular arasında farkların aranması pek çok insanın zihnini kurcalamışken sadece birkaç kişi ilkeler topluluğu ya da temel benzerliklerin arayışına girişmiştir. ... Hücre ve doku, deniz kabuğu ve kemik, yaprak ve çiçek, maddenin çok sayıda kısımlarından birkaçıdır ve [bu kısımların] parçacıklarının hareketleri, biçimlenişleri ve [bağlı bulundukları kısımla ve birbirleriyle olan] uyumları fizik kanunlarına tabidir."

Thompson alçakgönüllüydü; yaşamsal olayların tamamının yalnızca fizik kanunlarıyla açıklanamaması olasılığına pay bırakmıştı. Ama kendi çağının biyologlarının çok çabuk pes ettiklerini ve eğer bilim insanlarına konuyla ilgili karmaşıklıklara dair kavrayış geliştirmelerine yetecek süre verilirse çoğu yaşamsal olayın *açıklanabileceğini* hissediyordu. Amaç ile mekanizma arasındaki savaşta son nedenlere sığınmanın yararlılığını anlamıştı ama orada durulamayacağını, yapıların nasıl ortaya çıktığına dair fiziksel nedenleri bulmak gerektiğini anlamıştı. "Aristoteles'in kıssasında ev, insanlar içinde yaşayabilsin diye oradadır; ama aynı zamanda inşaatçılar taş üstüne taş koyduğu için oradadır." Thompson'a göre tam bir açıklama, yapının hem neden orada olduğuna hem de nasıl inşa edildiğine dair bir açıklama içermeliydi.

Diğer yandan, Thompson mekanistik açıklamalara düşkündü, ama evrim kuramını desteklemiyordu. Ona göre açıklamalar, gereklilik açıklamaları olmalıydı; şansın payı olamazdı. Aynı zamanda teolojik geçiştirmelerden de hoşlanmıyordu: "Doğa'nın işleyişini inceleyip harikulade yapıtlarını şansa veya kazaya ya da Tanrı'nın anlık müdahalesine

aylakça atfetmek ne kadar kolay ve ne kadar boş." Thompson'a göre, bilgisizliğimiz ortaya çıktığında, şans, Tanrı ya da herhangi bir dışsal yaşam ilkesine sığınmak bizi gerçek nedenleri bulmak gibi ağır bir işi yapmaktan alıkoymak için tasarlanmış ucuz bir aldatmacaydı.

Thompson son nedenleri nazikçe küçümserken, Fransız Cizvit rahip, paleontolog ve antropolog Chardin onları (atomları ve molekülleri bile daha yüksek bir amaca bağlı görerek) övüyordu. Chardin, yaşamını bilim ile dinin uzlaştırılmasına adadı. Bir bilim insanı olarak, canlı dünyanın gelişiminde evrim kuramının en iyi açıklama olduğunu biliyordu ve coşkulu bir evrim savunucusu olmuştu; fakat durum biraz karışıktı: Başyapıtı İnsan Olgusu'nda (1930'larda yazılıp 1955'te basılmıştı) Chardin, evrimi daha karmaşık ve ileri yaşam biçimlerine doğru ve sonunda tek, evrensel bir zihne (kendisi bunu Tanrı ile eş tutuyordu) ulaşacak yukarı yönlü bir hareket olarak düşünmüştü. Chardin'e göre evrim gizemli bir ruhsal enerji, henüz ölçülmemiş ve keşfedilmemiş ama yine de evrenimizin evrimindeki ilerlemeden açıkça anlaşılan bir enerji tarafından yönlendiriliyordu. Zihin birincildi, maddeyi beraberinde getiriyordu. Chardin'in felsefesi "evrenin malzemesinde ruh ve düşünceye öncelik" vermekti. Voltaire bu gibi düşüncelerle iki yüz yıl önce alay etmişti, ama şimdi hayranlık uyandırıcı evrim tarihinin daha iyi anlaşılması ve insanlığın yerini tanımlama gereksinimi bu gibi cancı felsefeleri yeniden moda haline getirmişti.

Chardin'in felsefesi ne yardan ne serden geçmenin bir yolunu sunuyor gibi görünüyordu: Evrimi ve bütün bilimsel bulguları kabul edebilir ve aynı zamanda, biraz görünmez de olsa, yüksek bir yönlendirici kuvvete de inanabilirdiniz. Fakat varoluşumuz hakkındaki bu orta yolcu tutumuna karşın, pek az insan onun düşüncelerinden memnundu. Kilise Char-

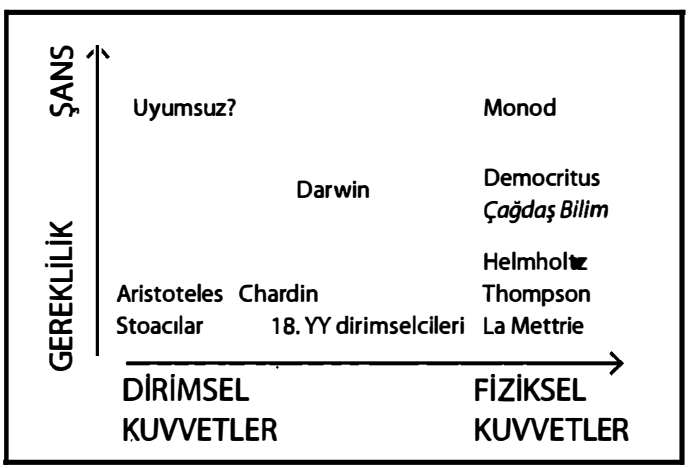
din'in düşüncelerinin geleneksel ilahiyattan çok uzaklaşmış olduğunu hissediyor, bilim insanlarıysa yalnızca insanlığı bütün varlıkların merkezine yerleştirme gereksinimini doyurmak için açıklamalara bilinmeyen kuvvetlerin eklenmesini takdir etmiyordu.

Chardin'in düşüncelerini hor gören bilim insanlarından biri Fransız biyokimyacı ve Nobel Ödülü sahibi Jacques Monod idi. *Rastlantı ve Zorunluluk* adlı kitabının "Dirimselcilikler ve Cancılıklar" başlıklı bölümünde Monod, Chardin'i mantığı "bulanık" ve tekniği "zahmetli" olmakla eleştirmişti. Ama hepsinden öte "[onun] felsefesinin düşünsel omurgasızlığı karşısında şaşkın" idi. "[H]erhangi bir orta yola varmak için ne pahasına olursa olsun uzlaşma isteği" var gibi görünüyordu.

Fakat Monod için bile, atomların körlemesine hareketleri ve cansız kanunları ile yaşamın karmaşıklığını bağdaştırmak çok büyük bir gizemdi. Herhangi bir dirimselci ya da cancı açıklamaya alerji duyan ve fizik kanunlarının kendi başlarına nasıl olup da yaşamın karmaşıklığına yol açabileceğini (bu, Thompson'un düşüncesiydi) göremeyen Monod bu ikilemi gelişigüzelliği ön cepheye sürerek çözümledi. Monod'a göre yaşamın başlama olasılığı akıl almayacak kadar düşüktü. Bu bir kez gerçekleştiğinde, içine yeterli miktarda gelişigüzellik katılmış evrim devreye girmişti. Thompson da Monod da Chardin'in ruhsal enerjisi gibi yönlendirici ilkeleri reddederken şans ve gerekliliğin payı konusunda oldukça ayrı düşüyorlardı.

Yaşamın nasıl oluştuğu, nasıl işlediği (metabolizma ve gelişim) ve evrim tarihinin nasıl seyrettiği soruları pek çok şekilde yanıtlanabilir. Ne var ki, bu sorulara verilen yanıtların çoğunu iki boyuta ayırabiliriz. Bir boyutta "yalın fizik" karşısında yüksek kuvvetler (yaşam kuvvetleri, ruh) ve di-

gerinde şansın karşısında gereklilik sorusu vardır. Şekil 2.2 bu çeşitli görüşleri gözümüzde nasıl canlandırabileceğimizi göstermektedir. Yaşamın kökeni ve doğası ile ilgili neden bu kadar çok görüş var? Basit fizik kurallarının yaşamın karmaşıklığına nasıl yol açabileceğini görmek zordur, bunu inkâr edemeyiz; ama aynı zamanda bilim insanları tekrar tekrar belli biyolojik olaylara dair geçmişteki bilgisizliğin bugünün bilgisine dönüştüğünü bulmuşlardır; aynı basit fizik kurallarına dayanan bilgidir bu. Dolayısıyla hem Thompson hem de Monod'un uyarısına kulak vermeliyiz: Bilgisizliğimizi dindirmek için dış ilkelere sığınma gereksinimi duyduğumuzda durup beklemek daha akıllıca olur. Açıklama arayışımızı tercihen bilinen bilimin içinde sürdürmeliyiz. Bu yaklaşım şimdiye dek bize çok iyi hizmet etti. Chardin, "fizik ile biyolojinin bağlantısının" hücre içinde yatıyor olması gerekti-



Şekil 2.2. Çeşitli bilim insanları ve düşünürlerin yaşamı şans ya da gereklilik ve yaşam kuvveti ya da fiziksel kuvvetler bakımından nasıl açıklamış olduklarının basitleştirilmiş bir gösterimi.

ğini biliyordu. Ne var ki, hücrenin "halen kapalı bir kitap" ve "zapt edilemez bir kale" olduğuna inanıyordu. Chardin'in döneminden bu yana, bu hisarın büyük kısmı aşılmış, açıklamalarımızın derinliği oldukça artmıştır ve hücre eskisi kadar esrarengiz değildir. Ve bütün bunda kılavuzumuz fizik ile kimya olmuştur.

Çeşitlilik ve Atom Fiziği

On dokuzuncu yüzyılın sonunda dirimselcilik fizik tarafından gözden düşürülmüştü ve *Türlerin Kökeni*, amacı gözden düşürmüştü ama pek çok bilim insanı gelişigüzelliğin önemli bir payı olabileceği düşüncesini henüz kabul edememişti. Darwin'in kuramı yaşam biçimlerinin çeşitliliği ve gezegenimizin biyolojik tarihi için akla yatkın bir açıklama getirmişti; amaç ya da ilahiyat içermeyen bir açıklama. Ama fizik ile evrimin birlikteliği eğretidir. On dokuzuncu yüzyıl fiziği doğa kanunlarına ve gerekliliğe dayanıyordu. Buna karşın evrimin işlemesi için çeşitlilik ve yenilik (şans) gerekiyordu. İkisi nasıl uzlaşabilirdi?

Uzlaşma yavaş yavaş geldi ve fizikçilerin yoğun yardımı ile gerçekleşti. 1800'lerin sonunda termodinamiğin bütüncül kanunları (maddenin davranışını basınç, hacim ve sıcaklık gibi özellikleri kullanarak tanımlayan kanunlar) daha temel bir kurama indirgenmişti. Bu kuram, maddenin bütüncül özelliklerini atomların hareketleri üzerinden açıklıyordu. 3. Bölüm'de daha ayrıntılı inceleyeceğimiz bu yeni kurama, ilkin kinetik kuram denmişti; ama büyüyüp, gitgide daha çok olayı içerdikçe istatistiki mekanik olarak bilinir oldu. Gelişigüzellik fiziğin kabul gören bir parçası olmuştu ve büyük sayıların istatistiki ortalaması ile işlenen atomların gelişigüzel hareketleri şimdi iyi tanımlanmış olasılık dağılımları ile açıklanabilirdi.

Yirminci yüzyılın başlarında atomlar ve ışık üzerine yürütülen çalışmalar şans ve olasılık kavramlarını açıkça içeren başka bir kurama önayak olmuştu: kuantum kuramı. Gerekliliğin amiral gemisi, klasik fizik, şimdi kökten istatistiki bir doğa resmi ile değiştirilmişti. Bu resimde, bir parçacığın nereye gideceği ya da ne kadar enerjisi olduğu asla kesin olarak bilinemezdi. Bütün hesaplayabildiğimiz olasılıklardı. Kuantum mekaniği şaşırtıcı yeni deneysel sonuçları açıklama gereksiniminden doğdu. Örneğin 1800'lerin sonlarından 1900'lerin başlarına dek deneyler bir dolu yeni ve gizemli ışımalar ortaya koydu: X ışınları, elektron ışınları ve alfa, beta, gama ışımaları. Bu çeşit yeni ışımaların incelenmesi yeni kuantum bilimine itici güç sağladı. Ve 1920'lere gelindiğinde bu ışımalar biyolojide de köklü bir değişime yol açacaktı: Fizikçiler, ışımanın (radyasyonun) biyolojik madde üzerine etkilerini araştırmaya başlıyorlardı.

Kromozomlar, DNA balyaları, 1882'de Alman biyolog Walther Flemming (1843-1905) ve başkaları tarafından keşfedilmişti; ama önemleri hemen anlaşılınamıştı. Her ne kadar hücre bölünmesi sırasında eşlenseler de soyaçekimdeki payları anlaşılınamıştı; çünkü Mendel'in çalışmaları karanlıkta kalmıştı. Ne var ki, 1900'e gelindiğinde Mendel'in çalışmaları yeniden keşfedilmişti ve Alman biyolog Theodor Boveri (1862-1915) ile Amerikalı meslektaşı Walther Sutton (1877-1916) kromozomlarla Mendel'in kalıtsal özellikleri arasındaki bağlantıyı kurdular. 1909'a gelindiğinde Amerikan dölütbilimci Thomas Hunt Morgan (1866-1945) meyve sineği *Drosophila* (hızlı üreyen bir hayvan) üzerinde ünlü genetik deneylerine başlamıştı. Biyolojik araştırmanın ivmesi şimdi Atlas Okyanusu'nun karşısına geçmişti. Morgan, Mendel'in düşündüğünün aksine her özelliğin bağımsız olmadığını ve bağlılığın değişik dereceleri olduğunu keşfetti. Bu durum, özelliklerin kromozomlar üzerinde, birbirine yakın olanların

birlikte kalıt alınmasının daha yüksek olasılık taşıdığı bir tür doğrusal düzenlenme içinde tutulduğunu akla getiriyordu. Özelliklerin karışması, doğrusal moleküllerin çaprazlanmasına bağlanıyordu. Çaprazlanma sürecinde yavrular, her iki ebeveynden gelen genlerin bir karışımını alıyordu. Eğer iki gen kalıtım molekülü üzerinde birbirlerine yakın konumlanmışa yeniden karılma sırasında ayrılarak kalıt alınmaları olasılığı daha düşüktü. Ne var ki, çaprazlanma toplumlardaki çeşitliliğin yalnızca bazı yönlerini açıklayabiliyordu. Yepyeni özelliklerin nasıl ortaya çıkabileceğini açıklamıyordu; ama bu yeni özellikler evrim için gerekliydi.

1920'ye gelindiğinde, genetikteki çok sayıda öncünün yorulmak bilmeyen çalışmaları sayesinde, kalıtsal bilginin dolanarak kromozomlar halini almış doğrusal moleküller boyunca dizildiği açık bir hale gelmişti. Kanıt, yeni ışınım (radyoaktivite) biliminden gelmişti ve ışımanın anlaşılması ile türlere yalnızca hazırda bulunan özelliklerin yeniden karılmasının ötesinde nasıl yenilik ve çeşitlilik kazandırılabileceği üzerine yeni bir düşünce oluştu. Bu öncülerden birisi Morgan'ın doktora öğrencilerinden Amerikalı genetikçi Hermann Joseph Muller (1890-1967) idi. Muller, X ışınları ve ışınımın meyve sineklerindeki değişinim hızına etkisi ile ilgilenmeye başladı. Değişinimleri önceden beri araştırmaktaydı; kalıtsal malzemedeki bu nadir ve kayda değer değişimler genelde zararlıdır. X ışınlarının denetimli bir biçimde değişinimler tetikleyebileceğini umuyordu. Üç yıllık hatalı çıkışların ardından (X ışınları meyve sineklerini kısırlaştırmıştı ve inceleyebileceği yavrular üretememişlerdi) 1926'da bir atılım gerçekleşti. X ışınlarının miktarını ayarlayan Muller, X ışını miktarı ile değişinim olasılığı arasında doğrudan bir ilişki bulmayı başarmıştı. Bu çalışma, ışınımın bir türde yeni kalıtsal özelliklerin oluşması olasılığını artırdığını belirlemişti; sonunda şans "rüştünü ispat ediyordu".

Muller, Berlin'de Rus genetikçi Nikolai Timoféeff (1900-1981) ile birlikte çalışarak kesin sonuçları 1932'de aldı; ama kalıtsal maddenin moleküler doğası bir gizem olarak kalmıştı. Bu noktada Timoféeff'in laboratuvarına genç bir atom fizikçisi katıldı. Max Delbrück (1906-1981) atom fiziği bilgisini kullanarak Muller ve Timoféeff'in verilerini kuramsal olarak açıklayabiliyordu. Her ne kadar kalıtsal malzemenin doğası bilinmiyor olsa da Delbrück onun bir molekül olduğunu varsaymamız halinde kalıtsal malzemenin atom fiziği ve termodinamiğin yasalarına uyması gerektiğini iddia etti. Az tanınan *Göttingen Bilim Topluluğu Tutanakları*'nda yayınlanan, bugün ün kazanmış 1935 yeşil kitapçığında Delbrück, Timoféeff ve Karl Zimmer (1911-1988) değişinim hızlarının sıcaklığa ya da X ışını miktarına bağlılığı üzerine veriler sundular. Bu sonuçlar dönemin atom ve ısıl fiziği ile açıkça uyumluydu.

Böylece, dikkate değer bir öykü yirminci yüzyılın ilk yarısı boyunca gelişti: Soyaçekim ve çeşitlilik gibi eskiden gizemli olan *biyolojik* süreçler, ölçülebilir *fiziksel* varlıklarla bağlantılı hale gelmişti. Buna karşılık, Helmholtz'ün kazanımı özünde kısıtlayıcı olmuş, yaşam kuvvetlerini olası açıklamalar arasından çıkarmıştı. Ne var ki, Helmholtz ve on dokuzuncu yüzyıl bilim insanı yoldaşları yaşam işletmesinin nasıl çalıştırıldığını açıklayamıyorlardı. Bu işletme moleküler ölçekte çalıştırılıyordu; fakat on dokuzuncu yüzyıl bilimi bu ölçeğe inemiyordu. İlk kez Muller, Timoféeff, Delbrück ve başkalarının çalışmaları sayesinde yaşamın en derin gizemlerinden bazıları fiziksel, *moleküler* varlıklarla bağlantılandırılmıştı. Moleküler biyoloji doğmuştu.

Yaşam Nedir?

Bir Johns Hopkins Üniversitesi mezunu olarak, 1933 Nobel Ödülü sahibi ve dalga mekaniğinin (kuantum mekaniği

hesaplamalarında en yaygın kullanılan biçimin) kurucusu Erwin Schrödinger'in (1887-1961) Walther J. Moore tarafından yazılmış yaşamöyküsünde bulduğum bir anıyı beğenirim. Nazi Avusturya'sından kaçıp ABD'ye sığınan bilim insanı Schrödinger'e Johns Hopkins Üniversitesi'nde bir iş teklif edilmiştir. Eskiden beri süren geleneğe uygun olarak ev sahibi üniversitenin öğretim üyeleri seçkin konuklarının güzel zaman geçirmesini isterler. Gerçek Baltimore geleneğiyle, ünlü Maryland yengeçlerini tatmak için bir deniz ürünleri lokantasında toplanırlar. O dönemde halihazırda Old Bay çeşnisi var mıydı bilmiyorum; ama Schrödinger yemeği çok beğenir ve güzel bir bardak biranın yanında iyi gideceğini hisseder. Ne yazık ki alkol yasağının en sıkı olduğu zamanlardır. Mekân sahibi özür diler; bira yoktur. Schrödinger, bunun yerine, İrlanda'nın Dublin kentindeki bir işi seçmeye karar verir.

Eğer 1940'larda Nazi yönetiminden kaçan başka bir sığınmacı olan X ışınımı fiziğinin öncülerinden Paul Peter Ewald (1888-1985) tarafından Schrödinger'in dikkatine sunulmamış olsa idi Delbrück'ün çalışması yayınlandığı az bilinen dergide kalacaktı. Schrödinger "Gen Değişinimi ve Gen Yapısı" adlı yeşil kitapçığı ilk okuduğunda büyülenmişti. Schrödinger'e göre Delbrück, Timoféeff ve Zimmer'in yeşil kitapçığı bir esin kaynağıydı.

Schrödinger, teknik makaleyi Dublin'deki Trinity Koleji'nde dört yüzün üzerinde dinleyicinin katıldığı bir dizi esin verici ders ve sonrasında ünlü kitabı *Yaşam Nedir?* için kullanmıştı. Kitabında Delbrück ve çalışma arkadaşlarının bulgularını güncel bilimin bağlamına oturtmuş ve bu bilim insanlarının daha dikkatli çıkarımlarına dayanarak cesur tahminlerde bulunmuştu. Her ne kadar Schrödinger'in tahminlerinin pek çoğu yanlışsa da kitap, biyolojiye giren pek çok fizikçiye esin kaynağı olmuştur.

Kitap epey kısaydı (bendeki baskısı yalnızca doksan sayfa), ama Schrödinger yaşamın kafa karıştırıcı yönlerinin çoğuna, özellikle kalıtım maddesinin doğası, büyüklüğü ve şaşırtıcı kararlılığına parmak basmıştı. Schrödinger, kalıtım maddesinin büyüklüğünü kromozomların mikroskobik gözlemlerine dayandıran ve bir genin büyüklüğünü yaklaşık 30 nanometreküp (bir molekül için yine de büyük bir hacim) olarak ortaya koyan kaba tahminlere aşinaydı. Delbrück, Timoféeff ve Zimmer eğer X ışınları her bin atomdan birini iyonlaştıracak kadar güçlü ise değişinimin neredeyse kesinlikle gerçekleşeceğini kestirmişlerdi. Gen değişinimlerinin gen taşıyan bir moleküldeki atomik değişikliklerden kaynaklandığını varsayan Schrödinger, Delbrück'ün çalışmasını bir adım ileriye götürdü: Eğer bin atomdan birini iyonlaştırmak (neredeyse) kesinlikle bir değişinime neden oluyorsa bir genin büyüklüğü yaklaşık bin atom, yani yaklaşık 3 nanometreküp kadar olmak zorundaydı.

Delbrück ve çalışma arkadaşlarının akıllıca kaçındığı bu çıkarım dönemin moleküler biyologlarına bile pek anlamlı gelmemişti. Değişinimler, köklerin (bir elektronu eksik moleküller) oluşmasından ileri gelir; ki bunlar 3 nanometreden çok daha uzun mesafelere dağılabilirler. Dahası, bugün genetik malzemeyi (şimdi DNA olarak bildiğimiz) onarabilen, onarma enzimleri denen, moleküler makinelerin var olduğunu biliyoruz. Bu bakımdan, gerçekte değişinimler kimyasal hasarın hücresel düzenek tarafından düzgünce onarılmamasının sonucudur. Yine de Schrödinger'in kestirimi yanlış öncüllere dayansa bile hayal gücünü mahmuzlamıştı. Ayrıtları 3'er nanometre olan bir küpün içine ne sığabilirdi?

Bir genin büyüklüğü hakkındaki kendi kestirimini kullanan Schrödinger, böyle bir atomlar topluluğunun nasıl kararlı olabileceğini merak etti. Bir bedendeki moleküller şiddetli ısıl harekete maruzdurlar; canlı bir bedenin yüksek sıcaklı-

ğında atomlar titreşir, çalkalanır ve yüksek hızlarda birbirleri ile çarpışırlar. Bu çeşit bir kötü kullanıma ancak çok kararlı bir kimyasal bağ dayanabilirdi. Schrödinger, genlerin molekül olmaları gerektiğine ikna olmuştu. Kalıtsal malzemeyi bir kristal gibi düşündü; ama beklenmedik bir koşulla: Bir hücreyi işletmek için gerekli karmaşık bilgiyi içerecek kristal *salınımsız* yani tekrarsız olmalıydı. Gerçek kristaller atomik ölçekte epey sıkıcıdır; aynı atomik düzenlemenin tekrar tekrar yinelenmesinden oluşurlar. Bu çeşit tekrarlı bir düzenleme çok fazla bilgi taşıyamaz. Bu tıpkı tek bir harf kullanılarak yazılmış bir kitaba benzer: *eeeeeeeeeeeee*. Bilgi aktarmak için "İnek Ay'ın üstünden atladı" gibi cümleler oluşturmak üzere düzenlenecek değişik harflere gereksinim duyarsınız. Salınımsız bir dizi harfe gereksinim duyarsınız. Schrödinger, genlerin harflerinin atomların ve moleküllerin diliyle yazıldığına inanıyordu. Burada Schrödinger, harflerin büyüklüğüne dair kestirimine kıyasla doğruya daha yakındı, gerçi bu düşünce ona özgü değildi. Şimdi biliyoruz ki genetik malzeme salınımsız bir kristal değil de salınımsız bir polimerdir: DNA denen esnek, uzun, doğrusal bir molekül.

Schrödinger'in hücrelerimizdeki moleküllerin ısıl hareketten nasıl kaçtığı hakkındaki kafa karışıklığı onu hücrelerimizdeki her şeyin güçlü kimyasal bağlarla kararlı hale getirildiği sonucuna vardırmıştı. Ona göre ısıl hareket, mikroskobik doğamızın bağlarını sağlamlaştırarak üstesinden gelinecek bir düşmandı. Bu kitapta göreceğimiz üzere Schrödinger bu noktada temelden hatalıydı. Hücrelerimizde hiç katı öğe yoktur. Her şey süngersi ve hareket halindedir. Düşman olmak bir yana, ısıl hareket hücrelerimizdeki etkinliğin anahtarıdır.

Schrödinger hassas büyük ölçekli yasalara ulaşmak için çok sayıda gelişigüzel hareket eden molekülün ortalamasını alma bilimi olan istatistiki mekaniğin değeri hakkında da yo-

rumda bulunmuştu. Buna bir örnek ideal gaz yasasıdır; bir gazın yoğunluğu, basıncı ve sıcaklığını ilişkilendiren bir yasa. Bu yasa, çok sayıda gaz molekülünün ortalamasını almaktan doğar. Schrödinger bu sürece "düzensizlikten doğan düzen" demişti. Buna karşın, Schrödinger biyolojide değişik bir kısım yasayı iş başında görüyordu; bunlar "düzenden düzen yapan" yasalardı. Kuşkusuz, canlıların yaptığı budur ama derinlerde hâlâ düzensizlikle çarpışmalı ve ilk önce bu altta yatan karmaşadan düzen oluşturmalıdırlar. Schrödinger bunun nasıl mümkün olduğunu göremedi. Yaşamın moleküllerindeki atomların sayısı çok az ve beklenen gelişigüzel değişimler (ya da "dalgalanmalar") çok fazla görünüyordu. Schrödinger, Helmholtz'ün kavrayışını baş döndürücü bir şekilde tersine çevirerek biyolojinin cansız maddede görülmeyen yeni fizik yasaları içermesi gerektiğini iddia ediyordu. Ona göre canlı maddeyi istatistiki mekanik kendi başına açıklayamazdı. Bunun yerine yaşamın "en çarpıcı özelliği" istatistiki mekanikteki gibi bir düzensizlikten düzen ilkesi yerine bir "düzenden düzen ilkesi"ne dayanıyor gibi görünmesiydi. Schrödinger'in çözümü yaşamı zemberekli saat gibi kurgulamaktı; iki yüzyıl önceki La Mettrie'ye geri dönüş. Ne var ki, zemberekli saat gibi bir canlılık düşüncesine "epey temkinli yaklaşmak" gerektiğini kabul ediyordu. Gerçekten de, çok temkinli olmak lazımdı.

Şimdi Schrödinger'in açmazını çözmeye yakınız. Bir canlı, katıya dayanmaz. Zemberekli saat gibi değildir. Ve istatistiki mekanik bize onun nasıl çalıştığıyla ilgili çok şey öğretebilir.

Oyunun Kuralları

Bu kısımda görmüş olduğumuz üzere gelişigüzellik burada kalıcıdır. Binlerce yıldır gösterilmeye çalışıldığı gibi yıkıcı bir

kuvvet olmak bir yana, bizim yararımızadır ya da en azından bütün olarak yaşamın yararınadır. Gelecek kısımlarda gelişigüzelliğin yaşamın her yönünde (bir kolu kaldırmak gibi basit bir harekette ya da besini harekete çevirmekte) nasıl rol oynadığını öğreneceğiz.

Gereklilik, doğa yasaları ve gelişigüzellik arasındaki ilişkiyi nasıl gözümüzün önüne getirebiliriz? Bunun bir yolu biyokimyacı Manfred Eigen'in 1975 basımı *Oyun: Doğa Yasaları Rastlantıyı Yönetir* (*Das Spiel: Naturgesetze steuern den Zufall*) adlı kitabında ortaya atılmıştır. Eigen, yüksek hızlı kimyasal tepkimeler ile ilgili çalışmaları için Nobel Ödülü kazanmıştı ve gereklilik ile şansın etkileşiminin oyunları andırdığını anlamıştı. Değişik oyunlar, yaşama hükmeden ilkeler içinde karşılaşabileceğimiz değişik olayları temsil edebilir: kimyasal tepkimeler, toplumun büyümesi, enzimlerin hücreler içinde düzenlenmesi ya da evrim. İyi bir oyun gerekliliğin unsurlarını (kuralları olmalıdır), şansı (şaşırtma olmalıdır) ve yeterli karmaşıklığı birleştirir. Satrancın basit kuralları vardır ama şimdiye kadar oynanmış bütün satranç oyunlarının toplamı ve kullanılan satranç taktiklerinin çeşitliliği, satrancın hemen göze çarpmayan karmaşıklıklarla dolu bir oyun olduğunu gösterir. Oyunlar belirme modelleridir; oyunun kuralları, şans ve uzay ile zaman gibi çok sayıda değişik parçanın etkileşiminden doğan beklenmedik olguların belirmesidir. Yaşam en iyi biçimde bir şans oyunu olarak anlaşılabilir; uzay ve zamanın satranç tahtasında fizik ve matematiğin kurallarıyla oynanan bir oyun. Bir fizikçinin yaşamı anlayışına erişmek için işe yaşam oyununun uyduğu kurallardan başlamamız gerekir. Başlamak için, gelin atomların oynadığı oyunların çeşitlerini öğrenelim.

3

Gece Yarısı Entropi

Duyuları ... harici araçlarla güçlendirmek temel uğraş[ımız] olmuştur. ... Bu sayede cisimlerin çoğunlukla niteliklere atfedilegelmiş ve esrarengiz olduğu açık bu etkilerinin doğanın bu destekler olmadan sezilemeyen küçük makineleri tarafından gerçekleştirildiğini buluruz.

— ROBERT HOOKE, *MICROGRAPHIA*

İşte doğabilimciler bir pire gözlemler
Üzerinde avlanan daha küçük pireler vardır
Ve bunları da ısıran daha küçük pireler
Ve bu böyle devam edip gider.

— JONATHAN SWIFT

Robert Hooke ilkel mikroskobundan baktığında, haşhaş tohumlarından arı iğnesine dek her şeyde minik "Doğa Makineleri"nden oluşan yeni bir dünya buldu. 1600'lerin sonunda mikroskobundan gördüğü "makineler" yalnızca başlangıçtı: Mikroskop geliştikçe Hooke'un makinelerinin tamamının, kendileri de başlı başına fabrikalar ya da daha da küçük makineler olan hücrelerden oluştuğu bulundu; ki bunların da her biri daha da küçük parçalardan oluşuyordu ve ta atomlara ve moleküllere kadar bu böyle devam ediyordu.

Son derece karmaşık olsalar da canlıların, doğanın geri kalanı ile aynı şeylerden oluştuğu açık hale gelmişti.

Atomlar ve moleküller bir araya gelerek bir çiçeği ya da insanı nasıl oluştururlar? Cansız atom ya da moleküllerden yaşayan düzenekleri ayıran çizgiyi nerede geçeriz? Bir nesneyi canlı kılan nedir? Bu zor sorular binlerce yıldır bilim insanlarının ve filozofların kafasını kurcalamıştır. Fakat bu soruların yanıtlarına göz atabilecek ilk nesil biz olabiliriz. Bu yanıtları anlamak için doğanın temel yapıtaşlarından başlamamız gerekir: atomlar ve moleküller. Atomlar ufacık madde parçalarıdır, o kadar ufaktırlar ki insanın bir saç telinin eni 300.000 karbon atomu kalınlığındadır. Basit bir *E. coli* bakterisi, bir insanın kütlesinin yalnızca katrilyonda biri (10^{-15}) kadardır ve 100.000 milyar atom içerir. Moleküller güçlü elektriksel bağlar ile birbirine tutturulmuş atomlardan oluşan öbeklerdir. Moleküller iki ila on binler arasında değişen sayıda atomdan oluşabilirler.

Atomlar ve moleküller kıpır kıpırdır. Demokritos, Epikuros ve atomcu yoldaşları bu önemli noktayı zaten anlamışlardı. Havada azot, oksijen, karbondioksit ve su buharı molekülleri yüksek hızlarda çarpışarak girdaplar halinde dönmektedir. Haberimiz olmaksızın, çevremizdeki sesten hızlı gaz molekülleri tarafından sürekli topa tutulmaktayız. Etrafımızda gördüğümüz sakinlik bir yanılsamadır. Karmaşa ile sarılmış, hayır karmaşaya batmış haldeyiz. Fakat böyle bir karmaşadan düzen doğabilir: Soğuk kış günlerinde, yükseklerdeki bulutlarda gelişigüzel dolanan su molekülleri birbirlerini bulup güzel, simetrik kar taneleri oluştururlar. Çevremizde gördüğümüz dünya (*büyük ölçekli, makroskopik* dünya) düzen ve intizam içerir. Bir masanın üstündeki kitap aniden zıplamaz ya da kendiliğinden alev almaz. Fakat, çok küçük ölçekte bakıldığında, kitap titreşen ve çalkalanan, çarpışan ve

birbirlerini boşluğa fırlatıp atan atomlardan oluşan bir yığındır. Görünen düzen ve yaşamın karmaşıklığı böyle bir karmaşadan nasıl doğabilir?

1800'lerin sonlarında bu soru, Avusturya'da Ludwig Boltzmann, İskoçya'da James Clerk Maxwell ve Amerika Birleşik Devletleri'nde Josiah Willard Gibbs gibi fizikçilerin aklını meşgul ediyordu. Görece basit bir örnek olan gaz, onlara göre mükemmel bir başlangıç noktası sağlıyordu. Makroskopik hacme sahip bir gaz, basınç, hacim ve sıcaklık gibi basit yasalara tabiydi; ama bu yasalar nasıl ortaya çıkmıştı? Yanıtları bulmak için bu bilim insanları yeni istatistik bilimine başvurdular ve *istatistiki mekanik*'i icat ettiler. Bu bilim dalı, atom ve moleküllerin hareketlerine istatistik uygular. Onların düşüncesinde, eğer istatistik bin adamın boy uzunluklarını ya da bin kadının evlenme yaşını tanımlayabiliyorsa, elbette milyar kere milyar atomun davranışını da tanımlayabilmelidir. Günlük yaşamda istatistiği ortalama gelir, IQ (ortalama zekâdan bir standart sapma olarak tanımlanmıştır) ve gelir dağılımları gibi sayıları hesaplamakta kullanıyoruz. Benzer biçimde, fizikçiler atomların hızları ve enerjilerinin ortalama, sapma ve dağılımının nasıl hesaplanacağını keşfettiler. Her ne kadar atomlar gelişigüzel hareket etse de çarpışmaları fizik yasalarına uyar. Maxwell ve Boltzmann bir gazın içindeki hızların dağılımının basit bir (aslen Pascal'ın bahis denklemini genellemek için türetilmiş) düzgün dağılım olduğunu gösterdiler. İstatistiği atomlar ve moleküller karmaşasına uygulayarak, atomların hareketlerinin zaman ve uzayda ortalaması alınmış gelişigüzelliğinin düzen ve intizamın yolunu açtığını buldular.

Yaşam moleküllere dayanır. Bu moleküller (ilk bakışta yıkıcı bir kuvvet gibi görünen) altta yatan moleküler fırtınanın yarattığı karmaşaya maruz kalır. Yaşam bu karmaşayı nasıl

olup da sağ atlatabilir; hatta ondan yararlanabilir? Bu, Schrödinger'in ünlü sorusuydu. Schrödinger atomların karmaşası ile yaşamın yapısı arasında bir çelişki gördü. Ama bugün biliyoruz ki atomların ve moleküllerin düzensiz hareketleri (yaşamın karmaşık yapılarının denetiminde) yaşamın etkinliğine ön ayak olur. Ortada bir çelişki yoktur. Yaşam, atomların gelişigüzel hareketlerinden doğar; istatistiki mekanik bu doğuşun özünü yakalayabilir.

Kayalardaki Para

1990'ların başlarında Baltimore'da yükseköğrenimimi sürdürürken silahlı bir kişi tarafından soyulmuştum. Üstümde sadece on dolar vardı; yani büyük bir kayıp değildi. Ama yine de üzücü ve tatsız bir deneyimdi. Para dünyayı döndürüyor, ama aynı zamanda insanlara hoş olmayan şeyler de yaptırıyor. Fizik ve biyolojide bir şeylerin gerçekleşmesini sağlayan değişik bir para birimimiz vardır; ona enerji diyoruz. Para ve enerjinin pek çok ortak yönü vardır. Bir tarafın diğerine para verdiği bir alışverişte toplam para miktarı korunur: Soyguncu on dolar kazandı ve ben on dolar kaybettim. Aynı işlemde, benim sekiz dolar kaybedip soyguncunun on dolar kazanması olası mıdır? Hayır. Para bir anda hiç yoktan ortaya çıkmaz.

Aynısı enerji için de geçerlidir. Helmholtz'ün göstermiş olduğu gibi enerjinin korunumu, doğanın en katı yasasıdır. "Enerji alışverişleri"nde işlemden önceki enerji, *sonraki* enerjiye eşittir. Enerji bir nesneden diğerine aktarılabilir ya da değişik bir biçime dönüşebilir ama asla kazanılıp kaybedilmez. Hava sürtünmesinin yokluğunda Ay'da durduğunuzu hayal edin ve elinize bir taş alın. Uzattığınız elinizde duran taşın (taş ile Ay arasındaki çekimde depolanmış) *kütleçekimsel enerjisi* vardır. Taşı bıraktığınızda, düşüşü boyunca hızla-

nır. Hareket *kinetik enerji* denen bir enerji biçimi ile ilgilidir. Taşın hareketi için gereken enerji nereden gelir? Taşı yerden kaldırdığınız zaman taş ile Ay arasındaki çekimde depolanmış yerçekimsel potansiyel enerjiden gelir. Düşen taş, kinetik enerjinin (hareketin) bedelini kütleçekimsel enerji ile "öder". Düşüşü boyunca taşın *toplam* enerjisi (kütleçekimsel *artı* kinetik) daima sabittir. Enerji korunur.

Taşınız birden bir ay tozu bulutu içinde yere çarpar ve durur. Düşüş boyunca kütleçekimsel enerjisini kaybettiği gibi kinetik enerjisini de yitirir. Eğer enerjinin korunumu doğruysa, çarpma anında kinetik enerji nereye gider?

On sekizinci ve on dokuzuncu yüzyıllar boyunca fizikçiler, hareket eden nesneler bir çarpışma ya da sürtünme ile yavaşlatıldığında ne olduğunu incelediler. Enerjinin korunumu yasası yeniydi ve bizim düşen taşımız gibi durumlar açmaz oluşturuyordu. Sir Benjamin Thompson, Kont Rumford'un metal bir silindirden namlu yaparken üretilen ısıyı incelemesi ile bu değişti. Hareketin (kinetik enerjinin) sürekli olarak ısıya dönüştürülebildiğini bulunca ısının bir enerji biçimi olduğu sonucuna vardı. Bu kavrayıştan önce ısının, sıcak nesnelerden soğuk nesnelere akan (ısıl denen) bir sıvı olduğu düşünülüyordu; sonunda tükenen bir sıvı. Ama Rumford bu düşünceyi çürüttü: "Herhangi bir yalıtılmış cismin sınırsızca sağlamayı sürdürebileceği hiçbir şeyin maddesel bir cisim olmayacağını eklemeye değmez ve bu deneylerde ısının ortaya çıkarılıp iletildiği gibi ortaya çıkarılıp iletilebilen herhangi bir şeye dair onun hareket olması dışında bir düşünce oluşturmak ... bana son derece zor görünüyor." Isının hareket ya da kinetik enerjiden üretilebileceği bilgisine ulaşan bilim insanları şu soruyu sordu: "Isı ne çeşit bir enerjidir?"

Madde, ebedi hareket halinde olan atomlardan oluşur. Bunu nasıl biliyoruz? Kapalı bir kaptaki gaz için sıcaklıktaki bir artış

her zaman basınçtaki artış ile ilişkilidir. Maxwell, Boltzmann ve başkaları kinetik gaz kuramı üzerine yaptıkları ilk çalışmalarında bu basınç artışını, hem sıcaklığı hem de basıncı atomların hareketine bağlayarak açıkladılar. Bu görüşe göre basınç, atomların kap duvarları ile sayısız çarpışmalarının sonucuydu. Atomlar hızlandıkça duvarlara daha sert çarpıyorlardı ve bu nedenle basınç daha büyük oluyordu. Isı eklenip sıcaklık artırılarak atomlar daha hızlı hareket ettirilebilirdi. Sıcaklık, gazın içindeki atomların kinetik enerjisi ile ilişkili gibi görünüyordu. Kinetik kuram, gazlara hükmeden büyük ölçekli yasaları incelikle açıklıyordu; ama sürekli hareket halinde olan kuramsal atomların, kimsenin asla gözlemlemediği ufacık nesneler olduğunu varsayıyordu. İstatistiki mekaniğin Avusturyalı babası Boltzmann, atomların varlığını öne sürdüğü için büyük alay konusu oldu. Zaten derin bir bunalımda olan Boltzmann bu muameleyi kaldıramayıp 1906'da intihar etti.

Fakat hava gibi gazların kıpır kıpır atomlardan oluştuğu düşüncesi yeni değildi. Atomik hareket bitkibilimci Robert Brown tarafından 1827'de dolaylı olarak keşfedilmişti. Brown, ardılı Charles Darwin gibi, bir İngiliz araştırma seferinde doğabilimci olarak hizmet ederken adından söz ettirmişti. Brown, yolculuğu sırasında (büyük kısmını bir gemi kazasında kaybetmek üzere) çoğu önceden bilinmeyen türler olan binlerce Avustralyalı bitki örneği toplamıştı. Hücrenin bir "çekirdeği" olduğu tanımını yapmasıyla anılan saygın bir doğabilimci olmuştur. Gözü pek yolculuklarına rağmen, fizikçiler Brown'u en çok kendi evinin güvenliği içinde yaptığı bir buluşla hatırlarlar. Brown, havada ya da sıvı içerisinde asılı kalan çiçek tozlarının görünmez gelişigüzel bir kuvvet tarafından itiliyormuşçasına gergin bir dans icra ettiklerini gözlemledi. Bugün bu dansa *Brown Hareketi* diyoruz. Bir bakıma Brown yalnızca Demokritos'un iki bin yıl önce gözlemle-

diği şeyi yeniden keşfetmişti: "her zaman, mutlak dinginlikte bile hareket halinde" olan "havadaki zerrecikler."

Brown, çiçek tozu tanelerinin gelişigüzel hareketlerini keşfettiğinde hareketlerinin çiçek tozlarının canlı olmasıyla bir ilgisi olup olmadığını merak etti. Benzer büyüklükteki toz taneciklerini incelemeye karar verdi. Onlar da aynı tuhaf dansı icra ediyorlardı. Brown, gelişigüzel hareketin çiçek tozlarının canlı olmasından değil maddenin özünden gelen bir hareketten kaynaklandığı sonucuna vardı. Gizemin çözümü neredeyse yüz yıl sonra Albert Einstein'ın çok daha küçük parçacıkların gelişigüzel hareketlerinin çiçek tozu ya da toz taneciklerinin gergin dansına neden olduğunu kanıtlamasıyla geldi. Toz ve çiçek tozu tanecikleri sayısız atomla gelişigüzel çarpışıyor ve itilip kakılıyordu. Bir çiçek tozu taneciği, bir taraftan çarpan atomların sayısı ile diğer taraftan çarpanların sayısı arasında küçük, geçici bir fark olması nedeniyle kıpırdıyordu. Einstein, Brown Hareketi'ne ilişkin kuramının kanıtlanması için deneyler öne sürdü. 1900'lerin başlarındaki en gelişmiş mikroskopları kullanan Fransız fizikçi ve Nobel Ödülü sahibi Jean Perrin (1870-1942) atomların varlıklarını ve her daim hareket halinde olduklarını temelli kanıtlamak için Einstein'ın kuramını kullandı. Boltzmann, trajik şekilde ölümünden yalnızca iki yıl sonra haklı çıkmıştı.

Atomların ve moleküllerin ufacık ölçeği süreğen hareketin boyunduruğu altındadır. Bilim insanları atomların ve moleküllerin bu süreğen hareketine ısıl hareket diyorlar. Isıl hareket, usulca süzülen atomlar demek değildir: Oda sıcaklığında, atomlar en hızlı tepkili uçağınkini aşan hızlara erişirler! Eğer bir molekül büyüklüğüne indirgenseydik, bir *moleküler fırtına* tarafından topa tutulurduk; o kadar şiddetli bir fırtına ki bir kasırga onun yanında esinti gibi kalırdı. Fakat havadaki moleküller korkunç hızlarına rağmen çok uzaklaşamazlar;

çünkü sıklıkla birbirleriyle çarpışırlar. Bu gerçekleştiğinde çarpışan moleküller bilardo topları gibi sekerler. Brown'ın gözlemlediği ve Einstein'ın açıkladığı gergin dans, çarpışan atomların estirdiği fırtınanın sonucudur.

Kayıp Enerjinin Gizemi

Şimdi düşen Ay taşına dönebiliriz. Eğer enerji korunmalıysa, çarpışma anında taşın enerjisine ne oldu? Taşın kinetik enerjisi nereye kayboldu?

Atomlar, bir katının içinde gaz ya da sıvıda olduğu kadar serbestçe hareket edemezler. Ama katıdaki atomlar yine de hareket halindedir; merkezi bir konum etrafında yüksek sıklıklarda, kocakafa oyuncaklarının başları gibi titreşirler. Fizikçiler sıklıkla katıları yaylarla birbirlerine bağlanmış, ortalama olarak belli konumlarda dururken tamamı sallanıp duran atom toplulukları olarak düşünürler. Taş yere çarptığında, taşın kinetik enerjisi yok olmadı. Bunun yerine, taşın kinetik enerjisi taştaki ve yerdeki atomlara aktarılarak onların daha şiddetli titremelerine neden oldu. Sonuç olarak taş ve yer ısındı. Taşın kinetik enerjisi ısı enerjisine ya da ısıya dönüştü. Enerji korunmuş oldu.

Enerjinin korunumuna, ısının bir enerji çeşidi olduğu gerçeği ile birlikte, *termodinamiğin birinci yasası* denir (ikinci yasa ile çok yakında karşılaşacağız). Termodinamik, ısı enerjisi ile ilgilenen bilimdir (Yunanca "ısı" anlamına gelen *therme* ve "güç" anlamına gelen *dynamis* sözcüklerinden gelir) ve istatistiki mekaniğin büyük ölçekli "kardeş bilimi"dir. İstatistiki mekaniğin araçlarıyla atomların gelişigüzel hareketlerinin ortalamasını aldığımızda ortaya termodinamik çıkar.

Düşen taşın enerjisinin çarpma anında nereye gittiği gizemini çözmüş olduğumuza göre aptalca bir soru sormama

izin verin (bilim, bunun gibi bir sürü soru sorarak ilerleyegelmiştir): Neden taşlar yerden ısı çekip kendiliğinden sıçramıyorlar? Bu, enerjinin korunumuna aykırı değil. Taş, yeri soğutarak yerden ısı çekebilir ve aldığı ısıyı kinetik enerjiye çevirebilirdi. Fakat bunun gerçekleştiğini hiç görmüyoruz. Taşlar kendiliğinden yerden sıçramazlar. Neden?

Taşımız yere çarptıktan sonra taşın ve yerin içindeki atomlar daha şiddetli sarsılmaya başladı. Hem taş hem de yer ısındı. Katılarda atomlar diğer atomlara bağlıdır; bu yüzden bir atom sarsılırsa komşu atomlar da yakında sarsılacak demektir. Bir atom komşularını harekete geçirdiğinde kendisi, komşuları tarafından kazanılan, bir miktar enerji kaybeder. Atomun komşuları da *kendi* komşularını harekete geçirirler ve taşın çarpmasından kaynaklanan fazladan enerji kısa sürede taştaki ve yerdeki çok büyük sayıdaki atomlar arasında dağıtılmış olur.

Gece yarısı soyguncusunun öyküsünde soyguncu benim paramı çaldı, birazını harcadı ve ondan para alan insanlar da paralarını harcadılar. Soyguncunun on dolarlık bir banknot yerine bin sent çaldığını düşünün. Bir süre sonra bin kişinin her biri benim paramın bir sentine sahip olabilirdi. Benim sentlerimin kendiliğinden bir araya gelmesi oldukça olasılık dışı olurdu; zira bu, (büyük olasılıkla birbirini tanımayan) bin kişinin paralarını harcamak için aynı anda aynı dükkâna gitmesini gerektirirdi. Benzer biçimde, taşımızın içindeki bütün atomların enerjilerini taşı sıçratmaya odaklaması da imkânsız olurdu. Eğer bin sentin kendiliğinden bir araya gelmesinin imkânsıza yakın olduğuna inanabiliyorsak, taşın içindeki atomların engin sayısını düşünün (trilyon kere trilyon atom gibi bir şey!). Taşın yerden sıçraması için bu dev sayıdaki atomların aynı anda aynı yönde itmesi gerekirdi. Fakat atomlara hangi yönde sıçrayacaklarını söyleyen usta bir dans düzenleyicisi yoktur. Hepsi gelişigüzel salınırlar.

Az önce ortaya koyduğum savı bir düşünün. Bir taşın yerden ısı çekip kendiliğinden sıçramasının *imkânsız* olduğunu söylemedim. İmkânsız sözcüğünün bilimde yeri yoktur. Bunun yerine, olasılıksal bir sav oluşturdum: Taşın kendiliğinden sıçraması imkânsız değildir, ama son derece düşük bir olasılıktır. Unutmayın, istatistiki mekanik ile uğraşıyoruz, o yüzden her ifade doğası itibariyle olasılıksaldır. Bu, okulda öğrendiğimiz fizikten epey farklı: Bir doğru yanıt olması gerekir ve diğer bütün yanıtlar yanlıştır. Bir taşı bıraktığımda düşeceğini ama yükselmeyeceğini biliyorum. Ama gerçekte *yükselebilir*; sadece epey olasılık dışıdır. Şimdiye kadar kimse böyle bir şeyin gerçekleştiğini görmemiştir ve büyük olasılıkla da görmeyecektir.

Bütün Enerjiler Eşit Yaratılmamıştır

Çarpışma ve sürtünme kinetik enerjiyi kolaylıkla ısıya çevirir, ama ısı kinetik enerjiye kolayca geri dönüşmez. Değişik enerji çeşitleri her zaman başka enerjilere dönüştürülemez. Enerjinin korunumu yasası bize enerji yaratıp yok edemeyeceğimizi söyler ama belli bir enerji çeşidinin bir başkasına dönüştürülüp dönüştürülemeyeceğini söylemez. Bazı enerji türlerini diğerlerinden daha dönüştürülebilir yapan nedir?

Şimdiye kadar üç çeşit enerji ile karşılaştık: kütleçekimsel enerji, kinetik enerji ve ısı enerjisi (ya da ısıl enerji). Her bir enerji çeşidi, bir istemin belirli özellikleri ile ilgilidir (nesneler, enerjiler ve kuvvetler içeren bir duruma fizikçi ağzıyla *sistem* deniyor). Kütleçekimsel enerji tamamen nesnenin yerden yüksekliği ile belirlenir. Benzer şekilde, kinetik enerji için gereken tek değişken nesnenin hızıdır. Ne var ki, ısıl enerji ile ilişkili durumu tamamen tanımlamak için sistemimizdeki bütün atomların hızlarını ve yerlerini bilmemiz gerekir; yani,

ısıl enerji barındıran bir sistemin durumunu tamamen tanımlamak için çok büyük miktarda bilgi gerekir. Bu, gerçekçi bir önerme olmadığından fizikçiler bunun yerine ortalamaları kullanırlar. Örneğin, bir gazın sıcaklığı atomların ortalama kinetik enerjisinin bir sabitle çarpılmasıyla elde edilir. Gazın içindeki atomlar tek başlarına değişik kinetik enerjilere sahip olabilirler. Sıcaklık bir ortalama olduğundan, bize kinetik enerjinin gazın bütün atomları arasında nasıl bölüşüldüğüne dair çok az bilgi verir.

Yalnızca beş atomdan oluşan bir gaz düşünün. Beş atomun her biri eşit, 40 meV kinetik enerjiye sahip olsun (meV, mili-elektron voltun kısaltmasıdır; fizikçiler tarafından kullanılan çok küçük bir enerji birimi). O zaman atomların *ortalama* enerjisi de 40 meV olur. Şimdi değişik bir durum düşünün. Başka bir gaz da beş atom içerir ama ikisinin 5'er meV, birinin 10 meV, bir diğerinin 50 meV ve son atomun 130 meV kinetik enerjisi olsun. Şimdi, ortalama kinetik enerji (5 + 5 + 10 + 50 + 130) / 5 = 200 / 5 = 40 meV ya da ilk örneğimizdekiyle aynı kinetik enerjidir. Ama durum kuşkusuz aynı değildir. Bir olayda bütün atomlar aynı enerjiye sahipken diğer olayda atomlar çok farklı enerjilere sahiptir. Fark, enerjinin atomlar arasında nasıl bölüşüldüğündedir. Öğelerin ortalaması ile dağılımı arasındaki farka gündelik bir örnek, hane geliridir. 2007'de Amerika Birleşik Devletleri'nde ortalama gelir 50.233$ idi. Ama bazı aileler bundan çok daha azı ile geçinmek zorundayken diğerleri için 50.000$ cep harçlığından ibarettir. İlginç olan öykü ortalamada değil dağılımda saklıdır.

Şimdi enerjinin ne derece dönüştürülebilir olduğunu ölçmeye hazırız. Dönüştürülebilirlik için önemli bir özellik enerjinin bir sistemdeki bütün atomlar arasında dağılımıdır. Bir taştaki bütün atomlar yerden yaklaşık olarak aynı yüksekliğe ve böylece aynı kütleçekimsel enerjiye sahiptir. Bu durum-

da kütleçekimsel enerjinin dağılımı oldukça basittir ve taşın yerden yüksekliği aracılığıyla doğru bir biçimde hesaplanabilir. Ama ısıl enerjinin bütün atomlar arasındaki dağılımını hesaplamak çok daha zordur. Her atomun değişik bir enerjisi vardır ve kendi hızında gelişigüzel titreşir. Taşın ısıl enerjisi ile ilgili tüm bildiğimiz, sıcaklık olarak elde edilen, ortalamasıdır; ama her bir atomun enerjisi hakkında çok az şey biliriz.

Tuhaf Kayıp Bilgi Vakası

Fizikçiler bir sistemin durumundan söz ettiklerinde büyük ve küçük ölçekli durumları birbirlerinden ayırırlar. Bir taşın büyük ölçekli durumu, o taş ile ilgili bildiklerimizin tamamı ile tanımlanabilir: yerden yüksekliği, hızı, sıcaklığı ve benzerleri. Küçük ölçekli durum, taşın parçalarının tümünün kesin durumudur; yani atomların tümünün hızlarının ve konumlarının dağılımıdır; bu, *bilmediğimiz* bir bilgidir. Düşleyebileceğiniz gibi, gözlenen her bir büyük ölçekli duruma uygun çok sayıda küçük ölçekli durum vardır. Bir taşın içindeki atomlar çok sayıda değişik biçimde kıpırdayabilirler; ama taşın sıcaklığı, yukarıda beş atomla olan örneğimizdeki gibi, ortalamada aynı kalır. Sıcaklık gibi büyük ölçekli değişkenleri bilmek bize sistemin o anki küçük ölçekli durumu hakkında çok az şey söyler.

Küçük ölçekli durumlar hakkındaki tüm bu konuşmalar, gizemli fakat güçlü bir niteliğe yönelmemize ön ayak olur: entropi. Bir tanıma göre entropi, bir sistem ile ilgili bilinmeyen bilgi miktarıdır; diğer bir deyişle, küçük ölçekli durumu tamamen açıklamak için gereksinim duyacağımız bilgi miktarıdır. Soyguncuyu hatırlayın. On dolarım hâlâ bendeyken küçük ölçekli sistemi açıklamak çok kolaydı: On dolar cebimdeydi. Hırsız paramı çalıp harcadıktan sonra para pek çok

ele dağıldı. Büyük ölçekli durum değişmedi (paranın miktarı hâlâ on dolar), ama küçük ölçekli durum gitgide daha bilinmez hale geldi (soyguncu için bile). Soyguncu paranın bir kısmını başkalarına verdiğinde onlar da kendilerindeki parayı harcadılar (ve bu böyle sürdü). Deyim yerindeyse, paranın entropisi yükseldi.

İşte başka bir örnek: Bir ergenin odasını düşünün. Odasının büyük ölçekli durumu şöyle belirtilebilir: Altmış yedi parça giysi, yirmi üç kitap, bir masa, bir sandalye, bir ışık, bir dizüstü bilgisayar ve çeşitli ıvır zıvır içerir. Küçük ölçekli durumu açıklamak için bütün bu eşyaların nerede bulunduklarını bilmemiz gerekir. Toplu bir oda ile uyumlu yalnızca birkaç düzenleme (küçük ölçekli durum) bulunur: giysiler dolaba yerleştirilmiş ve uzun kollu gömlekler, kısa kollu gömlekler, kumaş pantolonlar, kot pantolonlar gruplara ayrılmış; kitaplar raflarda yazarına göre ad sırasına konmuş vs. Ne var ki, odanın dağınık olmasının neredeyse sınırsız sayıda yolu var: kot pantolonlar bilgisayarın üstünde, istatistiki mekanik kitapları yerde, gömlekler yatağın üstüne saçılmış. Toplu bir odanın entropisi, dağınık bir odanınkinden çok daha düşüktür (daha az sayıda olası toplu oda vardır). Şimdi kendinize, benim kendime her gün sorduğum soruyu sorabilirsiniz: Benim odam neden her zaman darmadağınık?

Bu soru (tam olarak bu biçimde değilse de) 1800'lerde fizikçileri meşgul etti ve yanıtları termodinamiğin ikinci yasasını oluşturdu. İrdeledikleri asıl soru bizim de yanıtlamaya çalıştığımız soruydu: Neden bazı enerji çeşitleri diğerlerinden daha kullanışlı; özellikle, neden bazı enerji çeşitleri dönüştürülebilirken diğerlerinin dönüşmesi güç görünüyor ve dolayısıyla kullanışsız kalıyorlar? Dahası, kullanışlı enerji sonunda kullanışsıza dönüşüyor. Bu acı gerçekler bizim toplu-dağınık oda örneğimiz üzerinden anlaşılabilir. Çoğumuz

eşyaları gelişigüzel bir yerlere bırakırız, ait oldukları yerlere koymayız. Bir odayı toplu tutmak çok fazla çalışma gerektirir ama oda, bu çalışma olmaksızın önlenemez bir biçimde dağılır. Merak edebilirsiniz: Eşyaların odaya gelişigüzel yerleştirilmesi, neden toplu bir oda oluşması sonucunu doğurmaz? Sonunda oda neden hep dağınık olur? Neden kitaplarınızı kitaplığa gelişigüzel, ad sırasıyla geri koyamazsınız? Küçük ölçekli durumlarımız burada devreye girer: Eğer eşyaları gelişigüzel yerlere bırakırsanız toplu bir odadansa dağınık bir oda ile karşılaşma olasılığınız daha fazla olur çünkü odayı dağıtmanın çok fazla yolu (küçük ölçekli durumlar) varken, odayı toplu hale getirmenin sadece birkaç yolu mevcuttur. Bir bakıma, eşyaları gelişigüzel yerlerde bırakarak bütün olası küçük ölçekli durumlar içinden bir tanesini seçmiş olursunuz ve daha çok sayıda dağınık (ya da daha az sayıda düzenli) küçük ölçekli durum bulunduğundan dağınık durumlardan birini seçmiş olma olasılığınız yüksektir.

Enerjiye dönersek, belirli bir miktar kütleçekimsel enerjiye uyan çok az sayıda küçük ölçekli durum vardır. Bu açıktır; zira, ilgili tek değişken her bir atomun yerden yüksekliğidir. Yerçekimsel enerji, düşük entropili bir enerjidir; toplu bir odaya karşılık gelir. Isı için durum epey farklıdır. Isı, dağınık bir oda gibidir; belirli bir sıcaklıkta atomlar arasındaki enerji dağılımı için çok sayıda olasılık vardır. Isı, yüksek entropili bir enerjidir.

Enerji dönüşümü sırasında olaya karışan tüm atomlar arasındaki enerjiyi takip etmek zordur. Odanızın çeşitli noktalarına attığınız çoraplar gibi biraz şurada biraz burada bulunan enerji, gelişigüzel atomik hareketler halinde kalacaktır. Sürtünme ve çarpışma enerjinin büyük gelişigüzelleştiricileridir. Bir taş yere çarptığında enerji, atomların ısıl hareketine dönüşerek "kaybolur". Toplu bir durum dağınık-

laşır. Tamamen düzenlenmiş, yoğunlaştırılmış ve toplu bir enerji oldukça yapay, düşük olasılıklı bir durumdur. Eğer bir sistemin "istediğini" yapmasına izin verirsek, asi bir ergen gibi davranır. Enerji saçılmış, dağılmış ve dağınık ve kullanışsız bir hal alır.

Termodinamiğin ikinci yasası tamamen enerjinin gitgide daha dağınık ve bu nedenle de kullanışsız bir hal alma yönündeki bu eğilimi ile ilgilidir. İkinci yasa, kapalı bir sistemdeki her bir dönüşümde entropinin her zaman artacağını söyler. Oda daha dağınık hale gelir, enerji dağılır ve para parmaklarının arasından akıp gider.

İkinci Yasa

Termodinamiğin ikinci yasası en derin, en engin ve en yanlış anlaşılmış fizik yasalarındandır (çünkü insanlar ayrıntıları okumazlar!). İkinci yasayı yeniden özetlememe izin verin; ama daha açık bir biçimde: Hiçbir sürecin *tek* sonucu yüksek entropili (gelişigüzel dağılmış) enerjiyi, düşük entropili (basitçe dağılmış ya da yoğunlaşmış) enerjiye dönüştürmek olamaz. Dahası, bir enerji çeşidini başka birine her dönüştürüşümüzde toplamda her zaman daha yüksek entropili bir enerji elde ederiz. Enerji dönüşümlerinde *toplam* entropi her zaman yükselir.

İkinci yasaya dair bu ifadelerde belli sözcükleri eğik yazdım: *tek* ve *toplam*. Bu sözcükler her ne kadar masum görünseler de ikinci yasayı ve onun yaşamla ilişkisini anlamamızda büyük öneme sahiptirler. Bu sözcükleri görmezden gelen yaratılışçılar hep yaşam ve evrimin termodinamiğin ikinci yasasına uymadığını ileri sürdüler. Hiç de değil!

Hadi gelin, *tek* ile başlayarak bu sözcüklerin ne anlama geldiklerine bakalım. İkinci yasa yüksek entropili (dağılmış)

enerjiyi düşük entropili (yoğunlaşmış) enerjiye dönüştüren bir sürecin imkânsız olduğunu söylemez. Eğer öyle olsaydı akşamleyin dondurma yiyemezdiniz; çünkü buzdolabı, yerelde entropiyi düşüren (nesneleri soğutarak) bir makinedir. Ama dondurmanın sıcaklığını düşürmek soğutma işleminin *tek* sonucu değildir. Buzdolabınız aynı zamanda elektriği (düşük entropili bir enerji kaynağı) sömürür ve çoğunu ısıya dönüştürüp (yüksek entropili enerji) mutfağa salar. Buzdolabının kapağını açık bırakarak mutfağınızı soğutamamanız bundandır.

Buzdolabınız, her ne kadar yerelde entropiyi düşürse de *toplamda* büyük miktarda entropi artışına neden olur. Entropiyi yerel olarak azaltabilirsiniz; ama çok fazla iş yapmanız ve bu süreçte çok fazla düşük entropili enerji tüketmeniz gerekir (odanızı toplamayı düşünün; imkânsız değil, ama sonunda terler ve söversiniz ve düşük entropili besin enerjisini yakıp yüksek entropili ısı ve atığa dönüştürerek çevrenizin entropisini yükseltmiş olursunuz). Aynısı yaşamın işleyişi için de geçerlidir: Yaşam düşük entropili bir enerji çeşidini (besin ya da güneş ışığı) kullanır ve çok fazla yüksek entropili "atık enerji" (ısı ve kimyasal atık) yaratma pahasına entropiyi yerelde (gelişip düzenlilik yaratarak) azaltır. Yaratılışçıların, ikinci yasanın yaşam ya da evrime olanak tanımadığı savının elle tutulur yanı yoktur.

Entropi ve termodinamiğin ikinci yasası fiziğin en önemli ve en yanlış anlaşılmış kavramlarındandır. Sorunun bir kısmı entropinin pek çok tanımının olması ve hiçbirinin dolambaçsız olmamasıdır. Sıklıkla entropi, basitçe düzensizlik ile eş tutulur. Bu, düzensizlikle ne anlatılmak istendiğini açıkça anlamadığımız sürece iyi bir tanım değildir. Yine yaratılışçılar, entropideki artışın yaşam ile uyumsuz olduğunu iddia ederek bu kafa karışıklığını kötüye kullanmışlardır. Savları,

entropi düzensizlik ve yaşam da düzen olduğundan ikinci yasanın, yaşamın kendiliğinden ortaya çıkmış olamayacağını kanıtladığıdır.

Entropiyi düzensizlik ile eş tutmak rahatlıktır ama kesinlikle doğru bir tanım değildir. Bilim insanları, bu sorunla sık sık karşılaşırlar. Tanımları (çoğunlukla matematikseldir ve) gündelik dile dökerken ayrıntılar çeviride kaybolur. Entropi günlük yaşamda düşündüğümüz düzensizlik ile aynı şey değildir (toplu-dağınık oda örneğimiz yalnızca küçük ölçekli durumlar kavramını açıklamak için kullanılan bir benzetmeydi). Bunun yerine, entropi enerjinin ne derece yayılmış olduğunun ölçüsüdür. Bazen düzenli görünen bir sistemin enerjisi, "düzensiz" bir sisteminkinden daha çok saçılmış olabilir. Daha düzenli gibi görünse de böyle bir sistemin entropisi daha yüksek olurdu.

Entropi ile günlük yaşamdaki düzensizlik kavramı arasındaki farkı açıklayan şaşırtıcı derecede basit bir örnek sert kürelerden (bilyeleri düşünün) oluşan bir yığındır. Bir kabın içine gitgide daha çok bilye koydukça bilyeler en yüksek entropili (diğer bir deyişle bizim en düzensiz olmasını beklediğimiz) durumun bilyelerin düzenli bir desende kusursuz biçimde istiflendiği durum olduğu eşik bir yoğunluğa (hacim başına bilye sayısı) ulaşırlar. Bu nasıl olabilir? Bilyeler bir kaba birbirinden çok farklı iki yoldan doldurulabilirler: Onları bir kavanoza döküp nereye düşerlerse düşmelerine izin verebiliriz ya da onları düzenli bir dizilim içinde dikkatlice istifleyebiliriz. Onları yalnızca dökmek, bilyelerin birbirine dokunduğu ama diğer bakımlardan gelişigüzel konumlandığı bir duruma yol açar. Bu çeşit bir düzenlenmeye fizikçiler tarafından *gelişigüzel istiflenme* denir. Bilyeler gelişigüzel istiflendiklerinde bazı bilyeler tamamen sıkışıp kalacak ve hareket edemeyeceklerdir. Gelişigüzel istiflenme hareket özgürlüğü-

nü kısıtlayarak daha dar bir enerji dağılımına ve böylece daha düşük entropiye neden olur. Oysa güzelce istiflenmiş bilyeler ortalamada biraz daha fazla kıpırdanma alanına ve böylece daha yüksek entropiye sahiptirler. Bilyeler yüksek entropinin daha az değil de daha çok düzen anlamına geldiği basit bir sistemin iyi bir örneğidir. Entropiyi basitçe düzensizliğe eş tutmak yanıltıcı olabilir. Biyolojik hücrelerde kendiliğinden oluşurken entropiyi yükselten pek çok düzenli yapı vardır. Bunlar arasında protein öbekleri, hücre zarı yapıları ve lifler vardır. Bu örneklerde düzensizlik çevredeki su moleküllerine aktarılarak entropi yükseltilir. Bunun nasıl işlediği ile ilgili daha fazlası 4. Bölüm'de gelecek.

Bir kez daha görüyoruz ki ikinci yasa, yaşamın ortaya çıkışına ve süren varlığına engel oluşturmaz. Entropi toplamda yükseltiliyorken yerelde (örneğin buzdolabımızda) düşürülebilir ve bazen entropideki artış (sert kürelerde olduğu gibi) daha fazla düzenliliğe yol açar. Yaşam, ikinci yasadaki bu bariz boşlukların her ikisinden yararlanır.

Serbest Enerji

Yaşam, entropiyi yerelde azaltırken toplamda artırır. Entropi kavramı bu durumu oldukça iyi bir biçimde açıklar; ama zora düştüğü bir nokta vardır. Yaşamsal süreçleri termodinamiğin ikinci yasası ile açıklamak için bir canlının *ve* çevresinin entropisini incelememiz gerekir (çünkü çevrenin incelenmesi ikinci yasanın çiğnenmemesini sağlama alır). Ne var ki, çevre ile ilgili ayrıntılar iyi bilinmiyor olabilir ve gerçekte bilmek istediğimiz tek şey ısının (ve entropinin) çevreye kaçıp kaçamadığıdır. Bunun için yalnızca çevrenin sıcaklığını bilmemiz gerekir. Bu gerçek, bilim insanlarının sabit sıcaklıklı çevrelere gömülü termodinamik sistemlerin (örneğin bir canlı ya da

bir hücre) incelenmesinde yeni bir yol bulmalarına önayak olmuştur.

Bir sistemin sıcaklığı nasıl sabit tutulabilir? Eğer bir kimyacıysanız ve sisteminiz bir deney tüpüyse, bu deney tüpünü sabit sıcaklıkta tutulan büyük bir küvet içine yerleştirebilirsiniz (ya da 0 Santigrad derecede bir kova buzlu suyun içine). Eğer sistem, ısıveren bir tepkimeden dolayı ısınmaya başlarsa ısı hızla çevreleyen küvete akacaktır, ta ki sitemin sıcaklığı küvetinkine eşitleninceye kadar. Eğer sistem soğursa (ısıalan tepkime) çevreleyen küvetten ısı çekecektir. Eğer küvet yeterince büyükse sistemden kaynaklanan ısı akışı küvetin sıcaklığını değiştirmeyecektir. Böylece küvet, bir enerji haznesi ve sıcaklık düzenleyicisi olarak iş görür.

Canlılar da ısı banyosu işlevi görürler. Hücrelerimiz sıcaklığı 37 Santigrad derecede olan bir küvetin (bedenimizin) içindedir. Hücrelerimizdeki bütün kimyasal tepkimeler bu sabit sıcaklıkta gerçekleşir. İkinci yasayı bu duruma uygulamak istediğimizde alengirli bir durum oluşur. İkinci yasa *toplam* entropinin arttığını söyler. Bu yüzden, böbrek hücrelerimden birisinde gerçekleşen bir tepkimeye bakacak olsam yalnızca tepkimeye katılan moleküllerin değil aynı zamanda çevresindeki dokunun da entropisinin ne yönde değiştiğini bilmem gerekir. Yalnızca ufacık bir tepkimenin çıktısını belirlemek için karmaşık hücre birliklerindeki entropi değişimini incelemem gerekirdi.

Bunun, daha kolay bir yolu vardır. Sıcaklığın banyo tarafından sabit tutulduğunu bildiğimiz sürece, çevreleyen banyo ile olan ısı ve entropi değiş tokuşu basitçe sıcaklık ile gösterilebilir. Bunu yapmak için *serbest enerji* kavramını kullanırız. Serbest enerji (F), toplam enerjiden (E) sistemin sıcaklığı (T) ile entropisinin (S) çarpımının farkıdır (ya da $F = E - TS$). Entropi, enerjinin ne kadar dağınık ya da kullanışsız olduğunu

gösterdiğinden serbest enerji, enerjinin halen "yoğunlaşmış" ve kullanışlı olan kısmına karşılık gelir (çünkü kullanışsız kısmı yani *TS'yi* çıkarıyoruz).

Kendi bedenlerimizin oluşturduğu sabit sıcaklıklı ortam içindeki bir sistemi incelemek için sistemin serbest enerjisinin ne yönde değiştiğini bilmemiz gerekir. İkinci yasa, serbest enerjinin dilinden şöyle yeniden özetlenir: Bir sistem, sabit sıcaklıkta, ta ki dengeye ulaşıp serbest enerji en düşük değere inene kadar serbest enerjisini azaltma eğilimindedir. İkinci yasa bize, kullanışlı enerjinin azalacağını ve sonunda dağınık, kullanışsız enerji ile baş başa kalacağımızı söyler.

Serbest enerji hem enerji hem de entropi içerdiği için kavram olarak yukarıda tartıştığımız çelişkili durumların pek çoğunu açıklar. Örneğin, gelişigüzel istifleme örneğinde gelişigüzel ya da düzenli biçimde istiflenmiş bilyelerin enerjileri arasında çok fark yoktur ama düzenli istiflenenlerin entropisi daha yüksektir. Dolayısıyla enerji *eksi* entropi çarpı sıcaklık ile hesaplanan serbest enerji, düzenli bilyeler için *daha düşüktür* ve sistem kendisinin serbest enerjisini en aza indirme eğiliminde olduğu için dengelenmiş, düzenli bir duruma eğilim gösterecektir.

Sistemin hem entropisinin hem de serbest enerjisinin azaldığı örnekler de düşünebiliriz. Bunun nesi bu kadar özeldir? Entropiyi azalttığımızda serbest enerji *yukarı* gitme eğilimindedir çünkü entropi öğesini toplam enerjiden çıkarırız. Örneğin bir molekülün toplam enerjisi 5 eV ve entropi çarpı sıcaklık 2 eV ise serbest enerji $F = 5\text{ eV} - 2\text{ eV} = 3\text{ eV}$ olur. Şimdi, eğer entropi öğesi 1 eV'a düşerse (örneğin sistem soğutularak) serbest enerji *yükselerek* $5\text{ eV} - 1\text{ eV} = 4\text{ eV}$ olur.

Hem entropi hem de serbest enerji aynı anda düşebilir mi? Sıcaklığı sabit tuttuğumuzda bu, yalnızca sistemin toplam enerjisi E de düşerse ve entropi öğesinden daha fazla düşer-

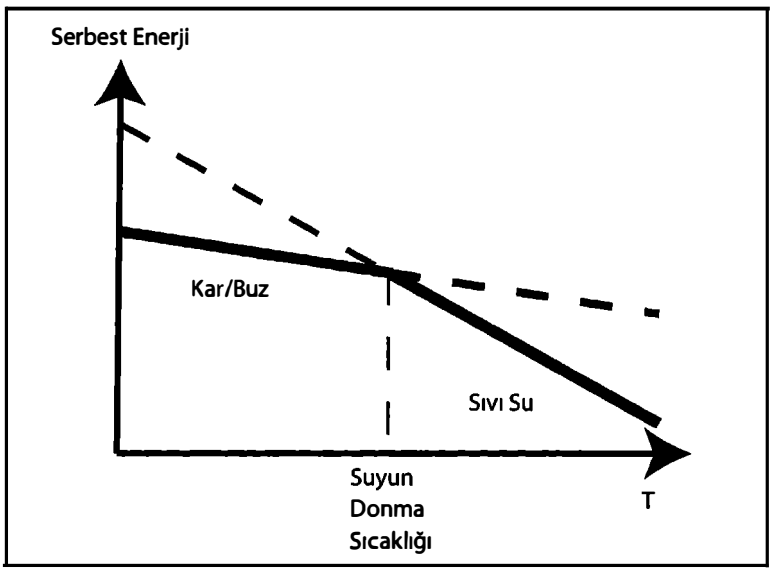
se olasıdır. Örneğin entropi öğesi önceki gibi 2 eV'tan 1 eV'a düşerken toplam enerji 5 eV'tan 3 eV'a düşerse yeni serbest enerji 3 eV – 1 eV = 2 eV olur. Entropinin azalmış olduğu gerçeğine karşın bu, baştaki 3 eV'tan daha azdır.

Bu örnek, ikinci yasayı neden çiğnemez? Entropinin artması gerekmez mi? Sistemin toplam enerjisi 5 eV'tan 3 eV'a düştüğünde "kayıp" enerji bir yere gitmek zorundaydı (enerjinin korunumunu hatırlayın). Çevreye aktarılan enerji onu ısıttı ve çevrenin entropisini yükseltti. Önceden olduğu gibi, her ne kadar küçük sistemimizin kendi başına entropisi azalmış olsa da *toplam* (sistem + çevre) entropi yükseldi. Serbest enerji dilinin, bu gibi durumlar hakkında düşünmeyi nasıl kolaylaştırdığını görebilirsiniz: Bir sistemin serbest enerjisi azaldığı sürece ikinci yasaya uymuş oluyoruz.

Doğada kendiliğinden entropi düşüşünün örneklerini bulabilir miyiz? Her zaman! Bir kar tanesinin oluşumunu ele alın. Sıvı bir su damlası ile kıyaslandığında bir kar tanesi çok daha düşük entropiye sahiptir (aynı zamanda çok daha düzenlidir). Fakat, kar taneleri doğru koşullar altında kendiliğinden oluşurlar. Bunun nedeni, bir kar tanesinin enerjisinin (denklemimizde E) bir su damlasınınkinden çok daha düşük olmasıdır. Sıcaklığın, suyun donma noktasının altına düşmesiyle birlikte entropideki azalma enerjideki bu azalmaya yenik düşer ve su donarak güzel, düzenli kristallere dönüşürken serbest enerji azalır. Bu yüzden, düşük sıcaklıkta, bir kar tanesi bir su damlasından daha düşük serbest enerjiye sahiptir. Ne var ki, yüksek sıcaklıkta entropi öğesi (şimdi daha yüksek olan sıcaklık ile çarpım durumundadır) enerji öğesini (E) tekrar yener ve su sıvılaşır. Yüksek sıcaklıkta, sıvı su donmuş sudan daha düşük serbest enerjiye sahiptir. Bu, Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Sıvı ve donmuş su arasındaki rekabet hakkında moleküler fırtınanın diliyle de düşünebiliriz. Düşük sıcaklık-

larda, atomlar arası kuvvetler moleküler fırtınanın sarsıcı etkisinden daha güçlüdür ve atomları yapılar oluşturacak şekilde bir araya toplar; yüksek sıcaklıklarda, atomlar arası kuvvetler daha şiddetli moleküler fırtınayla aşık atamaz ve kar taneleri erirler. Serbest enerji kavramı, nedensel (deterministik) kuvvetler (kimyasal bağlar) ile moleküler fırtına arasındaki (diğer bir deyişle gereklilik ile şans arasındaki) halat çekme yarışını tek bir zarif denklem içinde yakalıyordu: $F = E - TS$.



Şekil 3.1. Sıvı haldeki suyun (siyah) ve buz ya da karın (gri) serbest enerjisinin sıcaklığa karşılık grafiği. Sıvı haldeki suyun entropisi daha yüksek olduğundan grafikte daha dik bir çizgi ile gösterilmiştir. Düşük sıcaklıklarda buz, sıvı haldeki sudan daha düşük serbest enerjiye sahiptir ve su donar. Yüksek sıcaklıkta sıvı haldeki su (yüksek entropiden ötürü) daha düşük serbest enerjiye sahiptir ve buz erir.

Moleküler Fırtınayı Sürmek

İkinci yasaya göre serbest enerji sonunda ayrıştırılıp en düşük değere ulaşacaktır. Eğer bu eğilim tüm doğal süreçler için geçerliyse evren, büyük patlama sırasında bol miktarda serbest enerji ile başlamış olmalıdır. Bu, açık bir biçimde evrenin en büyük armağanıdır: Bu devasa miktarda serbest enerji olmaksızın evren soğuk, tekdüze ve çok sıkıcı bir yer olurdu. Evren, bu ikramiyesini nasıl bölüşür? Büyük patlama, saf enerji ve pek az entropi ile başladı (tek bir noktanın pek fazla entropisi olamaz). Enerji, büyük patlamadan kısa zaman sonra ışık hızına yakın bir hızla hareket eden, vızıldayan yüksek enerjili parçacıklarda beden buldu. Parçacıklar çarpıştılar, yok oldular ya da genişleyen ateş topunun içinden belirdiler ve böylece önceden basit düzen olan yerde karmaşa yarattılar. Yeni doğmuş evren, genişleyen bu ateş topunun içerisinde (serbest enerjisinin bir kısmını ayrıştırmanın yanında) entropi üretmeye başladı. Serbest enerji ayrıştıkça ortaya yeni yapılar çıktı; Einstein'ın kütle ve enerji eşitliğine göre ($E = mc^2$) niteliksiz enerji kuarklar, elektronlar, muonlar, nötrinolar, fotonlar ve onların bütün ufacık kardeşlerine dönüştü.

Evren, üç yüz bin yıl sonra ilk atomları oluşturacak kadar soğumuştu: Protonlar ve nötronlar denen, üçlüler halinde bir araya gelmiş kuarklar. Protonlar ve nötronların kümelendiği çekirdekler elektronları yakaladılar. Atomsal bağlanma enerjisinin salınması (ısıya dönüşmüştür) ile bir kez daha evrenin entropisi yükseldi ve bu süreçte yeni bir şey oluştu. Evren soğumayı ve gitgide daha az yoğun olmayı sürdürdü. Boş, soğuk ve hidrojen ile helyumdan daha büyük atom ağırlığına sahip çekirdekler üretemez halde olan evren, yüzde 99,9'undan çoğunu yalnızca bu elementlerle doldurdu. Gökbilimciler arasında elementler çizelgesinin gerçekte sadece bu iki girdiye gereksinim duyduğu şakası yapılır. Bütün diğer ele-

mentler o kadar az bulunur ki onları göz ardı etsek olur (tabii durum gerçekten böyle olsaydı hiç gökbilimci olmazdı).

Evreni hidrojen ve helyum ile doldurmak onu yakıtla doldurmak gibiydi. Hafif çekirdekler çekirdek kaynaşımı (füzyon) denen bir süreçle birleşerek daha ağır çekirdekleri oluşturduklarında büyük miktarlarda enerji salarlar (hidrojen bombasında olan budur). Daha ağır çekirdekleri oluşturabilmek için daha hafif iki çekirdeğin çok yüksek hızda çarpışması gerekir. Yüksek hız, yüksek sıcaklığa işaret eder; bir çekirdek kaynaşımı tepkime odası yapmanın zorluğunun da gösterdiği üzere, gereken sıcaklıklara ve yoğunluklara ulaşmak zordur.

Bu noktada kütleçekim, doğaya bir yardım eli uzatmıştır. Evrenin ilk dönemlerinde bazı bölgeler komşuları olan bölgelere göre (sadece şanstan ötürü) biraz daha yüksek yoğunluğa sahipti. Bu daha yoğun bölgeler kütleçekimsel olarak daha çok atom çektiler, daha fazla kütle kazandılar ve daha çok atom çekmeyi sürdürdüler. Atomların bir zamanlar neredeyse eşit olan dağılımı giderek artan biçimde kümelenmiş hale gelmişti. Atomlar dev bulutsular içinde kümelenmiş, dev boşluklarla ayrılmıştı. Bulutsular kendi ağırlıkları altında çökmeye başladılar ve süren çöküşleri gitgide daha sıcak hale geldi. Sonunda bulutsular içindeki yoğunluk o kadar arttı ve çekirdekler arası çarpışmalar o kadar hızlandı ki çekirdek kaynaşımı daha ağır çekirdekler üretmeye başladı. Hidrojen ve helyum pişirilip daha ağır elementlere dönüştü ve yıldızlar doğmuş oldu.

Yıldızlar evrenimizde bol bol bulunan yakıtla "çalışan" ocaklardır. Yıldızların derinliklerinde çekirdek kaynaşımı, demir elementine değin, gitgide daha ağır çekirdekler üretir (süpernova denen büyük yıldız patlamalarında daha da ağır elementler yaratılır). Kaynaşımda enerji salınır ve ışıma ola-

rak dışarıya akar. Bizim güneşimiz Dünya'nın havaküresini atomlar ve moleküller tarafından soğurulan elektromanyetik ışınım ya da ışık ile yıkar. Moleküllerce soğurulan bu ışık enerjisi sonuç olarak onların titremelerine, dönmelerine ya da daha hızlı hareket etmelerine neden olan kinetik enerjiye dönüştürülür. Bu hızlı moleküller daha yavaş, daha düşük enerjili moleküllerle çarpıştıkça enerjilerinin bir kısmını çarpışma sırasında bırakırlar. Kısa sürede güneşten gelen bu enerji armağanı pek çok molekül arasında dağılıp havaküremizi ısıtır. Moleküler fırtına ve gezegenimizdeki bol miktarda serbest enerji evrenden çıkıp güneşimiz tarafından bize ulaştırılır.

Açık Sistemler

Evrenin bu kısa tarihi serbest enerjinin ayrıştırılmasının hepten kötü olmadığını göstermiştir. Serbest enerji harcanıp evrenin entropisi artarken kuarklardan çekirdeklere, çekirdeklerden atomlara, atomlardan... yaşama yeni yapılar doğmuştur. Evren, serbest enerjisini paylaşmayı coşkuyla sürdürüyor. Sürekli enerji akışı yaşamın bir gerçeğidir; canlı sistemleri termodinamik dengenin dışında tutan bir gerçektir. Denge, kullanılabilir bütün serbest enerjinin ayrıştırıldığı ve geriye hiç kullanışlı enerjinin kalmadığı durumdur. Denge ölüm demektir. Canlıların dengeden kaçınmaları gerekir. Enerji, yaşadığımız sürece içimizde akmayı sürdürür. Çevrelerine enerji ve madde akıtan sistemlere termodinamikte *açık sistemler* denir.

Canlıların açık sistemler olduğunun farkına varmak yaşamı anlamamıza yönelik önemli bir adımdır, ama yeterli değildir. Daha büyük hacimli bir gazın içindeki daha küçük hacimli bir gaz da açık bir sistemdir; sürekli bu hacme yeni moleküller girerken başkaları ayrılır. Eğer kendi başına bıra-

kılırsa bu hacim, herhangi bir zamanda ortalama olarak aynı sayıda molekülün girip çıktığı bir duruma girme eğilimi gösterecektir. Dahası, moleküller dönüşmezler. Giren moleküller, çıkanlar ile aynıdır. Bunun sonucunda, serbest enerjinin ayrıştırılması söz konusu değildir. Bu gibi bir hacim açık olduğu halde dengededir.

Canlı sistemler farklıdır: Sisteme giren ve çıkan bir değildir. Canlılar düşük entropili enerjiyi sömürür, ayrıştırır ve çevreye yüksek entropili enerji salar. Bu gibi sistemlere *savurgan düzenekler* deriz; çünkü sürekli olarak serbest enerjiyi çarçur edip yüksek entropili enerji çıkarırlar.

Bu yüzden canlılar *açık, savurgan düzenek*lerdir. Ama dahası var. Doğa, bizim canlıdan saymayacağımız açık, savurgan düzeneklerle doludur. Bir kasırga buna örnektir. Düşük entropili bir enerji kaynağını (okyanus ile havakürenin üst katmanı arasındaki büyük sıcaklık farkı) alır ve büyüleyici bir güç gösterisi içinde bu enerjiyi sürekli çarçur eder. Okyanusun ısısını havakürenin soğuk üst katmanına taşınım (sıcaklık farklarına dayalı hava kütlesi hareketi) ile aktararak enerjiyi boşa harcar. Devasa hava kütlelerinin hareketi Dünya'nın dönüşünden kaynaklanan kuvvetlerle birleşerek, hareket eden havayı kısa sürede devasa bir dönen fırtınaya çevirir. Ilık okyanus havası kaynağı bulundukça fırtına, suyu süpürürken okyanusun ısı enerjisini çarçur ederek coşmayı sürdürür. Kasırga hakkındaki en çarpıcı şey yapısıdır: dönen bulut girdapları, ortada fırtına gözü. Pek çok açık, savurgan düzenek ikinci yasayı çiğner görünerek kendiliğinden yapı oluşumu sergilerler. Ama biz, burada bir çelişki olmadığını zaten biliyoruz. Kasırga *toplamda* entropiyi, yerelde azalttığından çok daha fazla artırır.

Dengeden uzak sistemlerin ve onların kendiliğinden oluşan "savurgan yapılarının" incelenmesi, pek çok bilim insanı-

na canlı sistemlerin de benzer biçimde yapılandığını düşündürmüştür. Ama bu, yanıltıcı olurdu. Canlılığa mikroskobik seviyede yakından bir bakış onun, evrim tarafından tasarlanmış karmaşık moleküllerin sıkı denetlenen bir dansı olduğunu gösterir. Kasırga gibi kendiliğinden, savurgan bir sistem değildir. Yaşam yüksek verimlilikte bir süreçtir. Verimlilik en iyi, dengeden çok uzaklaşmadığımız zaman elde edilir; çünkü büyük hareketler sürtünmeye ve bunun sonucu olarak düşük entropili enerjinin hızla ayrıştırılmasına neden olur. Yaşam, orta yolu seçer: Dengeden uzak durarak canlı kalırız. Dengeye yakın durarak verimliliği artırırız.

Yaşam dengeye yakın, sıkı denetlenen, açık, savurgan, karmaşık bir sistemdir. Böyle bir sistem ancak parçaları termodinamiğin sınırlarını zorlamak için (evrim tarafından) "tasarlanmış" ise işleyebilir. Yaşam, termodinamiğin ikinci yasasına karşın var olmaz; bunun yerine yaşam, elinden geldiğince ikinci yasadan en yüksek oranda yararlanmak üzere evrimleşmiştir. Ama bunu nasıl yapabilir? Yaşamın makineleri moleküllerin ufacık ölçeğinde nanometre düzeyinde çalışır. Ama bu ölçeğin nesi bu kadar özeldir ki karmaşa yapıya ve gürültü yönlendirilmiş harekete dönüşebilir?

4

Çok Küçük Bir Ölçekte

Bir parça tuhaflık barındırmayan
kusursuz bir güzellik yoktur.
— FRANCIS BACON

Biyolojik bir sistem son derece küçük olabilir. Hücrelerin çoğu ufacıktır ama çok etkindir; çeşitli maddeler üretirler, çevrede gezinirler, kıpırdanırlar ve her çeşit hayranlık uyandırıcı şeyi yaparlar; bunların hepsi de çok küçük bir ölçekte olur.

— RICHARD FEYNMAN, "TABANDA BOL BOL YER VAR", AMERİKAN FİZİK TOPLULUĞU TOPLANTISINDA KONFERANS, 1959*

Biyolojik sistemlerin moleküler makinelere dayanıyor olduğu ve bizim bu çeşit şeyler tasarlayıp inşa etmeyi öğreniyor olduğumuz gerçeğinden etkilenmişimdir.

— K. ERIC DREXLER**

* Bu alıntı California Teknoloji Enstitüsü *Mühendislik ve Bilim Dergisi*'nin izniyle yapılmıştır.

Bu alıntı K. Eric Drexler'in izniyle yapılmıştır.

2011 Mart'ında Biyofizik Topluluğu'nun toplantısına, bu alandaki emektarların neler yaptığını ve kendi araştırmamı ne yönde ilerletmem gerektiğini öğrenmek üzere katıldım. Biyofizik, yaşayan sistemlerin fiziksel zeminleri ve yaşamın araştırılmasında fiziksel yöntemlerin kullanımı ile ilgilenir. 1800'lerde biyofizik Helmholtz gibi araştırmacılar tarafından kurulduğunda canlıların, kolayca elle tutulur ve gözle görünür kısımları ile uğraşıyordu. Bugün, gezegendeki en büyük biyofizik toplantısına (altı bin beş yüz katılımcı, dört gün boyunca her gün yedi yüzden fazla sunum yapmıştır) katıldığınızda göreceğiniz gibi her şey kesinlikle nanoölçekte bulunan yapılarla ilgilidir. Bugün biyofizik, nanofiziktir.

Biyomoleküler dünya, zarif yapılar ve gizemli bir değişim ve hareket dürtüsü ile doludur. İnsanlar bir dizi konuşmada *hareketlilik çözümlemeleri* (miyozin denen protein moleküllerini bir yüzeye iliştirip sonra da miyozinlerin üzerine aktin denen ipliksi proteinler ekmeye verilen havalı bir ad) sundular. Bütün bu moleküller o kadar küçüktür ki bir ışık mikroskopunda kolayca görülemezler. Görünür kılmak için araştırmacılar onlara, aktin ipliklerini moleküler ateş böceklerine dönüştüren, küçük moleküler fenerler (floroforlar) iliştirirler. Miyozin ve aktin ipliklerini sıvı bir tampon çözeltiye batırdığınızda pek de bir şey olmaz; ama ATP denen enerji saklama molekülünü eklediğinizde aktin, tüm yüzey boyunca "canlanır". Nanometre ölçeğinde aktin iplikleri küçük kurtçuklar gibi neredeyse dosdoğru bir yönde gitmeye başlarlar. Bazen görünmez bir engele çarpar ve yön değiştirirler. Yeterince ATP sağlandığı sürece gider dururlar. Onları hareket ettiren nedir? Araştırmacılara göre miyozin molekülleridir. Miyozinler, moleküler motorlar gibi davranarak birer çift moleküler "elleri" ile aktini ileri iterler ve her bir aktin ipliğini bir miyozin molekülünden sonrakine, kalabalığın elleri üstünde gezdirilen bir rock yıldızı gibi aktarırlar.

Başka konuşmalarda, araştırmacılar hücrelerin aktin ya da daha güçlü mikrotübüller gibi iplikçikler sentezleyerek nasıl biçim değiştirdiklerini açıkladılar. İplikçikler, ya kendiliklerinden bir araya gelerek (polimerizasyon) ya da moleküler makineler tarafından bir araya getirilip parçalanarak biçim alan küçük birimlerden oluşmuştur. İplikçikler büyüdükçe hücre yüzeyini iterek çıkıntılar meydana getirirler. Hücreler böyle hareket eder. Daha başka konuşmalar, hücre zarlarının (her bir hücreyi kuşatan ve hücre içi ile dış ortamı birbirinden ayıran ince kabukların) karmaşık yapıları ile ilgiliydi. Özelleşmiş gözeneklerle kalbura dönmüş zar yalnızca istenen moleküllerin hücre içine girişine izin verirken istenmeyen moleküller de dışarı atılır. Zarın üzerinde hücrenin "TV alıcıları" yüzmektedir; bunlar dış dünyadan bir uyarım bekleyen hücre almaçlarıdır. Uyarım geldiğinde zardan içeriye iletilerek hücresel hareket, hücre bölünmesi, bir bileşiğin salgılanması veya hücre intiharına yol açabilecek bir dizi etkinliği başlatırlar. Bu, hücrelerimizin nanoölçekli dünyasıdır.

Yaşam nanoölçekte başlamak *zorundadır*. Burası, basit atomların ötesinde karmaşıklığın belirmeye başladığı ve enerjinin bir biçimden diğerine dönüşmekte olduğu yerdir. Şans ile gerekliliğin buluştuğu yerdir. Nanoölçeğin altında yalnızca karmaşa buluruz; bu ölçeğin üstünde ise yalnızca katı gereklilik.

Nano

On altı yaşında birkaç tane gence bir nanometrenin ne kadar küçük olduğunu nasıl anlatırsınız? Macob County Matematik ve Fen Merkezi'nden seksen adet lise öğrencisinin karşısında araştırmalarımı açıklamaya çalışıyordum. Onlara düşlenemez olanı düşletmem gerekiyordu. "Bir nanometrenin

bir insanın boyuna oranı, bir insan boyunun Dünya ile Ay arasındaki uzaklığın on katı oranına eşittir" diye başladım; fakat Dünya ile Ay arasındaki uzaklığın pek çoğumuzun birinci elden deneyimlediği bir şey olmadığını çabucak fark ettim. Alnımda boncuk boncuk ter damlaları oluşmaya başlamıştı. Tekrar denedim: "Bir nanometre o kadar küçüktür ki, nanometreye ulaşabilmek için insanın bir saç telini enine yüz bin defa dilimlemeniz gerekir." Daha iyi oldu. Ama uzaklığı zamana çevirsek nasıl olur? "Eğer sizin boyunuzu bir nanometreye küçültseydim, saatte yaklaşık iki yüz elli nanometre yürüyebilirdiniz. Bu hızda, gerçek boyutlarda bir insanın boyunu tepeden tırnağa yürümeniz seksen iki *yıl* (!) sürerdi." Nefesleri kesildi. Anlamaya başladılar ki bir nanometre sadece çok küçük değil; o kadar küçük ki, nano âlem, bizim deneyimlemeyi umabileceğimiz her şeyin büsbütün dışında. Fakat bunları ölçebiliyoruz.

Geleceğin bilim insanlarına yaptığım bu konuşmadan elli yıl önce, Nobel Ödülü sahibi ünlü fizikçi Richard Feynman, 1959 Amerikan Fizik Derneği toplantısında fizikçi yoldaşlarına çığır açan bir konuşma yapmıştı. Feynman'a yaraşır biçimde konuşmasının başlığı "Tabanda Bol Bol Yer Var" idi. "Taban", mikrometrelerden (bin nanometre) çapları yalnızca nanometrenin onda birkaçı kadar olan atomlara kadar inen mikroskobik ölçek idi. Feynman'ın varmak istediği nokta, yalnızca birkaç nanometre büyüklüğünde makineler yaratmaktan hiçbir fizik kuralının bizi alıkoymaması gerektiğiydi. Bu sadece bir mühendislik sorunuydu.

Feynman'ın öngörüsünün gerçeğe dönüşmesi biraz zaman aldı ama 1980'lerin sonunda nanoteknoloji yükselişine başlıyordu. Yalnızca birkaç nanometre büyüklüğündeki nesneleri görüntülemeye ve onları ölçüp türlü yönlerde işlemeye yarayan aletlerin icadıyla birlikte artık nanoölçekte çıkıntılara

verileri sıkıştırmak ya da gitgide daha karmaşık nanoölçekli yapılar üretmek olasıydı. Bu gelişmeler 1990'lardan 2000'lere kadar bir tür delice öngörüler çılgınlığına yol açmıştı. Bu öngörülerden bazıları fazla coşkuluydu (bütün enerji, tıp ve çevre sorunlarımızdan bizi nanoteknoloji kurtaracaktı) ve bazıları da felaket tellallığıydı (önüne çıkan her şeyi yiyip bitiren nanorobotlardan oluşan gri bulut; *Dünyanın Durduğu Gün* filminin yeniden çekiminde ya da Michael Crichton'ın kitabı *Av*'da olduğu gibi).

En azından basında nanoteknoloji deliliği bir nebze dindi. Nanorobotların (ya da nanobotların) trans-yağ ile sınanmış atardamarlarımızdaki tıkanıklıkları açma vaadi umulduğu kadar hızlı beden bulmadı. Nanoteknolojinin tehlikeleri ortada (küçük, nanoölçekli iplikçikler kansere neden olabilirler; asbesti düşünün) ama gri bulut düşüncesi epey abartılı görünüyor. Basın, yoluna devam etti. Ama bilimde nanoteknoloji ve nanobilim hâlâ sağ ve salimler. Çok sayıda fizikçi, mühendis, kimyacı ve tıbbi araştırmacı nanopillerden nanoilaçlara kadar değişik alanlarda nanoteknoloji araştırmaları ile uğraşmaktadır.

Kişisel olarak, nanoteknolojiden çok nanobilimden söz etmeyi yeğliyorum. Nanoteknoloji, işin bilimi çözüldükten sonraki aşama. Nanobilim nedir? Özetle, en az bir uzamsal boyutu nanometre aralığında olan sistemlerin üretimi, ölçümü ve anlaşılmasıdır. İnce katman teknolojisi ve kimyanın bazı dalları gibi birçok geleneksel araştırma alanı yalnızca bir mikrometreden küçük şeylerle uğraştıkları için birden bire nanoteknoloji araştırmalarına dönüştüğünden, bu genel tanım bazen sorunlara yol açmıştır. Bu yüzden nanoteknoloji ile ilgili bir espri yapılır; araştırmalara maddi destek veren kuruluşlardan para koparmak için bir tezgâh olduğu söylenir. Bu yakıştırmada, özellikle başlarda biraz doğruluk payı

olsa da nanoölçeğin gerçekten özel bir yanı vardır: Sistemler bu "sihirli" ölçeğe küçültüldükleri zaman yeni ve beklenmedik özellikler sergilemeye başlarlar.

Feynman'ın 1959 Amerikan Fizik Derneği toplantısındaki konuşması sıklıkla nanobilim devriminin başlatıcısı olarak anılır. Oysa ki gerçek, biraz daha karmaşıktır. Ünlü konuşmasını yaptığında toplanmış dinleyiciler konuyu çok da ciddiye almamışlardı. Toplantıya katılanlardan birisi "Genel tepki eğlenme biçimindeydi. Seyircilerin çoğu, komiklik yapmaya çalıştığını düşünmüştü... Herkes hazırlıksız yakalanmıştı,"* diye anımsıyor. Feynman'ın konuşması yirmi beş yıl sonra, öngörülerinin pek çoğu gerçekleşmeye başladığında yeniden keşfedilmişti. O sırada teknoloji, Feynman'ın ileri görüşlü düşüncelerinin birçoğuna yetişmişti ve düşünceleri en sonunda ciddiye alınır olmuşlardı.

Feynman, nanoteknoloji hakkında yakın zamandaki pek çok öngörülü kimse gibi, canlı düzeneklerden esinlenmişti. Biyolojik hücrelerde bilginin "çok küçük bir ölçekte" yazılışı ve hücrelerin bu bilgiyi "maddeler üretmek", "etrafta gezinmek" ve "her türlü büyüleyici şeyler yapmak"ta kullanmalarından etkilenmişti.** Gerçekten de günümüz nanoteknoloji uzmanları, nanoölçekli makineler yapmayı düşlüyorlarsa doğanın kendilerinden yalnızca üç milyar yıl kadar erken davrandığını kabullenmek zorundadırlar. Canlı hücreler nanoölçekte, neredeyse esrarengiz bir kesinlikle hayranlık yaratan beceriler sergileyen moleküllerle dolup taşmaktadır.

---

* Christopher Toumey "Reading Feynman into Nanotechnology: A Text for a New Science," *Techné* 12, no. 3 (güz 2008): 133-168. Toumey, bu alıntıyı o zamanlar Pasadena'daki California Teknoloji Enstitüsü, Jet Tahrik Laboratuvarı'nda olan Paul Shlichta'ya atfeder.

Richard Feynman, "Tabanda Bol Bol Yer Var," *Caltech Engineering and Science* 23 (Şubat 1960): 22-36.

Feynman, nanoölçekte küçültmenin bütün bir kitabı bir iğnenin ucunda saklamamıza, ufacık motorlar yapmamıza, atomları tek tek hareket ettirmemize ya da güçlü cep bilgisayarları yapmamıza olanak sağlayacağını öngörmüştü. Bütün bunları yapmış bulunuyoruz. Öngörülerinin bazıları hâlâ gerçekleştirilebilir değil; örneğin nanoölçekli bir cerrah yaratmak; şimdilerde nanobot diye bildiğimiz bir düşünce. Nanobot, hap gibi yutulan ya da kan dolaşımına verilen küçük bir cihaz olacaktı. Bu cihaz, atardamarlardaki tıkanıklığı temizlemek ya da kanser hücrelerini bulup yok etmek gibi nano ameliyatlar gerçekleştirecekti. Nitekim, hedefe yönelik ilaç gönderimi ya da nanotıp denen bir alanda çalışan araştırmacılar, özel olarak hedeflenmiş hücreleri (örneğin kanser hücreleri) bulup yüklerini (kanser hücresine ölümcül ilaçları ya da genlerdeki hasarı düzeltecek bir DNA parçasını) yalnızca hedef hücreye boşaltacak nanoyapılar yaratmakta kayda değer ilerleme göstermiş durumdalar. Feynman'ın, Robert Heinlein tarafından yazılmış bir bilim kurgu öyküden aldığı bir diğer öngörüsü, kendisinin daha küçük bir örneğini üretebilen bir makine yapabilme olasılığıydı. Küçük örnek de daha küçük bir örnek üretebilirdi. Bu makineler, ta ki en sondaki, nanometre büyüklüğünde makineye inene kadar bir matruşka takımı gibi, gitgide kendilerinin daha küçük örneklerini üreteceklerdi. Moleküler dişlilerden oluşan küçük makinelere dair benzer düşünceler, bir MIT mühendisi olan K. Eric Drexler'ı (d. 1955), moleküler makinelerin olabilirliği üzerine şimdi ünlü olan bir kitap yazmaya itti. 1970'lerin sonlarında Feynman'ın konuşmasını okumasından önce Drexler, moleküllerden makineler yapma olasılığını zaten düşünmüştü; Feynman'ı okumak ona ek bir itici güç sağladı. 1986'da çağdaş nanoteknolojinin temel taşını yayınladı: *Yaratım Makineleri: Nanoteknolojinin Yaklaşan Devri.* (*Engines of Creation: The*

Coming Era of Nanotechnology.) Her ne kadar belirli alanlarda ciddi gelişmeler olsa da Drexler'ın düşüncelerinin çoğu şimdiye dek bilim kurgu olarak kaldı. Örneğin, atomları tek tek hareket ettirerek bir yüzey üzerinde atomlardan oluşan çemberler ya da üçgenler gibi şekiller oluşturmak bugün sıradan bir şey haline gelmemiş olmakla birlikte, doğru aletler kullanılarak yapılması mümkündür.

Doğru aletler, Drexler'ın kitabını yazdığı sıralarda icat ediliyorlardı. Bu aletlerin en çok kendinden söz ettireninin, tarayıcı iğne mikroskobunun, yeni filizlenen nanoölçek bilimine olduğu gibi benim yaşamıma da çok büyük etkisi olmuştu.

Atomlara Dokunmak

Oxford Üniversitesi'nde doktora tezinizi savunurken konunuza hâkim olsanız iyi edersiniz. Sınavı yapmak üzere diğer üniversitelerden, tercihen yurtdışından uzmanlar getirilir. Sizi tanımazlar ama aylak olmadığınızdan emin olmak için oradadırlar. Arkadaşım Steve atomik kuvvet mikroskopları (AKM) ile ilgili çalışmaları için Oxford'dan doktorasını aldığında sınavını yapanlar dünyanın en ünlü AKM uzmanlarından ikisiydi: Nobel Ödülü sahibi Gerd Binnig ile birlikte 1986'da dünyanın ilk AKM'sini icat ve inşa eden Christoph Gerber ve dünyadaki en büyük ve başarılı AKM ekiplerinden birini yöneten Ernst Mayr. IBM için çalışan Gerber teknik bir dehadır. 2000'de Steve'in doktora sınavını yapmak için Oxford'a geldiğinde, bize AKM'nin yeni bir yan ürününden bahsetti: yapay bir burun. Bu cihaz, küçücük sundurmaları (mikrometre uzunluğunda silikon kirişler) uçucu kimyasalları soğuran çeşitli malzemelerle kaplamak yoluyla iş görüyor. Kimyasallar soğurulduğunda sundurmayı kaplayan malzeme genişler ve sundurma eğilir. Her biri farklı çeşitte kim-

yasallara duyarlı malzemelerle kaplanmış bir dizi sundurma kullanarak bu mekanik buruna pek çok farklı kokuyu ayırt etmesi öğretilebilir. İskoç viskisi erbabı olan Gerber, mekanik burnunun Craigellachie'yi Laphroaig'den ayırmakta zorlanmadığını öğrenmekten heyecan duyuyordu; ama burun, ona viskilerinden birinin belirli belirsiz bir kiraz tadı barındırdığını söylediğinde daha da şaşırmıştı. İskoçya'daki üreticiyi aradı; bu viski gerçekten de kiraz ağacından yapılmış fıçılarda yıllandırılmıştı.

AKM, tarama sonda mikroskopları (TSM) denen cihazlar topluluğunun en yaygın üyesidir. TSM'ler, nanoölçekteki maddenin ölçümü ve işlenmesini Feynman'ın ünlü konuşmasından bu yana icat edilmiş diğer bütün aletlerden daha fazla değiştirmiştir. İlk TSM, 1982'de Zurich, İsviçre'deki IBM laboratuvarında Gerd Binnig, Christoph Gerber ve Heinrich Rohrer tarafından icat edilen tarama tünelleme mikroskobudur (TTM). Bu yeni cihazın tek tek atomları görüntüleyebilme ve onların elektriksel özelliklerini ölçebilme becerisi o kadar müthişti ki Binnig ve Rohrer, icatları nedeniyle 1986'da Nobel Ödülü kazandılar.

TSM'lerin altında yatan çalışma ilkeleri şaşırtıcı derecede basittir. Alışılmış mikroskoplarda olacağı üzere bir nesneden gelen ışığı tespit etmek yerine TSM'ler yüzeyi sivri bir sonda yardımıyla "hissederler". TSM'nin yüzeyi hissetme biçimi, sondanın doğasına bağlıdır: Bir TTM'de mikroskop, sonda (sivri, metal bir iğne) ile iletken bir yüzey arasındaki "tünelleme akımı"nı hisseder. Saf bir kuantum mekanik etki olan tünelleme, bir elektronun klasik fiziğe göre geçememesi gereken bir enerji engelini aşabilmesidir. TTM'de bu enerji engeli, sonda ile görüntülediği yüzey arasındaki boşluktan oluşur. TTM tarafından ölçülen tünelleme akımı, engelin genişliğine (sonda ile yüzey arasındaki uzaklık) ve örnekteki elektron

miktarına bağlıdır. Tünelleme akımının bir örneğin yüzeyi boyunca ölçülmesi yüzeyde değişen yükseltilerin veya değişen elektron yoğunluğunun haritasını ya da ikisini birden verir. Tünelleme, tünel engelinin genişliğine o denli bağlıdır ki sondanın, yüzeyden nanometrenin onda biri kadar uzaklaştığı her seferde tünel akımı on kat azalır! Bu uç hassasiyet, TTM'nin tek tek atomların görüntüsünü elde etmesine olanak tanır.

TTM ile elde edilen görüntüler, bir yüzey üzerinde değişen yüksekliklerde kıvrımlar ve değişen elektron yoğunluklarından (atomlar etrafında değişiklik gösterirler) oluşur. Ne var ki, hepsi bu kadar değil. Sonda ucu ile yüzeydeki atomlar arasındaki kuvvetler önemli bir rol oynarlar. Bu, TTM'nin icadından kısa süre sonra dünyanın dört bir yanındaki hevesli bilim insanları bir dolu değişik yüzeye bakmak için kendi TTM'lerini inşa ettiklerinde açıkça ortaya çıkmaya başlamıştı. Bazı yüzeylerde elde edilen görüntüler, yalnızca engel genişliği ve elektron yoğunluğunu hesaba katan kuramsal öngörülerle uyuşmuyordu. Örneğin bir araştırma ekibi, bazı yüzeylerde kuvvetlerin çok büyük olmasından dolayı cihazın uzaklık ayarlarının şaştığını fark etmişti. Bu sorun, ikinci ve şu anda en çok tutulan tarama sonda mikroskobunun icadını getirdi: AKM.

Oxford'un Beyleri

AKM'nin yaratılmasına esin olan bilim insanı, on beş yıl sonra benim doktora sonrası araştırma danışmanım olan, Oxford Üniversitesi'nden John Pethica idi. Gerber, onun AKM'nin manevi babası olduğunu söyler. (Bu da bilimsel soyağacına göre beni AKM'nin manevi babasının yeğeni yapar ki muhtemelen çok da hava atılacak bir durum değildir.) Oxford'da arkadaşlarım Steve Jeffery, Ralph Grimble, Ahmet Oral, Özgür

Özer, Chandra Ramanujan ve ben, John Pethica'nın cömert, ilham verici ve kasten fazla müdahaleci olmayan rehberliği altında yenilikçi bilim insanları olmayı öğrendik. TTM'ler ve AKM'ler inşa ettik ve kullandık (aslında ikisini birleştirdik) ve kristal yüzeyler üzerindeki atomların ve sıvıların içindeki moleküllerin nanomekaniklerini ölçtük. Güzel günlerdi.

John, anlaşması kolay bir insan ama katı bir bilim insanıdır. Mülakat için Oxford'a gittiğimde, otelde içinde yönergeler olan bir zarf beni bekliyordu. John, zarfa "Dr. Peter Hoffmann, Bey" yazmıştı. Ben bir Bey olduğumu bilmiyordum; ama bu, John'un herkese (iş arayan mütevazı bir doktora sonrası araştırmacıya bile) olan saygısını gösteriyordu. Eşimle birlikte birkaç ay sonra nihayet oraya gittiğimizde yazın başıydı. John'un yalnızca bir dolu yeni fikirle yeniden belirmek üzere uzun zaman ortadan kaybolması alışılagelmiş bir durumdu. John'un gizemli yaz seyahatlerinden dönmesinin ardından onunla, bir süre sonra olağan olduklarını anladığım konuşmalar yapardım. Bu konuşmalarda her zaman yeni fikirler, bağlantılar ve son dönemde çıkmış yayınlardan söz edilirdi. John'u dinlerken çoğu zaman söz ettiği makalelere bakmak üzere çalışma odama koşana kadar kafa sallamak ve "hı-hı, evet, hımm" demekle yetinirdim.

John özellikle atomun gürültülü ama tersinir dünyasından, büyük ölçekli nesnelerin daha düzenli ama çoğunlukla tersinmez dünyasına geçişi nasıl yaptığımızla ilgilenir; bu ilgi alanı bana da miras kalmıştır. Bir deneyde, salınan ATM ucunun bir yüzey üzerindeki gelişi güzel salınan atomlar ile etkileşime geçince deneyimlediği enerji kaybını, *atom-ölçeğinde enerji yitimi* dediğimiz bir süreçle, ölçtük. Az sayıda atomun katılımında, atomların hareketleri yapısal olarak tersinir görünüyordu. Ucu her alçalttığımızda aynı kuvvet eğrisini ölçtük. Fakat daha sert ittiğimiz zaman eşiği aşarak atomla-

rın kalıcı biçimde yeniden düzenlenmesine geçtik. Çok fazla sayıda atom katıldığında çok fazla sayıda olası düzenlenme oluyordu ve sistem özgün düzenine dönüş yolunu bulamadı. Bu noktada deneyimiz, küçük ölçekten (mikroskobik) büyük ölçeğe (makroskobik) geçmişti.

Göreceğimiz üzere, atomların etkileşimi ve görece büyük sistemlerdeki çok büyük sayılarda olası düzenlenmeleri ile birlikte gürültüden düzene geçiş de moleküler biyoloji için büyük önem taşır. Canlı hücrelerdeki moleküller gibi küçük, nanoölçekli sistemler; bizim tanıdık, büyük ölçekli dünyamızda karşılaştıklarımızdan çok değişik etkiler ve yasalara tabidirler.

Küçük Şeylerin İnanılmaz Tuhaflığı

Feynman, konuşmasında atom ölçeğinde teknolojinin yaratılmasını savunurken, aynı zamanda yalnızca birkaç atom kullanarak makineler inşa etmenin getirdiği özgün zorluklara da işaret etti. Gerçekten de nanobilim ciddi bir bilim olduğundan beri en ilginç yanı ufak şeylerin değişik fizik yasalarına uyması olmuştur. Bu, bazen sorunlar ve bazen de fırsatlar yaratır ama nanoteknolojiciler için sürekli bir cazibe kaynağı olmuştur.

Sistemler nanoölçeğe küçültüldüğünde büyük ölçekte çok az rol alan ya da hiç almayan etmenler aniden önem kazanır. Ünlü konuşmasında Feynman, bunlardan birkaçını anmıştır: kayganlaştırma sorunu (çünkü herhangi bir kayganlaştırıcının etkin ağdalılığının küçük ölçekte çok daha fazla olacağını tahmin etmişti) ve küçük ölçekte nesnelerin birbirine yapışıp kalmaya daha yatkın olmaları. Bu sorunlar, nanoölçekte yaygın olan iki daha genel etkiden kaynaklanır: maddenin taneliliği ve arayüzler sorunu.

Madde tanelidir; atomlar, moleküller ve daha büyük (küçük kristaller gibi) tanelerden oluşmuştur. Büyük ölçekte, maddenin bu taneliliği ortalamada kaybolur. İstatistiki mekaniğin ve *süreklilik fiziğinin* (süreklilik fiziğinde maddenin parçacıklardan oluştuğu gerçeğini göz ardı ederiz ve onu düzgün bir süreklilik gibi ele alırız) yasalarını izleyerek Young Katsayısı (katı bir maddenin ne ölçüde yaysı olduğunu ifade eder) ya da ağdalılık (bir sıvının akmaya karşı ne kadar direnç sergilediği) gibi ortalama değerleri belirleyebiliriz. Ama sistemin büyüklüğünü yalnızca birkaç tane, on ya da yüz moleküle indirgediğimizde bu ortalama değerler anlamsız hale gelir ve mekanik ya da elektriksel özelliklere ait ölçümler düzgün, ortalanmış değişimler yerine sıçramalar sergiler. Benim laboratuvarımda su gibi basit sıvıların taneliliğini ölçüyoruz. Suyun mekanik özelliklerini ölçerken bir kova dolusu veya bir şırıngada birkaç santimetre küp su almam fark etmez. Bir santimetre küp suda 3×10^{22} su molekülü bulunur (ardında 22 tane sıfır bulunan bir 3'tür bu). Böylesine devasa sayıda moleküle birkaç milyon ya da milyar molekül ekleyip çıkartmak sıvının ortalama özelliklerini değiştirmeyecektir. Ne var ki, bizim laboratuvarımızda çok daha düşük sayıdaki su moleküllerinin mekanik özelliklerini ölçebiliyoruz. ATM ucu ile yüzey arasındaki suyu tek bir molekül kalınlığına inene kadar sıkıştırabiliyoruz (ne var ki, ucun yaklaşık 50 nanometreye 50 nanometre bir yüzeyi olduğundan ucun altındaki tek molekül kalınlığındaki katman yaklaşık 25.000 molekül barındırır). Şimdi, tek kat molekülden oluşan katmanların eklenip çıkarılması sıvının mekanik özelliklerinde çok büyük fark yaratır. Sonuç olarak bir katmanı 6 molekül kalınlığından 5 molekül kalınlığına ve sonra 5'ten 4'e... bastırırsak, katmanların katılığı ve görünür ağdalılığı yüksek ve düşük değerler arasında gidip gelir.

Bu deneyler aynı zamanda Feynman'ın değindiği diğer nanoölçek sorununu da ortaya koyar. Bir şeyi küçülttüğümüzde, yüzeyinin hacmine oranı büyür. Bir golf topunun yüzeyinin hacmine oranı, bir bowling topununkinden büyüktür. Nanoölçeğe küçültüldüğünde bu oran daha da uç olacaktır. Hacimler küçüldükçe yüzeyler baskın gelmeye başlar ve büyük ölçekte önemli olan kuvvetler nanoölçekte ilgisiz hale gelirler; tersi de doğrudur. Büyük ölçekte, kütle çekimi ve eylemsizlik gibi kütle ile ilgili kuvvetler baskındır. Yapışkanlık gibi yüzey kuvvetleri genelde (tutkal örneğindeki gibi özellikle tasarlandıkları haller hariç) önemsizdir. Örneğin bir beyzbol oyununda eylemsizlik (sopa, topa vurduğunda) ve kütle çekimi (top tekrar aşağı gelirken) baskındır. Ama beyzbol topu olağan olarak sopaya yapışmaz. Oysa bir nano-beyzbol oyununda, topun neredeyse hiç ağırlığı olmadığından eylemsizlik önemsiz olurdu. Keza kütle çekimi de öyle. Ama nano-beyzbol topunun ufacık cüssesine kıyasla görece geniş yüzey alanı, onun nano-sopadan ayrılmasını zorlaştırırdı. Bu, nanoölçekteki sistemlerin özgün bir özelliğine örnektir: sistemin büyüklüğüne bağlı olarak davranıştaki köklü değişim.

Tabii ki, nanoölçekteki her şey birbirine yapışıp kalmaz. Öyle olsa, başımız belaya girerdi. Hücresel öğelerimizin gerektiği zaman yapışması, gerektiği zaman ayrılabilmesi şarttır. Bu, moleküller ile onları çevreleyen tuzlu su arasındaki ölçülü bir denge sayesinde başarılır. Boşlukta, suyun yokluğunda, çoğu yüzey basitçe yapışma eğilimindedir.

Nanoölçekte, Feynman'ın anmadığı bazı özgün haller de vardır: kuantum-mekanik etkiler, ısıl gürültünün önemi ve entropi, ortaklı dinamik, ilgili zaman ölçülerinin geniş yelpazesi ve enerji ölçeklerinin çakışması. Bir dizi göz korkutucu, tuhaf özellik. Bu özgünlükleri kalan kısımda değişik örneklerle ele alacağız.

Kuantum-Mekanik Etkiler

Nanoteknoloji ile ilgili çoğu kitap, atom ölçeğinde karşılaştığımız tuhaf kuantum-mekanik etkilere odaklanır. Bunların bazılarına, tünelleme tartışmasında üstü kapalı olarak değindim. Gerçekten de nanoteknolojinin büyük bir kısmı yeni kuantum-mekanik etkilere dayanır. Ne var ki, bunların moleküler biyolojiyle neredeyse hiçbir ilgisi yoktur. Özünde, moleküler biyolojinin tamamı klasik fizik kullanılarak açıklanabilir (atomların bağ yapması haricinde; o, kuantum mekaniği gerektirir). Nano sistemlerdeki daha ilginç kuantum-mekanik etkilerin çoğu ısıl hareket tarafından tamamen yok edilir. Bu nedenle kuantum bilgisayarı, dönüş elektroniği (spintronics) ya da başka çok tutulan yeni kuantum elektroniği üzerine araştırmalar düşük sıcaklıklarda, herhangi bir canlı sistem için çok düşük olan sıcaklıklarda yapılır.

Isıl Gürültü

Buna karşın, geçtiğimiz kısımda da tartışılmış olan ısıl hareket (ya da fizikçilerin dediği gibi ısıl gürültü) biyolojide ve oda sıcaklığı nanoteknolojisinin çoğunda büyük öneme sahiptir. Büyüklüğe bağlı olma, ortaklı dinamik, zaman ölçüleri (ki çok yakın ilişkilidirler) ve enerji ölçeklerinin çakışması ile ilgili sorular da öyledir. Bunların ne olduğunu ve nanoölçekteki sistemleri nasıl etkilediklerini anlamak için gelin önemli olan soruyu ele alalım: Bir şeyleri nanoölçekte nasıl üretebiliriz?

Kendine Çeki Düzen Ver!

Feynman, elektron ya da iyon ışınları kullanarak büyük ölçekli bir kalıbı küçük bir desene dönüştüren bir çeşit küçültücü teknoloji ile (şimdi, elekrton-ışını yazıcıları ya da odaklan-

mış-iyon ışınları denen cihazlarla gerçekleştirilmiştir) veya nanoölçeğe erişene kadar sonsuza değin kendilerinin daha küçük örneklerini yapan makineler inşa ederek (bu henüz gerçekleşmedi) nanoölçekli makinelerin ya da yapıların bir araya getirilebileceğine inanıyordu. Bu yaklaşımların ikisi de tepeden aşağı olarak tanımlanabilir: Büyük bir kalıp ya da makine ile başlayıp onu nanoölçeğe küçültürler.

Bu tepeden aşağı yaklaşım bilgisayar belleği ya da işlemciler gibi elektronik aletlerin inşasında halen kullanılmaktadır. Ne var ki, yaşam değişik işler: Bitkiler, hayvanlar ve tüm diğer canlılar tabandan yukarı inşa edilmiştir. Her birimiz atom atom, molekül molekül bir araya geldik.

İnsanların sıkça duyduğu yanılgılardan biri, DNA'mızın bir insan üretmek için gerekli bütün bilgiyi taşıdığıdır. Boş laf! DNA'mızda saklanan bilgi baş döndürücü miktardadır ama her bir molekülün ya da hücrenin konumunu ve hatta bir organın biçimini belirlemek için bile yeterli değildir. DNA, bir inşa planından ziyade bir yemek tarifine benzer.

Kek pişirdiğimde, her bir nişasta ya da şeker molekülünün nereye gideceğini belirtmem gerekmez. Yalnızca yönergeleri izlerim ve moleküller gitmeleri gereken yere giderler. Kek ya da insan yapmak için gereken bilginin çoğu fizik ve kimyanın kanunlarında saklıdır. Moleküller, kendilerini nasıl bir araya getireceklerini "bilirler".

Moleküllerin bu kendini bir araya getirme özelliği doğada genel geçer bir durumdur ve nanobilimde ana bir araştırma alanıdır. Molekülleri istediğimiz herhangi bir yapıyı oluşturacak şekilde kendilerini düzenlemeleri için ikna edebilseydik (tıpkı canlılarda gördüğümüz gibi) yeni cihazları milyon dolarlık iyon ve elektron-ışını yazıcıları olmadan inanılmaz derecede ucuza üretebilirdik. Basitçe her şeyi bir tencereye koyup karıştırabilirdik. Ama açıkça görülüyor ki durum bu kadar basit değil.

Eski lisansüstü öğrencilerimden Venkatesh Subba-Rao şu anısını anlatmaktan hoşlanıyordu: Bir defasında misafir bir bilim insanının sıvı kristallerin içindeki yapılarla ilgili bir konuşmasını dinlemişti. Venkatesh, konuşmacıya bu yapıların ortaya çıkma nedenini sorduğunda, "Serbest enerjiyi en aza indirirler!" yanıtını almıştı. O zamandan beri öğrencilerime deneylerinde şu ya da bu neden oldu diye sorduğumda eğer doğru yanıtı bilmiyorlarsa yedekte tuttukları bu yanıtı verirler. Bu çoğu zaman doğrudur. Neredeyse "çünkü Tanrı öyle yarattı" demenin bilimsel karşılığıdır. Daha yararlı bir yanıt bir sistemin serbest enerjisini oluşturan enerji çeşitlerini içerirdi. Daha da yararlı bir yanıt moleküllerin etrafta nasıl hareket ettiğini ve sistem serbest enerjisini en aza indirirken enerjinin nasıl dönüştürüldüğünü açıklardı. Hatırlayalım, serbest enerji sistemin *toplam* enerjisi ile *kullanılamayan* ısıl enerjinin arasındaki fark; enerjinin kalan *kullanılabilir*, serbest kısmıdır. Kullanılamayan enerji, sıcaklık ile entropinin çarpımıdır. Serbest enerjiyi en aza indirdiğimizde ya toplam enerjiyi azaltır veya kullanılabilir enerji miktarını artırırız ya da her ikisi birden. Kendini bir araya getirme durumunda bu olasılıkların tamamı oyuna dahil olur.

Kendini bir araya getirmenin en tanıdık ve en çarpıcı örneklerinden biri daha önce de söz ettiğimiz kar taneleridir. Kar taneleri, su buzu kristalleridir. Öğrencilerime kar kristallerinin neden oluştuğunu soracak olursanız "serbest enerjiyi en aza indirmek için" yanıtını verirler! Ve gerçekten de 3. Bölüm'de gördüğümüz gibi, altına inildiğinde serbest enerjiyi düşürmenin kar tanelerine yol açacağı bir kırılma sıcaklığı vardır; bu sıcaklığın üstündeyken ise su sıvı halde kaldığında serbest enerji en düşüktür. Fakat daha fazla bilgi edinmek isteriz. Kar taneleri gibi son derece güzel, incelikli yapıların ortaya çıkışını yalnızca serbest enerjinin düşürülmesiyle açık-

lamak kulağa oyunbozanlık gibi geliyor. Sonuçta sebep serbest enerjideki düşüş; ama bu nasıl gerçekleşiyor? Yapı nasıl oluşuyor?

Kar tanelerinin oluşumu, şans ile gerekliliğin, entropi ile enerjinin bir araya gelişinin en güzel örneğidir. Kar tanelerinin altı-kenarlı simetrisi, su buzunun altta yatan moleküler simetrisinin büyük ölçekli bir temsilidir. Su molekülleri kendilerini, üç boyutlu bir yapboz gibi, altıgen bir desende düzenlemekten hoşlanırlar. Nem, sıcaklık ve basınçtaki çevresel değişimler kristalin gelişimini etkileyip değişik dallanma desenlerine yol açar. Büyüyen kristalin altı kenarından her biri herhangi bir anda aynı koşullara maruz kaldığından aşağı yukarı (ama tamı tamına değil) aynı desende gelişerek bir kar tanesinin o güzel simetrisini ortaya çıkarır.

Bir kar tanesinin gelişimi, karmaşıklık ve güzelliğin, soğuk fizik ilkelerinden (cinas amaçlanmamıştır) nasıl doğabileceğini gösterir. Donmaya bir ısı salınımı eşlik eder. Suyun donmasına izin vermek için bu ısının uzaklaştırılması gerekir (bu da çevrenin entropisini artırır). Bu yüzden buz kristalleri, ısının en hızlı uzaklaştırıldığı yerlerde yani sivri uçlu yapıların uç noktalarında en hızlı biçimde oluşacaktır. Ne var ki, sivri uçlar zaten hızlı oluşmanın sonucudur. Bu, olumlu geri beslemeye neden olur: Bir kristalin üzerinde en hızlı oluşan konumlar sivrilir; bu da, bu konumlardan daha iyi ısı aktarımına olanak tanır; bu da, onların daha hızlı oluşmasına neden olur... Sonuç, fizikçilerin kararsızlık dedikleri şeydir ve uzun, sivri yapıların oluşmasına yol açar. Ama bir de karşı kuvvet vardır: Yerel sıcaklık da kristalin sivriliğine bağlıdır; daha sivri kısımlar (daha yüksek eğriliğe sahip olanlar) daha düşük derecelerde eriyerek sivri kısımlar ile çevre arasındaki sıcaklık farkını azaltırlar. Sıcaklık farkındaki bu azalma, ısı aktarımını yavaşlatarak sivri uçların açıkta olmasından do-

ğan etkiye karşı koyar. Bir sivri uç çok inceldiğinde büyüme yavaşlar; bu, olumlu geri beslemeye karşı koyan olumsuz bir geri beslemedir. Bu olduğunda kristal dallanır. Bu iki eğilimin, sivrilme ve dallanmanın birleşimi kar tanelerinin ağaçsı oluşumuna yol açar.

Kar kristalinin oluşumunun bir diğer önemli yönü ise *kütle aktarımı*'dır; yeni su molekülleri büyüyen kristale kütle aktarımıyla ulaşır ve onun bir parçası haline gelir. Bu, çoğunlukla bir yayınımın (difüzyon), su moleküllerinin bulutların buharındaki gelişigüzel hareketlerinin sonucudur. Bir kristal ancak su moleküllerinin kendisine ulaşabildiği hızda büyüyebilir. Kristalin büyümesi, *yayınımla sınırlı*'dır. Fizikçiler bu gibi büyümelere yayınımla sınırlı kümelenme adını veriyorlar. Yine, kristalin çıkıntılı kısımları gelişigüzel yayınım ile ulaşılması en kolay olan yerleridir (yıldırımsavarları düşünün; bir yıldırım, gelişigüzel hareketleri ile en kolay onlara ulaşır); bu da kararsızlığı artırır.

Basit bir kar tanesi nasıl da karmaşıktır! Kar tanesi örneği enerji, entropi ve çeşitli süreçlerin (yayınım, ısı aktarımı) etkileşimlerinin altta yatan geometri ile birlikte nasıl karmaşıklık ve çeşitlilik ama bir yandan da yapıda belirli bir sağlamlık yaratabileceğini gösterir. Kar taneleri canlı değildir; ama canlılarda karşılaşılana benzer karmaşık yapı oluşumunun dinamik fizik yasalarından doğabileceğini göstermeye yararlar. Dahası, kar taneleri hem tekrarlanan (bütün kar taneleri altı-kenarlı, çıkıntılı ve dallıdır) hem de bu basit desen içinde neredeyse sınırsız çeşitlilik sergileyen cansız yapı örnekleridir.

Nanoteknoloji uzmanları, gitgide daha karmaşık nano yapılar yaratmak için benzer ilkeleri kullanır. Nihai hedef kendilerini molekül molekül geliştiren devreler ya da nanoölçekli makineler tasarlamaktır. Kendini bir araya getirmenin en basit örneği küresel parçacıklar bir yüzeye bırakıldığında

gerçekleşir. Eğer aralarında bir çekim kuvveti ve yerleşecek güzel bir yer (genelde bir ya da daha fazla komşularının olduğu bir yer) bulana kadar hareket etmelerinin bir yolu varsa, kaçınılmaz bir biçimde sıkı-düzenli katmanlar oluştururlar. Sıkı-düzenli bir katman, istiflenmiş portakallara benzer: (eşit büyüklükte) portakalları birbirlerine değecek biçimde yan yana dizin; sıkı-düzenli, altıgen bir katman elde edersiniz. Bu, doğada en sık bulunan yapıdır (bal peteği buna iyi bir örnektir) çünkü komşularla teması en yüksek düzeye çıkarır ve boşa harcanan alanı en düşük düzeyde tutar.

Ama altıgen sıkı-düzen hemen bıkkınlık verir. Daha karmaşık yapılar üretmek istiyorsak, daha karmaşık yapıtaşları ve bu yapıtaşlarını bir araya getirmenin daha yenilikçi yolları ile yola çıkmamız gerekir. Moleküler yapıtaşlarını karmaşık yapılar oluşturmaya razı etmenin çeşitli yolları vardır. Diğer moleküllere yalnızca belli bağlanma noktalarından eklenen tuhaf biçimli moleküller kullanın (kimyacılar buna yönlü bağlanma der) veya yapının belli bir biçimde oluşmasını kayıran denge-dışı koşullar kullanın (mesela elektrik akımı, basınç ya da bir sıvı akışı uygulayın) ya da bırakın entropi size bir yardım eli uzatsın.

Hadi İşbirliği Yapalım

Mayonez sağlığa zararlıdır; ama ekmek arası yiyeceklere pek bir yakışır. Birbirlerine karışmadıklarını bildiğimiz maddeler olan su ve yağ içerse de, dikkate değer biçimde kararlı ve tekdüzedir. Eğer mayonez yaptıysanız (ben bir sefer denedim ama yenecek gibi olmadı) mayonezin sırrının yapımında yumurta sarısı kullanılması olduğunu bilirsiniz. Ama yumurta aksi halde kararsız bir yağ ve su karışımını neden kararlı hale getirsin ki?

Yumurta sarılarının çoğu sudur; bununla birlikte biraz protein ve önemli bir miktar da yağ içerirler. Yağ kısmı, yağ asitleri (sıvı yağlar), lipitler ve diğer bileşiklerden oluşur. Lipit moleküllerinin iki önemli parçası vardır: tuzdan oluşan bir *baş* (suda çözünür ya da suseverdir) ve yağ asidinden oluşan bir *kuyruk* (suda çözünmez ya da susevmezdir). Bu moleküller adeta değişik ilgi alanlarına sahip yapışık ikizler gibidir. Lipitler yağ ve su karışımında bölünmüş kişiliklerinin her kısmını tatmin edebilirler. Susever baş suya doğru uzanırken susevmez kuyruk kendisini yağa gömebilir. Lipitler böyle çiftsever (yani hem suda *hem de* yağda çözünen) moleküllerden yalnızca biridir. Diğerleri deterjanlar, sabunlar ve yüzey temizleyicilerdir. Bu malzemeler çift çözünürlükleri sayesinde yağlı, kaygan şeyleri suda çözünür kılarlar ve kirli tabaklarımızı yıkayabilmemizi sağlarlar.

Bu, kulağa hoş geliyor; ama bir sorun var: Yağ ve su molekülleri sürekli olarak moleküler fırtına tarafından itilip kakılıyorlar. Yağ ile su yeniden karışana kadar talihsiz lipit ya da deterjan molekülünün ikiye bölünmüş eğilimlerinin tadını çıkarmak için kısa bir zamanı vardır. Bu moleküller, bu sorunun üstesinden nasıl gelirler? Birlikten kuvvet doğururlar. Yeterli sayılarda bir araya geldiklerinde kararlı yapılar oluşturabilirler; bunlardan biri yağ damlacıklarını tamamen sarmalayan ve yağı kalıcı bir biçimde çevredeki sudan ayıran küresel koruyucu kalkanlardır (*misel*). Miseller çok çok fazla sayıda lipit moleküllerinden oluşurlar. Bu yapılar, birbirlerinin can düşmanı olan yağ ile suyu ayrı tutarken lipitlerin çelişkili susever-susevmez eğilimlerini tatmin etmelerine olanak tanırlar. Bu düzenleme ile gelen serbest enerji düşüşü o denli büyüktür ki moleküler fırtınanın ısıl hareketi miselleri parçalamak için çok zayıf kalır. Yağ ve su asıltısı kararlı hale gelmiştir. Ve işte mayonez bu nedenle ayrışmaz.

Miseller yağın bulunmadığı hallerde de oluşabilirler. Tek bir çiftsever molekülü suya bırakırsak, susevmez kuyruğunu suya maruz bırakmaktan başka bir seçeneği olmaz. Ne var ki, yeter sayıda molekül olursa miseller, başka bir deyişle dış katmanı susever başlardan ve iç çekirdekleri susevmez kuyruklardan oluşan küreler oluşturabilirler. Susevmez kuyrukların güvenli bir biçimde saklı olduğu bu düzenleme serbest enerjiyi kayda değer miktarda azaltır. Böyle misellerin oluşumu, ortaklı dinamiğin oturmuş bir örneğidir. Ortaklı dinamik ya da pekişim, canlı sistemlerde yapı oluşumunda önemli bir paya sahiptir. Özetle pekişim, belirli bir sayıda molekül birlikte çalışmadıkça bir yapının oluşamaması anlamına gelir. Misellerde bu, bir miselin oluşması için gerekli asgari bir lipit sayısı olduğu anlamına gelir. Susevmez kuyruklardan oluşan sıkı-düzen bir çekirdeğe sahip bütün bir küre oluşturmak için belli sayıda molekül gerekir. Yeterinden az molekülle kapalı bir küre oluşturamazsınız. Çok fazla molekül olursa küre çok büyük hale gelir ve merkezde bir boşluk oluşur; bu da enerjiye mal olur. Bu yüzden, her miselde en uygun sayıda lipit bulunur.

Küresel bir miselin aşama aşama nasıl oluşabileceğini düşleyin. İlkin, iki çiftsever molekül buluşur ve susevmez kuyruklarını birbirlerine dönerler. Sonra, bir üçüncüsü bunlara eklenir ve moleküller kapalı bir küre oluşturana kadar böyle sürer. Ama gerçekte olanın bununla ilgisi yoktur. Ölçümler, bir çözeltide asgari bir molekül yoğunluğunun altında hiç misel oluşmadığını göstermektedir. Moleküller, yalnız kalpleri oynarlar. Ne var ki, daha fazla lipit eklendikçe birdenbire tamamlanmış miseller oluşmaya başlar. Bu, neden böyledir? Miseller aşama aşama oluşmazlar. Bunun yerine, kritik misel yoğunluğuna erişildiğinde doğru sayıda molekülün kendiliğinden buluşma olasılığı, süreçte kısmen bir araya gelmiş

miseller olmaksızın tamamlanmış, kararlı misellerin birdenbire oluşmasına olanak sağlayacak kadar büyük bir hale gelir. Misel oluşumu bir ya hep ya hiç önermesidir. Ya yeterince lipit molekülü aynı yerde buluşur ve ortaklaşa bir misel oluştururlar ya da hiç misel oluşmaz. Kurallara uygun bir futbol karşılaşması gibidir: ya (başlangıçta) sahaya yirmi iki oyuncu çıkar ya da bir karşılaşma olmaz.

Bu ya hep ya hiç dinamiğinin bir sonucu olarak kritik yoğunluğa ulaştığında bir lipit çözeltisinin özelliklerinde çok ani bir değişim gerçekleşmesidir. Bu özelliklerden biri *geçişim basıncıdır*; yani çözünmüş moleküllerin gelişigüzel hareketlerine bağlı olarak bir duvara uygulanan basınç (hatırlayalım, basınç yalnızca gelişigüzel hareket eden moleküllerin bir duvarla olan bütün çarpışmalarının toplamıdır). Brown hareketi üzerine ünlü makalelerinde Einstein, geçişim basıncının çözeltideki moleküllerin ya da taneciklerin büyüklüklerine değil de yalnızca yoğunluklarına ve sıcaklıklarına bağlı olduğunu göstermişti. Bu bakımdan, çok sayıda bağımsız molekülden bir anda miseller oluştuğunda bir çözeltideki toplam tanecik sayısı büyük ölçüde azalır. Önceden çok sayıda yalnız lipit olduğu yerde şimdi sadece birkaç misel vardır ve her bir misel yalnızca bir tanecik eder. Çözeltideki serbest taneciklerin sayısındaki bu düşüş geçişim basıncında ani bir azalmaya yol açar. Bu denli ani, ya hep ya hiç geçişler moleküler pekişimin imzasıdır.

Pekişim, bazı yapıların sadece asgari sayıda molekül ortaklaştığında oluştuğu gözlemi, biyolojide genel geçer bir durumdur. Moleküller, insanlar gibi ortaklaşmazlar. Sonuçta onlar moleküldürler. Moleküller, moleküler fırtına tarafından gelişigüzel oradan oraya savrulurlar. Örneğin, eğer lipitler bir misel oluşturabilirlerse serbest enerjilerini çok büyük ölçüde azaltacaklardır. Eğer yoğunluk çok düşükse, asla yeterince

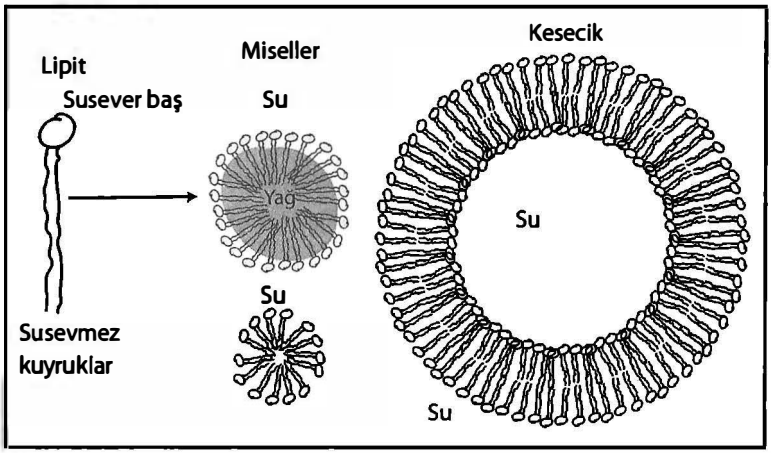
molekülü aynı yerde bir araya getiremezsiniz. Ama kritik bir yoğunlukta, çevrede yeterince molekül varken, birbirlerini yeterli sayılarda bulurlar ve miseller kendiliğinden oluşur.

Lipitler, suda daha karmaşık ortaklaşa yapılar da oluştururlar: kesecik denen çift duvarlı küreler. Çift duvarın içinde susevmez kuyruklar güvenli bir biçimde saklanırken biri kürenin dışında, diğeri içinde kalan iki yüzey su moleküllerine bakar (Şekil 4.1). Bir kesecik, bir su kütlesini diğerinden ayırır. Keseciğin içine değişik kimyasallar koyarsak yalıtılmış, nanoölçekli bir tepkime odası yaratmış oluruz. Bu ufacık odanın içinde her türlü ilginç şey olabilir: örneğin, yaşam. Gerçekten de canlı hücreleri çevreleyen duvarlar lipitlerden oluşur; canlı bir hücre bir bakıma içinde bol miktarda cidden karmaşık kimyasal işlemler olup biten, kendini bir araya getirmiş dev bir keseciktir.

Entropik Kuvvet

Nanoölçekte, moleküler fırtınanın borusu öter. Fakat fırtınanın gelişigüzel ısıl kuvvetleri çelişkili bir biçimde düzenli yapıların ortaya çıkmasına yol açar. İşin aslı, o olmasaydı hiçbir şey gerçekleşmezdi! Kendini bir araya getirme, yapıyı oluşturan parçaların serbest enerjilerini en aza indirecekleri rahat bir dinlenme yeri bulana kadar ortada dolaşmalarını gerektirir. 3. Bölüm'de de gördüğümüz üzere, yapılar bazen gelişigüzel hareketi olası en yüksek değerde tutmak, yani entropiyi en yukarıda tutmak için oluşurlar.

Hücreler; büyük proteinler, DNA ve RNA molekülleri, şekerler, lipitler, iyonlar ve sayısız su molekülü ile tıka basa dolu inanılmaz derecede kalabalık yerlerdir. Canlı hücrelerde proteinlerin arasındaki ortalama uzaklığın on nanometreden az olduğu kestirilmiştir. Proteinler on ile yüz nanometre



Şekil 4.1. Lipitler bir susever baş ve iki susevmez kuyruk içeren çift-sever moleküllerdir. Su ve yağdan oluşan bir karışımda, lipitler küçük yağ damlacıklarını çevreleyip miseller oluşturabilirler. Lipitler, yağın yokluğunda da miseller oluşturabilirler; ama ancak belli sayıda lipit bir araya gelerek küresel bir kabuk oluştururlarsa. Bu, pekişime örnektir. Ne var ki, çoğunlukla lipitler kesecikler oluşturmayı yeğlerler; bunlar çift kat lipitten meydana gelen, bir su kütlesini diğerinden ayıran yapılardır. Kesecikler hücre zarlarının temelini oluştururlar ve hücre içinde kimyasalları bir yerden bir yere taşımak için kullanılırlar.

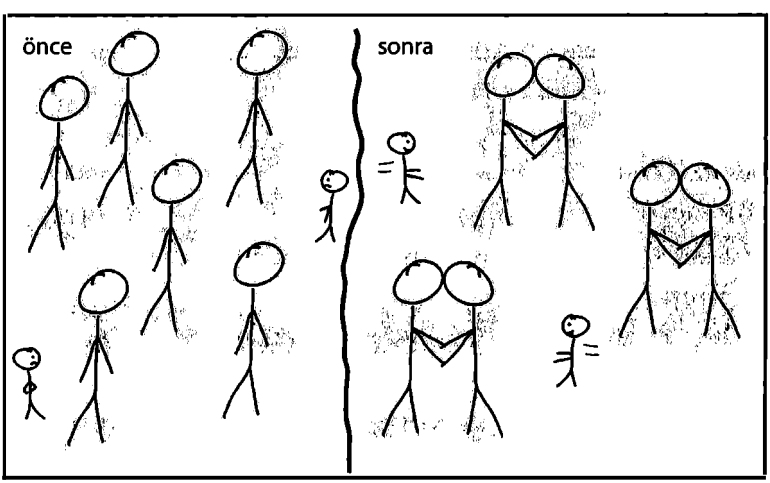
arasında büyüklüklere sahip olduğundan bu, her iki arabanın arasında otuz santim ya da daha az boşluk olan kalabalık bir park alanına benzer. Ortam bu kadar sıkışık olduğunda birbirinin etrafından geçerek hareket etmek zorlaşır. Bu kalabalığın üstüne bir de proteinlerin arasındaki her boşluk su, iyonlar, şekerler ve çeşitli diğer moleküllerle doludur. Artık hücrenin nasıl bir kalabalık karmaşa olduğuna dair bir fikriniz oldu. Bu kalabalıklaşmanın, çoğu iyi anlaşılmamış sonuçları vardır çünkü proteinler üzerinde yaptığımız deneylerin basamakları genelde hücre dışında, proteinlerin bolca açıklığa sahip olduğu bir deney tüpünde gerçekleştirilir.

Kalabalıklaşmanın beklenmedik bir sonucu, ufaklıkların (su, iyonlar) iri kıyımlara (proteinler, DNA, lipit kesecikleri) baskın gelmeleridir. İki büyük protein molekülünün daha küçük moleküllerden oluşan bir denizde birbirlerine yaklaştıklarını düşünün. Küçük moleküller sabit büyüklüğe sahip olduklarından büyük moleküllere ancak bir yere kadar yaklaşabilirler. Daha fazla yaklaşacak olsalardı, kendilerini büyük molekülün içine doğru bastırmak zorunda kalırlardı. Bu yüzden her büyük molekül, küçük moleküllerin delemediği bir bölge (buna, tükenim hattı da denir) ile çevrilidir ve bu nedenle küçük moleküllere düşen toplam açıklıkta bir azalmaya neden olurlar. Bir tür moleküler kişisel alan: Büyük molekülleri bir odada ayakta duran her biri kendi kişisel alanına sahip yetişkinler ve küçük molekülleri de ortada koşturan çocuklar olarak düşünün. Yetişkinlerin kişisel alanlarından sakınmak zorunda olduklarından çocukların ortada koşturması zordur. Birden yetişkinler eşleşir ve çiftler birbirine sarılırlar. Önceden kişi başına bir adet olan kişisel alan çift başına bir adet kaynaşmış kişisel alana dönüşmüştür. Birdenbire çocuklara koşturacak daha çok alan çıkmıştır ve yeni özgürlüklerinin tadını hemen çıkarırlar (Şekil 4.2).

Aynısı moleküler dünyamızda da olabilir. İki büyük molekül birbirine yapışırsa yasaklı hatları birleşir ve ufaklıklara daha fazla açıklık kalır. Daha çok açıklık, daha çok mikro-durum ve böylece yükselen entropi demektir. Bu nedenle, büyük moleküllerin bağlanmasından kaynaklı *düzen* artışı, çevredeki daha küçük moleküllere daha fazla hareket alanı tanımaktan ve böylece küçük moleküllerin entropisini artırmaktan doğan *düzensizlik* ile fazlasıyla ödeştirilmiştir. Sonunda elimize azalan enerjiden değil de artan entropiden kaynaklanan bir kuvvet geçmiştir. Yalnızca moleküler ölçekte var olabilen bu gibi tuhaf kuvvetlere entropik kuvvetler denir.

Hücreler kolajen, aktin ve mikrotübül iplikçiklerini de içeren türlü moleküler yapıları bir araya getirmek için bu entropik kuvvetlerden yararlanırlar. Kolajen; hücre dışı ortam denen, bedenlerimizi bir arada tutmaya yarayan hücrelerimizin dışındaki malzeme ağının ana malzemesidir. Aktin ve mikrotübüller hücrelerimizin şekillendirilebilir iskeletini oluşturan ipliklerdir.

Kolajen gibi biyolojik ipliklerin entropik kuvvetler tarafından bir araya getirildiğini nereden biliyoruz? Bir şeyin neden gerçekleştiği sorusuna karşılık cepteki yanıtı hatırlayın: çünkü serbest enerjiyi en aza indirir. Daha önce öğrendiğimiz üzere serbest enerji, enerji eksi kullanılamayan enerjidir.



Şekil 4.2. Eğer büyük moleküller birbirlerinden ayrılırlarsa, yasak bölgeleri küçük moleküllerin etrafta gezinmesini zorlaştırır. Büyük moleküller birbirlerine bağlandıklarında, yasak bölgeleri çakışarak küçük moleküllere daha çok alan yaratır. Bu, küçük moleküllerin entropisini artırır ve bir entropik kuvvetin büyük molekülleri birbirine bağlanmaya itmesine ön ayak olur.

Kullanılamayan enerji, sıcaklık ile entropinin çarpımı ile elde edilir. Sıcaklık resme dahil olduğundan bir araya gelmenin enerjideki azalma tarafından mı yoksa entropideki artış tarafından mı itelendiğini anlamak için görece basit bir deneme yapabiliriz. Eğer sıcaklığı artırdığımızda bir araya gelme daha hızlı ilerliyorsa çoğunlukla enerjideki azalma ile itelenıyor demektir. Diğer yandan, eğer sıcaklığı artırdığımızda bir araya gelme *yavaşlıyorsa* fail entropidir.

Çoğu kimyasal tepkime yüksek sıcaklıklarda daha hızlı ilerler. Buzlu suda şeker ya da tuz çözmeyi deneyin ve daha sonra bu maddeleri sıcak suda çözmeyi deneyin; ne demek istediğimi göreceksiniz. Şeker, sıcak suda soğuğa göre çok daha hızlı çözünerek çözünmesinin enerjideki bir azalma ile itelendiğini gösterir. Kolajenin kendini bir araya getirmesinde ise sıcaklık artırıldığında tepkime *yavaşlar*. Kolajen oluşumu sırasında tek tek kolajen yapıtaşları, iplikleri oluşturmak için birleştiklerinde aslında toplam enerji (E) *artar*. Sistemin enerjisinin arttığı süreçler tercih edilmemelidir. Ama aynı zamanda entropi (S) de artar. Entropideki bu artış serbest enerjide toplamda bir düşüşe yol açarak ($F = E - TS$) gereken kozdan fazlasını sağlar çünkü entropi öğesi (TS) enerjiden çıkarılır.

Bunun gibi entropi tarafından ilerletilen kendini bir araya getirme süreçlerine pek çok biyolojik örnek verilebilir. Kolajene ek olarak aktin ve mikrotübüller, virüslerin ve bakterilerdeki kamçının kendilerini bir araya getirmeleri entropi tarafından ilerletilir. Bu örnekler, entropiyi artırırken düzen yaratılabileceğini gösterir. Entropi, daha önce de değindiğimiz üzere, sıklıkla kafa karıştırıcı bir biçimde düzensizlik ile bir tutulur. Hoş, bir tür düzensizlik olduğu *doğrudur*; ama bu denli basitleştirilmiş bir resimde sistemin bir kısmında düzensizlik yaratılmasının başka bir kısmında düzen yaratılma-

sıyla eşlenebileceğini göz ardı etmiş oluruz. İsterseniz bir kar tanesine sorabilirsiniz.

Senden Nefret Ediyorum; Seni Seviyorum

Sabunlar, deterjanlar ve lipitler bir adet susever ve bir adet susevmez ucu olan doğrusal moleküllere örnektirler. Ama en başta molekülleri susever ya da susevmez yapan nedir ki?

Yağ ile suyun birbirine karışmadığını biliyoruz (yumurta eklemediğiniz sürece). Neden? Su, evrendeki diğer bütün sıvılardan epey farklı, kendine özgü bir sıvıdır. Örneğin benzer moleküler yapıdaki diğer sıvılarla karşılaştırıldığında suyun erimesi ya da kaynaması için çok daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılması gerekir. Aynı zamanda katı halinin (buz) sıvı halinden hafif olması gibi nadir bir özelliğe sahiptir; buz parçaları bu nedenle içkinizin içinde dibe batmaktansa yüzer. Diğer çoğu madde için tersi doğrudur: Sıvısı, katısından hafiftir. Gözde sıvımızın tüm bu tuhaf özellikleri temelde hidrojen bağlarından ileri gelir. Su moleküllerindeki hidrojen atomları komşu su moleküllerinin oksijen atomları ile güçlü bağlar oluşturarak moleküllerin arasında "köprüler" kurarlar. Sıvı suda bu bağlar beklediğimizden daha kuvvetli olduğu için su, diğer sıvılar kadar kolayca buharlaşmaz.

Her biri bir oksijen ve iki hidrojen atomundan oluşan su moleküllerinde oksijen hidrojenden elektron "çaldığı" için hidrojen bağları ortaya çıkar. Şimdi iki adet fazladan elektronu olan oksijen atomu eksi yüklü iken arda kalan hidrojen iyonları artı yüklenmiştir. Komşu iki su molekülü birbirine yaklaştığında bir moleküldeki artı yüklü hidrojen, bir komşusundaki eksi yüklü oksijene doğru çekilir. Sıvı suda bu hidrojen bağları sürekli olarak hızlı bir şekilde oluşur ve yıkılırlar. Ne var ki, bunlar anlık eşleşmelerdir. Fakat sıvının kararlılığında önemli bir fark yaratırlar ve yüksek kaynama noktası-

na yol açarlar. Buzda, hidrojen bağları özünde sabittir. Aynı zamanda *yönlü*dürler; yani su molekülleri ancak belli bir biçimde düzenlenmişse buz içinde hidrojen bağı yapabilirler. Bu düzenlenme, buz yapısı içerisinde büyük, molekül büyüklüğünde boşluklar bırakarak buzu sıvı sudan daha az yoğun kılar. Sonuç olarak buz, suda yüzer.

Su dışındaki moleküller de su ile hidrojen bağı yapabilirler; yeter ki eksi yüklü kısımları olsun. Pek çok asit, şeker ve alkol (alkol ile su karışamasa yazık olurdu) buna dahildir. Başka moleküller hidrojen bağı kurmasa da su içindeyken keyifleri yerindedir çünkü kendilerini su molekülleri ile sarmalayarak yüklerini idare edebilirler. İyonların yaptığı budur ve bu, tuzun suda neden çözündüğünü açıklar. Yağlar yüksüz moleküllerdir. Bu yüzden su, yağlarla hidrojen bağı oluşturamaz; idare edilecek yükler de yoktur. Yağ molekülleri oyunbozanlardır; pek arkadaş canlısı değillerdir. Suya yağ eklendiğinde, su molekülleri izinsiz giren yağ molekülünün etrafında bir çeşit kafes oluşturarak kendi türleri ile hidrojen bağlarını en yüksek düzeyde tutmaya çalışırlar. Oluşturdukları kafes yapısı suda düzenlilik tetikler ve böylece entropiyi azaltır. Entropideki düşüş serbest enerjide artışa neden olur, ki bu kötü bir şeydir. Suya yağ eklemenin (entropik) bedeli ağırdır. Yağ molekülü ne yapmalıdır? Sudan sıyrılıp kendi çeşidini bulmalıdır. Kısa sürede, yağ molekülleri damlacıklar oluşturur ve bir süre sonra damlalar kaynaşarak hep birlikte suyu terk ederler. Yağ ve su ayrışır.

Bu bakımdan, yağ ve suyun ayrışmasından sorumlu susevmez kuvvet entropik kuvvetlere bir başka örnektir. Susevmez kuvvet, yağı sudan ayrıştırırken yağ moleküllerinin bir araya gelip kaynaşmaları için de güçlü bir iticidir. Su içerisinde, susevmez moleküller birbirlerini çekerler. Susevmez moleküllerin bu çekimi, kendini bir araya getirmenin önemli bir düzeneğidir. Bunun lezzetli bir örneği peynirdir. Peynir,

süte tuz ya da asit (ya da daha çağdaş yöntemle renin) eklenerek yapılabilir. Her yöntem temelde aynı sonuca götürür ama ilginç bir biçimde her birinin işleyişindeki fizik farklıdır. İnek sütündeki proteinin %80'i fosfor içeren bir protein olan kazeindir. Kazein molekülleri susevmezdir ama aynı zamanda eksi yüklüdürler. Susevmez doğaları, eğer birbirlerine yeterince yaklaşabilirlerse susevmez kuvvetin onları birbirlerine yapıştıracağı anlamına gelir. Ne var ki, eksi yükleri onları birbirlerinden ayrı tutar. Şimdi peyniri peynir yapacak olan geliyor. Tuz eklemek, süte artı ve eksi yüklü serbest iyonlar katar. Artı yüklü iyonlar her bir eksi yüklü kazein molekülünün etrafını sarar ve yükünü örterler. Şimdi kazein molekülleri birbirlerine yaklaşıp yapışarak peyniri oluşturmaya başlayabilirler.

Peki ya asit? Asit, sütteki hidrojen iyonu miktarını artırarak sütün pH değerini değiştirir. Artı yüklü hidrojen iyonları kazeine yapışır ve onu yüksüzleştirirler. Yine, kazein molekülleri birbirine yapışmaya başlar ve peynir oluşur.

Tuz veya asit eklemek, pek tabii ki, peynirin tadını etkileyerek tuzlu ya da ekşi olmasına neden olur. Bazen bu istenmez. Bu noktada renin devreye girer. Renin bir enzim, kazeinin yüklü kısmını kesip atan belirli bir tepkimeye önayak olan bir proteindir. Yüklü kısımları olmadan, kazein molekülleri susevmez kuvvet tarafından hızla birleşmeye zorlanırlar.

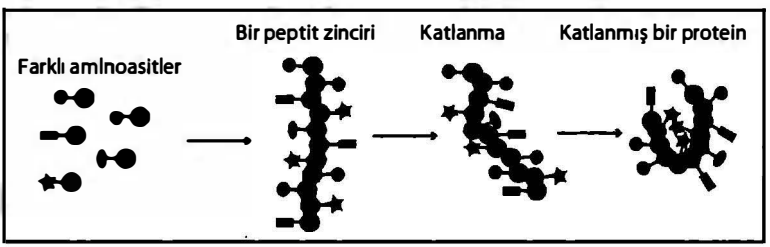
Susevmez kuvvetlerin önemi mutfakla sınırlı değildir. Gelecek kısımda da tartışacağımız üzere, susevmez kuvvetlerin bizi yaşamda tutan moleküllerin ta kendilerini biçimlendirmekte çok önemli bir payı vardır.

Moleküler Origami

Moleküler kendini bir araya getirme süreçlerine ölüm-kalım meselesi niteliğindeki bir örnek büyük biyolojik molekülle-

rin, özellikle de proteinlerin işlevsel biçimlerine doğru katlanmalarıdır. Proteinler, aminoasitler denen kimyasal birimlerin bir kolyedeki inciler gibi uç uca dizilmesinden oluşan uzun zincirlerdir (Şekil 4.3). Dünya'da her bir canlıdaki her bir protein yalnızca yirmi değişik aminoasidi kullanır (ilkesel olarak kullanılabilecek daha pek çok aminoasit vardır ama doğa, yalnızca bu yirmisini kullanmaya karar vermiştir). Her bir proteindeki belli aminoasit dizisi hücrenin DNA'sında yazılıdır. Değişik aminoasitlerin susevmez kuvvetten kaynaklanan değişik çekim eğilimleri vardır. Bu çekim ve itme eğilimleri, bir proteinin kendine özgü burgulu yapısını belirler. Bir proteini yanlış katladığınızda Alzheimer hastalığı, deli dana hastalığı ya da kistik fibroz (belli proteinlerin değişinimler sonucu ya da bilinmeyen nedenlere bağlı olarak işlevsiz ve hatta tehlikeli biçimlerde katlanması ile oluşan hastalıkların örnekleri) ile karşı karşıya kalabilirsiniz.

Bir protein en iyi biçimini nasıl alır? Bir protein, hücrenin moleküler makinesi tarafından üretildiğinde ilkin aminoasit



Şekil 4.3. Aminoasitler tek tip omurga ama farklı yan zincirleri olan moleküllerdir. Omurgalar bir peptit zinciri oluşturmak üzere peptit bağları ile birbirlerine eklenebilirler. Bu zincir, susevmez öğeleri (yıldızlar) merkezde ve susever olanlar dışarıda kalacak şekilde katlanarak kararlı bir yapıya ulaşana kadar moleküler fırtına tarafından itilip kakılır.

boncuklarından oluşan uzun bir sicim olarak ortaya çıkar. Bu boncuklardan bazıları birbirine bağlanmaya mahkûmdur ama aminoasit sicimi başta bombardımana tutan su moleküllerinin moleküler fırtınası tarafından itilerek amaçsızca kımıldayıp durur (Şekil 4.3). Bir molekül nasıl katlanacağını "bilmez"; son biçimini, biçimindeki gelişigüzel değişimler yoluyla bulması gerekir.

Küçük bir protein bile katlanarak sayısız olası biçim alabilir; bu olasılıkların sayısı evrenimizdeki atomların sayısından çok daha fazladır. Proteinin enerjisi zincirindeki kıvrımların ve dönüşlerin tamamına ve zincir boyunca aminoasitler arasındaki temaslara bağlıdır. Eğer zincirin kıvrımlarını (zincirin her halkasına açılar vererek) ölçecek olsaydık, olası bütün biçimler için proteinin enerjisini hesaplayabilirdik. Bazı biçimler daha yüksek bazıları ise daha düşük enerjiye sahip olurdu. En büyük sayıda aminoasit en düşük enerjili biçimlerde bir araya gelir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi en düşük enerji düzenlemesinde susever aminoasitler burgunun dışında bulunurken susevmez aminoasitler güvenli bir biçimde içeride saklanmaktadır.

Bir proteinin olası bütün biçimlerini gösteren bir harita düşleyin. Haritadaki koordinatlar (kuzey, batı, güney ve doğu) bağlantıların açılarını gösterir ve her bir koordinattaki yüzeysel yükseklik karşılık gelen enerjiyi gösterir. Bu, fizikçilerin proteinin enerji yüzeyi dediği şeyi ortaya çıkarır. Şekil 4.4 kısa bir protein zincirinin olası biçimleri ile birlikte ilgili enerjiyi manzaradaki yükselti olarak gösterir. Bu çizimdeki proteinin yalnızca dört halkası varken, gerçek proteinler binlerce aminoasit halkasından oluşarak enerji yüzeyini olağanüstü karmaşık bir hale getirirler. Proteinin değişik halkalarının moleküler fırtına tarafından gelişigüzel bir biçimde itilip kakılması onun sürekli olarak biçim değiştirmesine neden

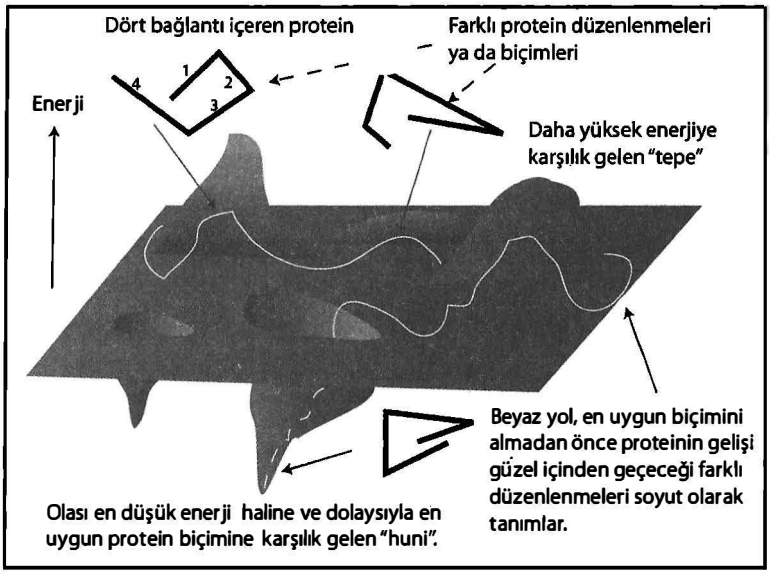
olur. Biçimdeki bu süreğen değişim manzaranın içinden geçen beyaz yol ile gösterilmiştir. Yolun üzerindeki her konum proteinin belli bir biçimine karşılık gelir (bazı örnekler şekil üzerinde gösterilmiştir).

Moleküler fırtına bazen proteini rahatsız, yüksek enerjili bir biçim almaya iter (manzaradaki bir tepe); protein çabucak gevşeyerek tepeden aşağı, daha rahat bir düzenlenmeye geçer. Proteinin biçimi en iyi biçime yaklaştığında enerjisi azalır ve manzaradaki bir enerji hunisine düşer. Enerjideki daha ileri düşüşler proteini huninin dibine çeker ve burada en düşük enerji düzenlenmesini ve en iyi son halini alır.

Moleküler fırtına, proteini itip kaktıkça değişik protein biçimleri silsilesi (soyut) enerji yüzeyinde dolambaçlı bir yol olarak gösterilebilir (Şekil 4.4'teki beyaz yol). Fizikçiler enerji yüzeyi üzerinde bir yayınımdan söz ederler (burada yayınım, gelişigüzel hareket anlamındadır). Moleküler fırtına olmaksızın, molekül sabit bir biçimde sıkışıp kalır ve serbest enerjisini en aza indiren en uygun biçimi asla bulamazdı. Enerji yüzeyi üzerinde yayınım, sonunda proteini en uygun, en düşük enerjili biçimine getiren bir arayıştır. Proteinin bu en iyi biçimi, onun işlevini belirler. Üç-boyutlu yapısı olmadan protein bir hiçtir. Proteini oluşturan aminoasit dizisi ancak proteinin 3-B yapısını belirlediği ölçüde anlam taşır.

Bazı proteinler için en uygun biçimin aranması çok fazla zaman alırdı. Yaşam, böyle proteinler için büyük molekülün en iyi biçimine ulaşmasında refakat ya da rehberlik edecek daha küçük proteinler icat etmiştir. Bu *refakatçi moleküller* proteinin kısımlarını önceden biçimlendiren kalıplar gibi davranarak enerji yüzeyinde yolunu daha çabuk bulmasına yardımcı olurlar.

Protein katlanması fizik yasaları, gelişigüzellik ve evrim tarafından sağlanan bilginin yaşamın karmaşıklıklarını yarat-



Şekil 4.4. Katlanan bir proteinin enerji yüzeyi.

mak üzere nasıl birlikte çalıştıklarına en iyi örnek olabilir. Bir proteinin aminoasit dizisi hücrenin DNA'sı tarafından katılım yasasına göre belirlenir. Bu bilgi, milyarlarca yılda evrilmiştir. Ama DNA'mızdaki bilgi *yalnızca* aminoasit dizisini içerir; proteinin en sondaki 3-B biçimini içermez. 3-B yapı, fiziksel kuvvetler (susevmez kuvvetler, durağan elektrik kuvvetleri, bükülme enerjileri, vb.) tarafından belirlenen enerji yüzeyinin bir sonucudur. Bu biçim aynı zamanda dış şartlara da bağlıdır (pH, sıcaklık, iyon yoğunluğu). Bu yüzden, bir proteini oluşturmak için gereken bilginin büyük bir kısmı DNA'da değil de yükleri, termodinamiği ve mekaniği yöneten fizik yasalarında bulunur. Ve son olarak, aminoasit zincirinin olası biçimler evrenini araştırıp en iyi biçimini bulabilmesine olanak tanımak için *gelişigüzellik* gereklidir.

Schrödinger'in Bilmecesi

Erwin Schrödinger, yaşamın moleküllerinin, özellikle de DNA'nın moleküler fırtınanın saldırısı altında nasıl kararlı kalabildiğini merak ediyordu. Kararlılığın kuvvetli kimyasal bağlardan kaynaklandığını ileri sürdü. Kısmen haklıydı (hem DNA'nın hem de proteinlerin omurgasında kuvvetli kimyasal bağlar bulunur) ama en ilginç noktayı kaçırmıştı: Hücrelerdeki büyük moleküllerin işlevsel yapısı birkaç kuvvetli bağ yerine çok sayıda zayıf bağ, özellikle hidrojen bağları ama bunun yanında susevmez etkileşimler ve disülfat köprüleri denen yapılar (bir proteinin içindeki kükürtlü aminoasitlere bağlı kükürt atomları arasındaki bağlar) tarafından ayakta tutulur. Eğer bir proteinin özgün burgu biçimi ve bir DNA ipliğinin ikili sarmalı zayıf bağlarla bir arada tutuluyorsa, bu biçimler neden bu denli kararlıdırlar?

Eğer bir canlının moleküllerindeki bütün bağlar çok kuvvetli olsa, hiç hareket ya da değişim gerçekleşemez. Çok zayıf olsalar, kararlılık olamaz. İşin sırrı kararlılık ile esneklik arasında orta yolu bulmaktır. Nesneler çok kararlı olurlarsa işlevsiz kalırlar; kurşun tekerlekleri olan bir araba düşünün. Çok esnek ve kırılgan olurlarsa yine işlevsiz kalırlar. Yaşamın bulduğu çözüm, çok sayıda bağın pekişiminden yararlanmak olmuştur. Daha önce gördüğümüz üzere, birlikte çalışan çok sayıda zayıf bağ bir molekülü çok kuvvetli kılarken tek tek bağlar kolaylıkla kırılarak gerektiğinde yeniden düzenlenmeye olanak tanırlar.

Bağlar nasıl işbirliği yapabilirler? Daha önce söz edilen misellerde, moleküller daha büyük bir yapı oluşturmak üzere ortaklaşa hareket ederler. Burada *molekül* yerine *bağ* koyarsak, elimizde benzer bir durum olur. Bir DNA molekülü oluştuğunda, DNA'nın iki ipliği çok sayıda hidrojen bağı ile bir arada tutulmaktadır. Tek bir hidrojen bağı, oda sıcaklığın-

da kolaylıkla kırılabilir. Oda sıcaklığındaki suyun içinde bir hidrojen bağının ortalama ömrü pikosaniye (yani, saniyenin milyarda birinin binde biri) düzeyindedir. Ne var ki, birlikte çalışan çok sayıda hidrojen bağımız varsa iki DNA ipliğinin kendiliğinden ayrılması çok sayıda bağın eş zamanlı, *pekişik* kırılmasını gerektirir ve bu kendiliğinden olmayacaktır. Bir DNA molekülündeki tek tek bağlar geçici olarak kırılabilir ama DNA molekülünün şeklini korumasını sağlayan komşu hidrojen bağlarının varlığı ile yeniden bir araya gelmeye zorlanarak çabucak yeniden oluşacaklardır. DNA canlı hücrelerde kullanımda olmadığı zaman ikili sarmal yapısını korur. Ne var ki, DNA'daki bilginin okunması gerektiğinde ikili sarmal açılmak zorundadır. Bu, bir dizi hidrojen bağını bozmanın eşiğini yerelde düşüren ve gereken yerde DNA'yı bir fermuar gibi açıp kapayan özelleşmiş proteinler sayesinde başarılır (ayrıntılı bilgi için 7. Bölüm'e bakınız).

DNA'nın kararlılığı da tamir enzimleri sayesinde etkin bir biçimde sağlanır. Eğer bir nedenden DNA molekülünün bir kısmı bozulursa tamir enzimleri, molekülün hasar görmemiş olan bitişik bir kısmını kimyasal bir kalıp olarak kullanarak hatayı düzeltecektir. Bu bakımdan DNA'nın kararlılığı bağ pekişimi, iki ipliğin bütünleyiciliği ve hücre düzeneğince etkin tamirinin bir sonucudur.

Proteinlerin durumu da buna benzer. Bir proteinin biçimi de susevmez, hidrojen ve disülfat bağlarının proteinin biçimini pekişik bir biçimde kararlı hale getirmeleri ile bir arada tutulur. Proteinin kendine özgü aminoasit dizisi evrim tarafından öyle seçilmiştir ki protein, genel biçimini korumakla birlikte ancak işini yapmasına yetecek kadar esnektir (ileride bölümlerde ne çeşit işler yaptıklarını göreceğiz). Eğer protein biçimini kaybedecek olursa, hücre çabucak onu kullanımdan çıkarır ve bileşenlerine ayırarak geri dönüştürür.

Uzun Zaman Ölçeklerinin Ortaya Çıkışı: Su Moleküllerini İşbirliğine Zorlamak

Birbirleriyle etkileşen çok sayıda öğenin bulunduğu durumlarda pekişim neredeyse kaçınılmazıdır. Bunu, öğrencilerim ve ben birkaç nanometreye kadar sıkıştırılmış basit sıvılara (su ya da yağ) baktığımızda anladım. Kristal biçimindeki katılar uzun erimli düzene sahipken (kristal boyunca atomlar büyük uzaklıklar boyunca düzenli bir desende yerleşmiştir) sıvılar daha kısa erimli bir düzene sahiptirler. Eğer bir havuz dolusu sıvı su içindeki bir su molekülünün üstünde oturuyor olsaydınız, komşu molekülleri ortalama 0,25 nanometre (nm) uzaklıkta görürdünüz. Bu komşular hareketlidirler ama ortalamada bu uzaklıkta bir su molekülü bulutu sizi çevrelerdi. Bu uzaklığın ötesinde sıradaki en yakın komşular, sizin komşularınızın varlığını hissediyor olurlardı ve ortalama 2 x 0,25 nm = 0,5 nm uzaklıkta bolca molekül görürdünüz. Ne var ki, bütün moleküllerin süreğen hareketliliği yüzünden 0,5 nm uzakta bulunan çok sayıdaki bu moleküller, 0,25 nm uzaklıktaki çok sayıda molekülden biraz daha bulanık olurlardı. Daha da ilerleyince, 0,75 nm uzakta daha da bulanık bir molekül yığını olurdu ve bu böyle sürüp giderdi; ta ki ısıl hareketin, düzenin en ufak izini bile yok ettiği ve su moleküllerinin hemen her uzaklıkta eşit olasılıkla bulunabilecekleri beş ila altı moleküler çaplık uzaklığa varıncaya kadar.

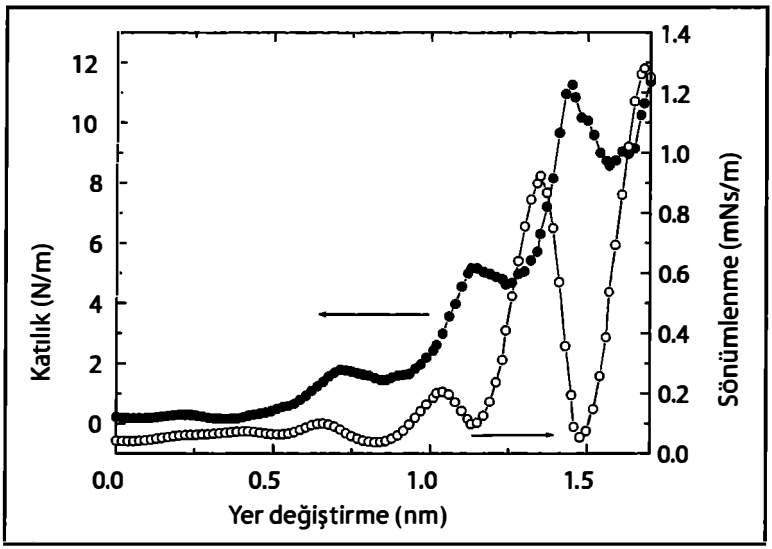
Benim laboratuvarımda, sıvıların kısa erimli düzenini incelemek için değişik bir yöntem kullanıyoruz. Sıvılar, katı bir yüzeyle karşılaştıklarında kendilerini katmanlar halinde düzenlerler. Yüzeye en yakın olan ilk katman iyi tanımlanmıştır. Su moleküllerini, yüzeyden 0,25 nm uzaklıkta bulma olasılığımız büyüktür. İkinci katman biraz daha yayınmıştır ve yüzeyden uzaklaştıkça katmanlar git gide daha bulanık hale ge-

lir ve yukarıda da söz edildiği gibi beş ya da altı katman sonra düzen tamamen ortadan kalkar. Bu katmanlanma AKM ile ölçülebilir. Bizim laboratuvarımızda bir AKM sundurmasını ve sonda ucunu suya batırıyoruz ve ucu yavaşça yüzeye doğru hareket ettiriyoruz. Arada kalan suyun tepkisini ölçmek için 0,1 nm'den (tek bir hidrojen atomunun çapı kadar!) daha küçük bir genlikte (salınım hareketinin büyüklüğü) salındırıyoruz. Katmanların içinden geçerken küçük miktarda değişen genliği izleyerek, su katmanlarının "yaysılığını" (diğer bir adıyla "katılığını") yani ucu ona karşı iteklediğimizde suyun, ucu geri itebilme becerisini ölçüyoruz. Katılık, 0,25 nm (su moleküllerinin büyüklüğü) devirle inip çıkarak sıvının moleküler taneliliğini gösterir. Böyle bir ölçümün örneği Şekil 4,5'te gösterilmiştir.

2006'da doktora sonrası araştırmacım Shiva Patil ve öğrencim George Matei bir silikon yağı olan oktametilsiklo-tetrasiloksan üzerinde bu çeşit ölçümler yapıyorlardı. OMSTS, 1 nm çapında (eğer bir nanobilimci iseniz) iri moleküllere sahiptir. Katılığın yanında sıvı katmanların sönümlenmesini de ölçtük. Katılık bize, sıvı katmanlarının yaylanarak eski biçimlerine ne derece döndüklerini (yani ne kadar enerji biriktirdiklerini) söylerken sönümleme, katmanlara bastırdığımız sırada ne kadar enerji kaybı yaşandığını söyler. Sönümlemenin, katılık ile aynı periyotta uç ile yüzey arasındaki uzaklıkla azalıp arttığını gördük. Verilere bakarken Shiva tuhaf bir şey fark etti: Sönümlemedeki artıp azalma her zaman katılıktaki artıp azalma ile birlikte gitmiyordu. Bazen sönümlemedeki zirveler ile katılıktaki zirveler bir gidiyordu ama bazen de tersine dönüyorlardı; sönümlemedeki zirveler ile katılıktaki vadiler denk geliyordu. Ölçümler arasındaki fark neydi? Her şeyi gözden geçirdik; iyon yoğunluğu, sıvı saflığı, cihazla ilgili sorunlar. İki hafta sonra Shiva, ölçümlerdeki farkın ucun yü-

zeye yaklaşma hızında olduğunu buldu. Fakat deneylerimizde ucu öyle yavaş hareket ettiriyorduk ki (kullandığımız en büyük hız saniyede 1,2 nm idi) bunun bir öneminin olmaması gerekirdi. Bu aşırı düşük hızda ucu bir molekül katmanından geçirmek neredeyse bir saniye alıyordu. Oda sıcaklığındaki sıvı molekülleri için ha bir saniye ha sonsuzluk. Isıl hareket, bundan çok çok daha hızlıdır. Fakat saniyede 0,4 nm'den saniyede 0,6 nm ve ötesi hızlara geçtiğimizde çok etkileyici bir şey olduğunu gördük. Düşük hızlarda sönümleme ve katılık birlikte artıp azaldılar. Bu, sıvının sıvı gibi davrandığı anlamına gelir; ucu içinde ittikçe sıvı kalınlaşıp inceldi. Daha büyük hızlarda sıvı, yeni bir hal aldı; çok az enerji kaybıyla yaysı bir hale geldi. Çoğunlukla bunu yalnızca katılar yapabilir. O zamandan bu yana aynı etkiyi sıvı suda da bulduk; gerçi burada bunun gerçekleşmesi için biraz daha hızlı sıkıştırmamız gerekti. Saniyede 0,8 nm'de su hâlâ bir sıvıdır ve bu hızın ötesinde katı gibi davranmaya başlar. Sıvının iki hali arasındaki geçiş oldukça anidir: Kritik bir hızın altında her zaman sıvı gibi davranır ve çok dar bir aralıktaki hızlarda toptan katı benzeri bir tepkiye geçer.

Aynısı toplu sıvılara (nanometrelik alanlara sıkıştırılmamış sıvılara) da olabilir ama yalnızca çok yüksek hızlarda. Bizim bulduğumuz, nanoölçekte bu etkileyici değişimlerin çok çok düşük hızlarda gerçekleştiğiydi. Ama bu nasıl olabilir? Bir sıvıdaki moleküller inanılmaz hızlarda hareket ederler; bizim AKM ucumuzdan çok daha hızlıdırlar. Yaklaşan uca göre kendilerini ayarlamak için bolca zamanları olmalıydı ve sıvı, sıvı olarak kalmalıydı. Yanıt (bildiniz) pekişimdi. Su, yüzey ile uç arasındaki yalnızca birkaç moleküler katmana sıkıştırıldığında su moleküllerinin yaklaşan ucun yolundan çekilmesi zorlaşır. Sıkışmışlık nedeniyle, moleküller toplu haldeki hareket özgürlüğüne sahip değillerdir. Nanoölçeğe



Şekil 4.5. Tek molekül kalınlığındaki su katmanlarının katılık ve sönümleme değerlerinin atomik kuvvet mikroskobu (AKM) ile ölçümü. Katılıktaki her tepe (dolu daireler) AKM ucu ile düz bir yüzey arasında tam sayıda (1, 2, 3) su molekülü içeren belli bir kalınlıktaki suya karşılık gelir. Katılık tepeleri ile sönümleme tepelerinin (boş daireler) eşleşmemesi birkaç molekül kalınlığındaki su katmanının AKM ucu tarafından sıkıştırılmaya bir katı gibi tepki verdiği anlamına gelir.

sıkıştıklarında, ucun içine girebileceği bir delik oluşturmak için pek çok molekül birbiriyle uyum içinde çalışmak zorundadır; moleküller yoldan çekilmek için işbirliği yapmak zorundadırlar. Bu sonuçlarla ilgili gerçekten dikkat çekici olan ise su moleküllerinin işbirliği yaparak delik yaratmak için *gelişigüzel* bir biçimde hareket etmelerinin son derece uzun, saniyeler ölçeğinde, bir süre almasıdır. Bu, su molekülü çarpışmaları arasında geçen ortalama süreden milyon kez milyar kat daha uzundur. Bu denli uzun bir zaman ölçeği yarat-

mak için gerçekleşecek ortaklaşa eyleme kaba bir hesapla çok fazla değil otuz ila kırk molekülün katılması gerektiği ortaya çıkar. Pekişim yalnızca ani geçişler yaratmaz, aynı zamanda zaman ölçeklerinde büyük değişiklikler yaratır ve böylelikle moleküler süreçlerin bile saniyeler hatta dakikalar sürmesine neden olur.

Moleküler Devre Anahtarları

Lipitler ve deterjanlar gibi çiftsever moleküller kritik bir yoğunluğa ulaştıklarında aniden miseller oluştururlar. Bu, geçişim basıncında ani bir değişime neden olur. Hapsedilmiş su deneylerimizde sıkıştırma oranında küçük bir değişikliğe tepki olarak sıvı gibi davranıştan katı gibi davranışa hızlı bir geçiş gözledik. Belirli değişkenlerin (misellerin yoğunluğu, hapsedilmiş sudaki hız) kritik değerlerinde gerçekleşen ani değişimler pekişik davranışa işaret eder.

Pekişik davranış moleküler biyoloji ile sınırlı değildir. Dünyamızın, yaygın ama değeri bilinmeyen bir yanıdır. Örneğin, bazı iktisatçılar 2008'deki mali çöküşün ve 1930'ların Büyük Buhran'ı da dahil daha eskilerinin bankacılığın pekişik başarısızlığından kaynaklandığını ileri sürdüler. Hikâye şöyle: Sürekli düşük oranda banka başarısızlığı gerçekleşmektedir. Bu oran düşük kaldıkça, mali düzenin bütünü büyük ölçüde etkilenmemiş olur. Ama bankalar, belirli bir eşik değerden daha yüksek oranlarda başarısızlığa uğrarsa bankaların birbirine bağlılığı (pekişim) bütün piyasayı uçuruma çeker. Bu bakımdan, daha büyük de olsa, mali piyasadaki bir başka salınım birdenbire hızlı, köklü bir değişime yol açar. Pekişim iş başındadır.

Pekişim, *geçişe* yol açar. Dün her şey yolundaydı; bugün ekonomi çöktü. Bir saniye önce yağ molekülleri güle oynaya

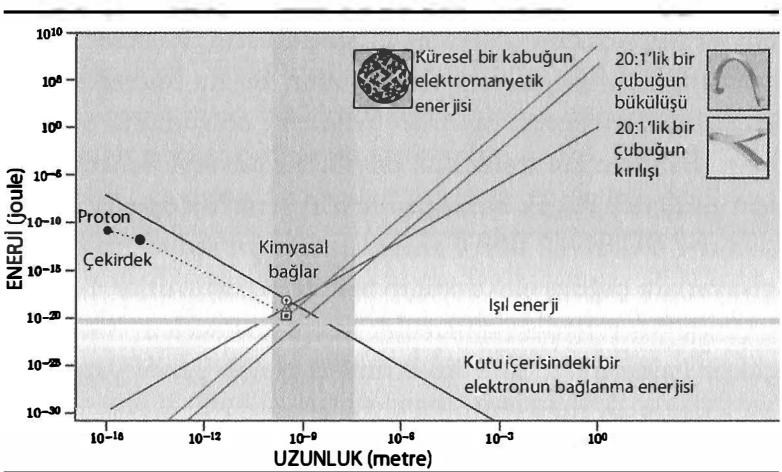
etrafta geziniyorlardı; sonrasında aniden miseller oluşturdular ve geçişim basıncı baş aşağı çakıldı. Su, sıvı gibi davranır ama düşük bir kritik hız aşılarak sıkıştırıldığında aniden bir kauçuk gibi zıplar. Bir DNA ikili sarmalı bir saniye önce iyiydi; ama ısıtılınca aniden korkunç bir biçimde açıldı. San Andreas Fay'ı bir saat önce sessizdi ama şimdi kızılca kıyamet kopuyor. Pekişimi hafife almamalıyız!

Etkilerine dair bazı olumsuz örneklere rağmen, canlı hücrelerin işlemesi için pekişim çok önemlidir. Bir molekülün biçimindeki değişimler çok sayıda bağın pekişimi ile gelişir ve çoğunlukla ani ve belirgin olan biçim değişimi görece küçük bir çevresel değişimden kaynaklanabilir. Bu davranış, küçük moleküllerin bağlanması gibi küçük nedenlere tepki olarak büyük değişimleri etkileyebilen moleküllerin, *moleküler devre anahtarlarının* oluşumuna olanak tanır. Bu da hücredeki etkinlikleri denetleyen *moleküler devrelerin* oluşumuna olanak tanır. Elektronikte transistör, büyük bir devreyi denetlemek için gerilimde küçük bir değişime izin veren bir öğedir. Transistörler elektronik devre anahtarlarıdır ve radyolardan bilgisayarlara çağdaş elektroniğin temelini oluştururlar. Benzer biçimde hücrelerdeki moleküler devre anahtarları, hücreleri çalışır halde tutan denetim birimleri olarak görev yaparlar. Bu anahtarlar, çoğu entropik kökene sahip çok sayıda küçük bağın kullanılmasıyla olası kılınmış pekişim ilkesine dayalı olarak çalışırlar.

Bütün Enerjiler Eşit Yaratılmıştır; En Azından Nanoölçekte

Isıl hareket, entropik kuvvetler ve pekişim (nanoölçekli düzeneklerin tuhaf özelliklerinden birkaçı) yaşamı moleküler düzeyde anlamamız için önemlidir. Nanoölçeğin gerçekten bü-

yüleyici bir diğer özelliği hücrelerin eşgüdümlü etkinliğinin nasıl ortaya çıktığını anlamanın *anahtarı* olmasıdır. Bu özellik, enerjinin bir biçimden diğerine nasıl dönüştürüldüğü ile ilgilidir. Yaşamın en büyüleyici yanlarından biri canlıların besinden enerji alıp onu yönlü harekete dönüştürebilmeleridir. Eski nesiller bu sihirli beceriyi yaşam kuvvetlerine bağlamışlardı. Ne var ki, fiziksel açıklamalar için süren arayış bilim insanlarını moleküler ölçeğe getirmiştir. Proteinler, RNA, DNA ve hücrelerdeki diğer büyük moleküller hücreleri çalıştıran temel işlevsel birimler gibi görünmektedir. Bu moleküllerden



Şekil 4.6. Elektrostatik enerji, kimyasal bağ enerjisi ve esnek enerjilerin hepsi, oda (ya da beden) sıcaklığındaki ısıl enerji (moleküler fırtına) ile karşılaştıkları nanoölçekte (10^{-9} metre) birleşirler. Enerji ölçeklerinin nano düzeydeki bu kesişmesi kendini bir araya getirmeyi ve moleküler enerji dönüşümü araçları ve makinelerinin olabilirliğini açıklar. Rob Philips ve Stephen R. Quake'in izni ile yeniden basılmıştır; "The Biological Frontier of Physics," *Physics Today* 59 (May 2006): 38-43. © 2006, American Institute of Physics.

bazılarının enerjiyi bir biçimden başka birine dönüştürebilmesi; *moleküler makineler* gibi davranmaları gerekir.

Makineler, enerji dönüştürme aletleridir; örneğin bir araba motoru kimyasal enerjiyi hareket enerjisine dönüştürür. Ne var ki, benzin dolu bir havuz içinde hiçbir bağlantısı olmadan yatan bir araba motorunun birden canlanacağı yoktur. Fakat hücrelerimizdeki moleküler makineler tam da bunu yaparlar: Miyozin gibi bir moleküler makineyi hücreden söküp çıkarın, biraz kimyasal yakıt verin (hücrelerde buna ATP denir), "canlanacaktır". Moleküler makineler özerk makinelerdir. Neden bilindik, büyük ölçekli makinelerimiz özerk bir biçimde çalışamaz da moleküler makineler çalışabilir?

Anlaşılan o ki, nanoölçeğin değişik enerji biçimlerini birbirine dönüştürmeye geldiğinde çok özel bir yanı vardır. İlginç bir biçimde esnek, mekanik, durgun elektrik, kimyasal ya da ısıl olsun pek çok tür enerji *yalnızca* nanoölçekte kabaca aynı şiddettedirler (Şekil 4.6). Bedenlerimizdeki moleküllerin değişik enerji türlerini *kendiliğinden* birbirlerine dönüştürebilmesi heyecan verici bir olasılık yaratır. Moleküler fırtınadan enerji (ısıl enerji) alıp bunu, örneğin kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmekte kullandıktan sonra tekrar çevredeki karmaşanın içine salarken moleküller ve küçük, nanoölçekli parçacıkların enerjilerinde kayda değer dalgalanmalar olabilir. Buna karşılık, sıcaklık (ısıl enerji ile birlikte) çok yüksek (binlerce ya da milyonlarca derece) olmadığı sürece atomlar ve çekirdekler gibi daha küçük yapılar ısıl enerji dalgalanmalarına izin vermeyecek kadar büyük bağlanma enerjilerine sahiptirler. Bu kadar yüksek sıcaklıklarda moleküller kararsızdır ve yaşam için gerekli karmaşık yapıların oluşması olanaksızdır. Öte yandan, nanometreden çok daha büyük ölçeklerde mekanik ve elektrik enerjiler ısıl dalgalanmalardan etkilenmeyecek kadar yüksektir. Bu ölçekte her şey determi-

nistik bir hal alır ve nesneler kendiliğinden biçim değiştirmez ya da kendilerini bir araya getirmezler; bunlar, yaşam için gerekli niteliklerdir.

Bu bakımdan nanoölçek, gerçekten özeldir. Karmaşık moleküler yapıların oluşumuna olanak tanımak ve değişik enerji biçimlerinin (mekanik, elektrik, kimyasal) kendiliğinden dönüşümlerine destek olmak için gereken büyüklükteki ısıl enerji yalnızca nanoölçekte bulunur. Dahası, enerji ölçeklerinin kavuşması canlıyı oluşturmak için gereken kendini bir araya getirme, uyarlanırlık ve kendiliğinden harekete olanak tanır. Makinelerin tamamıyla özerk çalışabileceği tek ölçek nanoölçektir. Nano makinelerin harekete geçmeleri için tek gereken ufacık bir itiştir. Ve bu itiş, moleküler fırtınanın ısıl enerjisince sağlanır.

Ama moleküler fırtına, 3. Bölüm'de termodinamiğin ikinci yasası tartışılırken işaret edildiği üzere her zaman karmaşaya yol açmaz mı? Canlı hücrelerin moleküler makineleri sadece herhangi eski moleküllerden olsalardı yanıt evet olurdu; ama değillerdir. Onlar, karmaşadan düzen ayıklayan akıllı küçük makinelerdir. Nasıl mı? Bakalım nasılmış.

5

Maxwell'in İblisi ve Feynman'ın Cırcırı

Varsayalım ki bir kap, üzerinde küçük bir delik olan bir bölme ile, A ve B olarak iki kısma bölünmüş olsun ve tek tek molekülleri görebilen bir varlık, sadece daha hızlı moleküllerin A'dan B'ye ve daha yavaşlarının B'den A'ya geçmesine izin verecek biçimde bu deliği açıp kapatıyor olsun. Böylece kendisi termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olarak, iş yapmadan B'nin sıcaklığını yükseltmiş ve A'nınkini düşürmüş olacaktır.

— JAMES CLERK MAXWELL, *ISI KURAMI*

Olanların olacağı belliydi çoktan;
İyiyi kötüyü yazmış kaderi yazan;
Ta baştan gereği düşünülmüş her şeyin:
Neden boşuna uğraşır, dertlenir insan?

— ÖMER HAYYAM, 1048-1131

James Clerk Maxwell (1831-1879) geride seçkin bir bilimsel miras bıraktı. Elektrik ile mıknatıslanmayı birleştirdi, elektromanyetik dalgaları buldu ve ışığın doğasını açıkladı, Satürn'ün halkalarının sırrını çözdü, çağdaş renk kuramını geliştirdi ve istatistik mekaniğinin kuruluşuna ortaklık etti. Bütün bunlara ek olarak bir iblis icat etti.

İskoçyalı fizikçinin termodinamik ve istatistiki fizik üzerine eseri *Isı Kuramı* bugün hâlâ bir duruluk örneğidir. Maxwell, termodinamiğin ikinci yasasını tanımlarken, "Termodinamikteki en iyi oturmuş gerçeklerden biri ne hacim değişimi ne de ısı akışına izin veren ve içerisinde sıcaklık ile basıncın her yerde aynı olduğu [kapalı] bir sistemde iş yapmadan sıcaklık veya basınçta herhangi bir eşitsizlik yaratmanın olanaksız olduğudur. Bu, termodinamiğin ikinci yasasıdır ve büyük kütlelerde maddelerle ilgilenebildiğimiz ve onları oluşturan ayrı ayrı molekülleri algılama ya da ele alma gücümüz olmadığı sürece kuşkusuz doğrudur," diye yazmıştı.

Bu alıntı, ikinci yasanın umabileceğimiz kadar iyi bir tanımını sunar. Yasa, uğrunda çaba harcanmadıkça (iş yapılmadıkça), düzgün bir ortamda sıcaklık veya basınç değişimi yaratmayı yasaklar. Fakat alıntının sonunda Maxwell bir şerh düşer: Çok sayıda moleküle ilgilendiğimiz ("büyük kütlelerde") ve onlara tek tek bakmamızın bir yolu olmadığı sürece ikinci yasa doğrudur. Ama ya moleküllere tek tek *bakabilseydik*? Maxwell söyle sürdürüyor: "Ama eğer yetileri, her bir molekülü yolu üzerinde izleyebilecek kadar keskinleşmiş bir varlık tasarlarsak; nitelikleri hâlâ temelde bizimkilerle sınırlı olan böyle bir varlık şu anda bizim için olanaksız olanı başarabilirdi." Böyle bir varlık, ikinci yasayı çiğneyebilir miydi?

Maxwell'in İblisi

İkinci yasa, makinelerin belli sınırlarını açıklamak için icat edilmişti: Buhar makinelerinin büyük miktarda enerjiyi boşa harcadığı biliniyordu; kömür halinde sağlanan enerjinin çoğu ısı olarak boşa gidiyor, mekanik işe çevrilmiyordu. 1700'lerin sonu ve 1800'lerin başında fizikçiler ve mühendisler motorların verimliliğini artırmakla uğraşmaktaydı. Verimlilik,

üretilen kullanılabilir enerjinin yakıt biçimindeki enerji girdisine oranıdır. Örneğin bir araba motoru, yaklaşık yüzde 25 verimliliğe sahiptir. Depoya koyduğumuz benzinin yalnızca yüzde 25'i arabayı hareket ettirmek ya da elektrikli düzenekleri çalıştırmak için kullanılır; gerisi ısı olarak kaybedilir. Motorların verimliliğinin bir sınırı var mıdır? En azından ilkesel olarak, yüzde 100 verimli bir motor yapılabilir mi?

Yeni termodinamik bilimi ve ısının bir enerji biçimi olduğunun anlaşılması Helmholtz'ü evrensel enerji korunumu yasasına götürdü. Helmholtz, bir canlının hareketi ve büyümesi için gereken gücün kimyasal yakıttan (besinden) gelmesi gerektiğini ikna edici bir biçimde gösterdi. Bu bağlamda bir canlı, bir motora benziyordu. Bir motor gibi, yüksek nitelikli bir enerji biçimini hem harekete hem de ısıya dönüştürüyordu. Ve yine aynı soru belirdi: Yaşamın motorlarının verimliliğinin bir sınırı var mıydı?

Yirminci yüzyılın başlarında, yaşamın motorlarının moleküler bir düzeyde işlediği açıklık kazanıyordu. Bu çeşit makineleri nasıl anlayabiliriz ve işleyişleri gündelik deneyimimizin büyük ölçekli makineleri ile nasıl ilişkilidir?

Büyük ölçekli makineler (araba motorları, enerji santralleri, vs.) yakıtı harekete dönüştürmekte *aşamalı değişimlerden*; yani sıcaklık ya da basınçtaki farklardan yararlanırlar. Bu önemli gözlem ilk defa genç bir Fransız askeri mühendis olan Sadi Carnot (1796–1832) tarafından 1825'te yapılmıştır. Motorların verimliliğinin ilkesel olarak yüzde 100'e çıkarılamayacağını, bunun yerine yararlandıkları aşamalı sıcaklık değişimi ile sınırlı kalacağını anladığında Carnot, çağdaş termodinamiğin zeminini hazırlamış oldu. Diğer bir deyişle, ateş daha sıcak ve çevredekiler daha soğuk oldukça makine daha verimli oluyordu. Bir makinenin içindeki sıcaklık, çevredekilerin sıcaklığına yaklaştığında makine daha fazla iş ya-

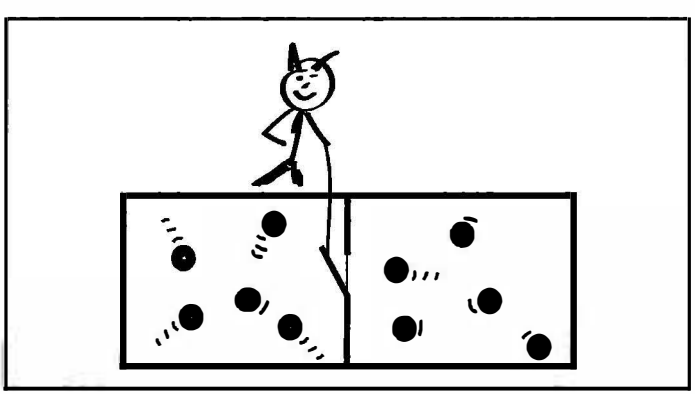
pamaz ve verimlilik sıfıra düşer. O zaman, Maxwell'in ikinci yasayı tanımlarken söz ettiği duruma geliriz.

Canlı hücrelerde sıcaklık ve basınç her yerde aynıdır; yanma odası ya da basınç haznesi yoktur. Sıcaklığın ya da basıncın aşamalı değişimi yoktur. Carnot'ya göre bedenlerimizde hiçbir motorun işleyememesi gerekir. Termodinamiğin ikinci yasası, atık ısı yaratma ve aşamalı değişimi düzleştirme pahasına aşamalı değişimden iş çıkarmamıza izin verir. Sonuç dengedir; her yerde aynı sıcaklık ve basınç bulunan bir durum, kendisinden daha fazla iş çıkarılamayacak bir durumdur. Moleküler makineler, termodinamiğin ikinci yasasını çiğnemeden tekdüze-sıcaklıklı ortamdan nasıl iş çıkarırlar?

İkinci yasa on dokuzuncu yüzyılda ortaya konduğunda fizikçiler, onun doğanın su götürmez yasalarından biri olduğuna emin değillerdi. Bu yasanın temeli ne idi? Fizikçilerin bir şeylerin temeline inmek için kullanmaktan hoşlandıkları pek çok yöntem vardır: deneyler, kuramsal hesaplamalar ve düşünce deneyleri. *Gedankenexperiment*, İngilizce'ye bazen "düşünce deneyi" olarak aktarılan Almanca bir sözcüktür. Yalnızca düşüncede var olabilen ve fizik kuramları için bir zorlama sınavı olan varsayımsal bir durumdur. Olay, ya bir çelişki (farklı fiziksel kuramlar arasında bir ikilem) yaratmak ya da bir kuramı veya deneysel sonucu gerçek dünyanın erişimi dışındaki bir âleme doğru ne kadar esnetebileceğinizi görmektir. Ünlü düşünce deneyleri arasında Schrödinger'in kedisi (kuantum mekaniğinin bazı yorumlamalarının saçmalığını göstermiştir); Galileo'nun düşüş sırasında düşmekte olan nesnenin kütlesinden bağımsız olarak sabit ivmeyi çıkarsaması (Galileo hiçbir zaman Pisa kulesinden aşağı eşyalar atmamıştır; topları eğimlerden aşağı yuvarlayınca ne olacağını çıkarsamıştır); Newton'un havan topu (gökcisimlerinin hareketlerinin Dünya üzerindeki nesnelerin düşüşü ile ilişkili

olduğunu göstermiştir) ve Maxwell'in iblisi, ısıyı soğuktan sıcağa aktarabilecek olan küçük yaratık.

Maxwell'in 1867'de düşlediği iblisi, başlangıçta aynı ortalama sıcaklıkta olan gaz dolu iki odayı ayıran küçük bir kapıyı denetleyen ufacık varsayımsal bir yaratıktı (Şekil 5.1). İblisin görevi gaz moleküllerini hızlı ve yavaş olarak ayırmaktı. Örneğin eğer hızlı bir molekül, iblisin kapısına sağdan yaklaşırsa iblis, onun kapıdan geçip soldaki odaya girmesine izin verir; ama molekül yavaş olsaydı geçmesine izin vermezdi. Buna karşılık yavaş moleküllerin soldaki odadan sağdakine geçmesine izin verip hızlıların geçmesine izin vermezdi. Kısa süre sonra iblis, hızlı molekülleri soldaki odaya geçirmiş ve yavaşların hepsini sağdaki odada bırakmıştır. İblis, tekdüze sıcaklık düzeneğinden başlayarak aşamalı sıcaklık değişimi yaratmıştır; bir yanı soğuk diğer yanı sıcak yapmıştır (bir gazın sıcak-



Şekil 5.1. Maxwell'in iblisi bir tuzak kapıyı denetleyerek hızlı hareket eden molekülleri soldaki odaya ve yavaşları sağdaki odaya ayırır. Bir süre sonra iş yapmadan odalar arasında bir sıcaklık farkı yaratmayı ve böylece ikinci yasayı görünüşte çiğnemeyi başarır.

lığının gaz moleküllerinin hızı ile doğru orantılı olduğunu hatırlayınız). Şimdi eğer iblisin kapısına küçük bir türbin konacak olsa bu aşamalı sıcaklık değişimi iş yapmak için kullanılabilirdi. Sonuç, ikinci yasa ile açıkça çelişerek tekdüze-sıcaklıklı bir düzenekten kullanılabilir iş çıkarmak olurdu. Öte yandan, moleküler makineleri açıklamak için tam da böyle bir Maxwell iblisi gerekir! Hücrelerimiz moleküler Maxwell iblisleri ile mi doludur? Yaşam, derinlerde, ikinci yasayı çiğner mi?

Smoluchowski'nin Tuzak Kapısı

Marian von Smoluchowski (1872-1917) ikinci yasa hakkında düşünerek epey zaman harcamıştır. Sıkı bir dağcı olan Polonyalı-Avusturyalı fizikçi olağanüstü biçimde dağların katlanması ve buzul aşındırmasından asıltılarda yayınım ve ısı aktarımına kadar her şey hakkında yazmıştır. Brown hareketi ile ilgili açıklamasını, Albert Einstein ile neredeyse eş zamanlı olarak yayımlamıştır; gerçi daha sonra kendisinin değil de Einstein'ın çözümünün doğru katsayıya sahip olduğunu kabul etmiştir.

Çok sayıdaki makalelerinden biri "Deneyle Gösterilebilen, Standart Termodinamik Bilimiyle Çelişen, Moleküler Olaylar" 1912'de basılmıştı. Bu makalede salınımların (bir özelliğin –örneğin basınç ya da yoğunluk– ortalama değerinden kendi kendine gerçekleşen sapmalar) birdenbire çok büyük değerlere ulaştığı, maddenin özel hallerini irdeliyordu. Bu, hal değişimine yaklaşan bazı gazlarda gerçekleşir. Smoluchowski, "Bu basınç salınımlarını, tek yöne açılan bir kapıyı itmekte kullansak ne olurdu?" diye soruyordu. Basınç yeterince yükselince kapı açılacak; gerekenden düşük iken kapı kapalı kalacaktır. Bu, otomatikleştirilmiş bir Maxwell iblisi olurdu: Smoluchowski'nin tuzak kapısı düşük hızlı mole-

külleri geri çevirirken yalnızca yüksek hızlı (yüksek basınçlı) moleküllere izin verirdi. Smoluchowski'ye göre dönemin fizikçilerinden pek çoğu bu gibi kuramsal düzenekleri ikinci yasaya karşı ciddi bir engel olarak görüyorlardı. Ama Smoluchowski bu düşünceyi reddetmişti. Ona göre sorun, kapının ne kadar kuvvetli olduğundaydı. Eğer kapı çok zayıf ya da açılması kolay idiyse, gelişigüzel harekete tabi olur ve kendiliğinden gelişigüzel açılarak yapmaması gerektiği halde yavaş moleküllere geçit verir ya da hızlı moleküllerin yavaş havuza geri dönmesine izin verirdi. Eğer kapı, bu sorunu önleyecek kadar kuvvetli yapılabilseydi hepten açılmayabilirdi. Peki ya aradaki değerlerde? Kapı, güvenilemez olurdu. Bazen açılması gerektiğinde açılmaz ve bazen de açılmaması gerektiğinde açılırdı. Smoluchowski, bu makalesinde titiz bir hesaplama sunmamıştı ama böyle bir tuzak kapının asla çalışmayacağını ileri sürmüştü. İkinci yasa, otomatik bir tuzak kapı kullanılarak çiğnenemezdi.

Makalenin sonlarına doğru Smoluchowski, anlayışlı bir biçimde eğer yeterince beklemeyi göze alırsak ikinci yasanın çiğnenebileceğini belirtmiştir. Bu, ana karakter Bay Tompkins'in fizik öğrenen bir banka memuru olduğu, fizikçi George Gamow tarafından yazılmış roman dizisinde çok hoş bir biçimde örneklerle açıklanmıştır. Kitaplardan birisinde, Maxwell'in iblisinin Bay Tompkins'in içkisini kaynatması Bay Tompkins'in arkadaşı "profesör"ün heyecanla ne kadar şanslı olduklarını haykırmasına yol açmıştır: "Gelecek milyarlarca yıl boyunca, muhtemelen, yalnızca biz bu sıra dışı olayı gözleme şansına erişmiş olacağız!" İkinci yasa, sistemlerin çoğu zaman (genellikle "her zaman"a çok yakın) en olası hallerine doğru eğilim göstereceğini belirten istatistiki bir yasadır. Ne var ki, yeterince uzun zaman beklemeyi göze alırsak tuhaf şeyler şans eseri gerçekleşebilirler. Ben, rulette bir

milyon kazanabilirim. Soğuk kahveniz kendiliğinden kaynayabilir. Ama bu şeylerin gerçekleşmesi için çok çok uzun bir zaman beklememiz gerekir.

Ne kadar uzun? Bekleme zamanı olasılığa bağlıdır; o da sistemin büyüklüğüne bağlıdır. Işık mikroskobuyla gözlenebilecek kadar ya da daha büyük bir sistemde ikinci yasanın çiğnenmesi, nereden bakılırsa bakılsın, asla gerçekleşmeyecektir. Ne var ki, gerçekten küçük bir sistem (örneğin tek bir molekül) görünüşe göre ikinci yasayı görece sıkça çiğneyebilir. İblisi icat ettiğinde Maxwell'in işaret etmek istediği budur. Maxwell, ikinci yasayı çürütmek peşinde değildi. Basitçe, ikinci yasanın çok sayıda molekülden söz etmeye başladığımız zaman *belirdiğini* göstermek istemişti. Bu, istatistiki bir yasadır. Bu yüzden genelde ikinci yasayı tek tek moleküllere uygulamayız.

Smoluchowski küçük bir sistem, ikinci yasayı bir defalığına çiğneyebilse bile böyle küçük bir sistem, Maxwell'in iblisi gibi davranabilen bir alet üretemeyeceğinizi belirtmişti. Nedeni ise ikinci yasanın çiğnenmesinin gelişigüzel oluşu ve *tekrarlı* olmayışıdır. Dolayısıyla ikinci yasanın şöyle saptanması gerekir: Tekdüze bir ısı banyosundan *tekrar tekrar* enerji çekemezsiniz.

Ama bir defa olabiliyorsa, neden tekrarlanamasın? Hadi neden olamayacağına birlikte bakalım.

İblis ve Yeniden Başlatma Düğmesi

Maxwell'in iblisi uzun bir süredir fizikçilerin başını ağrıtmaktadır. Maxwell, bu küçük yaratığı ikinci yasanın yalnızca istatistiki olduğunu göstermek için icat etmiş olsa da daha sonrasında fizikçiler bunu, yasanın kendisine yönelik ciddi bir saldırı olarak gördüler. Mesleğin onurunu kurtarmak için iblisi kovmak farz olmuştu.

Türlü çözümler öne sürülmüştü. Fizikçiler Leo Szilard (1898-1964) ve Leon Brillouin (1889-1969) tarafından öne sürülen bir çözüm, moleküllerin hızlarını ölçme eyleminin kendisinin de bir miktar enerji dağılımı içereceğini belirtiyordu. Örneğin, iblis moleküllerin hızlarını ışık atımları ile ölçmeye çalışabilirdi; ama ışık enerjisinin tamamı geri kazanılamazdı. Dağılan enerji, entropide moleküllerin ayıklanmasından doğan azalmadan daha büyük bir artışa neden olurdu. Ne var ki, daha yakın zamanda bilgisayar bilimciler Rolf Landauer (1927-1999) ve Charles Bennett (d. 1943) enerji kaybı ya da entropi artışı olmaksızın da ölçümün *yapılabileceğine* dikkat çektiler. Bunun yerine, entropi artışı iblis bir sonraki ölçüme yer açmak için kısa dönemli belleğini sildiğinde gerçekleşirdi. İblis açmazına yönelik bu çözüm, entropi ile bilgi depolama arasında bugün hâlâ sıcak bir konu olan ilginç bir bağlantı ortaya koymuştur.

Maxwell'in iblisi, kayıp bilgi ile entropinin neden bağlantılı olduğunu ortaya koyar. 3. Bölüm'de de tartışıldığı üzere, dengedeki bir gazın entropisinin yüksek olmasının nedeni onun her biri gözlenen büyük ölçekli durum ile uyumlu olan (basınç, sıcaklık, vb.), pek çok farklı küçük ölçekli durumda olabilmesidir. Ama gazın hangi küçük ölçekli durumda olduğunu her an bilmeyiz. Oysa Maxwell'in iblisi sistemin küçük ölçekli durumunu *bilirdi* ve böylece, bir anlamda, sadece sistem hakkında daha fazla bilgiye sahip olarak (kayıp bilgiyi azaltarak) düzeneğin entropisini düşürürdü. Ama *tekrar tekrar* gazın küçük ölçekli durumu hakkında (gaz molekülleri çarpıştıkça bu sürekli olarak değişir) daha fazla bilgi edinmek amacıyla iblisin yeni bilgiye yer açmak için eskisini silmesi gerekir; bu da var olan bilgiyi yeniden kayıp bilgiye dönüştürür. Landauer ve Bennett'a göre bu silme, beraberinde bir enerji sarfiyatı getirir. Diğer bir deyişle, bilgiyi ne zaman silseniz enerjiyi dağıtmış ve entropiyi artırmış olursunuz.

İblis örneğinde bilginin silinmesi, sistemi özgün durumuna geri döndürerek ya da "sıfırlayarak" yeni bir ölçüm döngüsünün başlamasına olanak tanır. Ama bu silme entropide artışa neden olduğu için iblis, şeytani emeline yalnızca bir defa bedel ödemeksizin erişebilir. Bunu, tekrar tekrar "bedavaya" yapamaz. Aynısı makineler için de geçerlidir. Küçük bir makineye tekrarlı hareketler yaptırmak için bir sıfırlama basamağı gereklidir; zira makinenin yeni bir döngüye başlayabilmesi için önce özgün durumuna döndürülmesi gerekir. Ve entropide önlenemez bir artışa neden olan da bu sıfırlama basamağıdır.

Daha yakın zamanda bilgi silinmesine bağlı entropi artışının ikinci yasayı geçerli varsaydığı ve bu yüzden ikinci yasanın kanıtlanmasında kullanılamayacağına dikkat çekilmiştir. Bu, döngüsel bir sav olurdu. Bu yüzden Maxwell'in iblisi fizikçilerin uykularını kaçırmayı sürdürebilir. Maxwell'in şeytani meydan okumasının doğru yanıtı ne olursa olsun, benim şahsi hissim Landauer ve Bennett'in doğru yolda olduğudur. Kuşkusuz, bu gibi iblisler yoktur; olsaydı, Gamow'un Bay Tompkins öyküsündeki gibi bardaktaki viski kendiliğinden kaynardı. Bir iblis yapmak yönündeki tüm girişimler (bir devridaim makinesi tasarlayamamamızın da kanıtladığı üzere) başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Dahası, yakın dönemdeki nanoteknoloji temelli deneyler Landauer'in bilgi silinmesinin entropi yarattığı kestirimini onaylamıştır.

Dallas'taki 2011 Amerikan Fizik Derneği toplantısında Burnaby, Kanada'daki Simon Fraser Üniversitesi'nden Yonggun Jun ve John Bechhoefer, suda asılı duran 200 nm çapında bir plastik boncuk kullanarak bilgi depolayıp sildikleri bir deneyi anlattılar. Hareketlerini bir mikroskop ile gözlemleyerek her bir "bit" bilginin silinmesiyle ilişkili sıcaklık artışını hesaplayabilmişler. Bit, "evet" ya da "hayır" veya "1" ya da "0"

olarak tutulan bir bilgi birimidir. Landauer, bir bit bilginin silinmesiyle dağılan asgari bir enerji miktarı öne sürmüştü. Bu asgari değer, Boltzmann'ın entropi denklemi ile bitin silindiği sıcaklığın çarpımı olarak elde edilir. Jun ve Bechhoefer, salınan ısının bazen Landauer'in sınırından düşük olduğunu buldular. Bu, zaman zaman su moleküllerinin boncuğa destek olmasından kaynaklanıyordu. Ama bu yalnızca gelişigüzel anlarda gerçekleşmişti. Uzun vadede (yani istatistiki bağlamda) Landauer'in koyduğu sınır geçerliydi. Bu çalışma, Smoluchowski ve Maxwell'in ikinci yasanın çiğnenebileceği, ama bunun tekrar tekrar ve öngörülebilir bir biçimde olmayacağı önsezisini ustalıkla onaylamıştı. Bu, istatistiki bir yasadır.

Tersinirlik

1918'de Smoluchowski (ölümünden sonra) "Şans Kavramı ve Fizikte Olasılık Yasalarının Kökeni Üzerine" başlıklı bir makale yayınladı. Bu makale yayınlandığında, Maxwell ve Boltzmann'ın öncülük ettiği maddenin kinetik resmi zaten sağlam bir biçimde kabul görmüştü. Boltzmann'a çok eziyet etmiş olan eski karşıtlar bile atomların ve moleküllerin varlığını isteksizce kabul etmişlerdi. Şimdi olasılık, gazlar ve sıvılarla ilgili kuramların geçer akçesi olmuştu. Perrin'in elde ettiği, Einstein ile Smoluchowski'nin Brown Hareketi kuramını tamamıyla onaylayan deneysel sonuçlar atom karşıtlarına inen son darbeydi.

Fakat daha yirmi otuz yıl önce Boltzmann mücadeleyi kaybediyor gibi görünüyordu. Kinetik kuram ağır bir biçimde eleştiriliyordu. Başlıca itirazlardan biri, çok daha sonra Manfred Eigen tarafından "Loschmidt'in iblisi" adıyla anılacaktı. Boltzmann, ikinci yasanın doğrudan atomların hareket-

lerinin bir sonucu olduğunu göstermeye çalışmıştı; diğer bir deyişle, yalnızca birkaç atomun etkileştiği durumda bile ikinci yasa geçerli olurdu. Boltzmann'ın mantığı şöyleydi: Eğer moleküller başlangıçta bir tür düşük entropi halinde idiyseler, diğer moleküllerle çarpışmaları hızlarının dağılımını daha gelişigüzel hale getirir ve entropiyi artırırdı. Ne var ki, Boltzmann'ın bir arkadaşı olan Avusturyalı fizikçi Josef Loschmidt (1821-1895) bunun doğru olması halinde zamanı geri döndürürsek ne olur diye sordu. Loschmidt'in iblisi, dilediğinde zamanı geri sarabilen kuvvetli bir yaratıktı. Atomlar diyarında bir çarpışma, zamanı ileri de geri de sarsanız, fiziğin bilinen yasalarına uyar. İki bilardo topu düşünün: Oyuncuyu ve istekayı görmezden gelerek bir anlığına iki bilardo topunun çarpıştığı ana odaklanın. Eğer bu anı görüntüleyip seyircilere zamanda ileri ya da geri sararak izletseydiniz hangisinin hangisi olduğunu söylemek imkânsız olurdu. Basit esnek çarpışmalar, moleküller asarındaki çarpışmalar gibi, zamanda tersinirdir, yani ileri ve geri oynatıldıklarında aynı görünürler. Bunu akılda tutarak, zamanda *tersinmez* bir yasa, örneğin ikinci yasa, moleküllerin *tersinir* mekaniğinden nasıl çıkabilirdi?

Bu açmazın yanıtı iki katmanlıdır. Birincisi, moleküllerin daha olası bir hız dağılımına doğru gidebilmeleri için daha az olası bir dağılımla başlamaları gerekir. Bu bakımdan, ikinci yasayı iş başında görmemiz için başlangıçta hız dağılımının olasılıksız ve entropinin düşük olduğunu varsaymamız gerekir. Sonrasında çarpışmalar ortalığı karıştırıp dağılımı daha olasılıklı hale getirerek entropiyi artırmıştır. Böylece, tersinmezlik başlangıçtaki sistemin dengede olmadığı gerçeğinden geldi. Yani, azami entropi halinde değildi. Bunun, içinde yaşadığımız evrenin tümü açısından sonuçları vardır: Eğer geçmişten geleceğe doğru giden, zamanın oku diye bir şey varsa

bu ok yalnızca evren çok düşük entropili bir halde başladığı için orada olabilir. Yıldızlar, gökadalar, gezegenler ve canlılar o zamandan beri düşük entropiden geçinmektedirler.

Tersinmezliğin nasıl olup da parçacıkların tersinir mekaniğinden ortaya çıkabileceği sorusunun yanıtının ikinci kısmı, sistemin, çarpışmaların her zaman ortalığı karıştırabileceği kadar büyük olması (yeterli sayıda molekül içermesi) gerektiğidir. Bunun nedeni, büyük bir sistemde hareketlerin genellikle ilintisiz olması ve moleküler karmaşanın hüküm sürmesidir. Eğer durum buysa küçük sistemlerde ne olur?

1990'larda Los Alamoslu çekirdek fizikçisi Christopher Jarzynski, fiziği, özellikle de küçük moleküler sistemlerle ilgili araştırmaları motive eden bir eşitlik türetti. Jarzynski'nin eşitliği, küçük moleküler sistemlerin ikinci yasayı ne sıklıkla çiğnediklerini niceliyordu. Gördüğümüz üzere, küçük düzenekler yasayı gelişigüzel zamanlarda çiğneyebilirler ve bu yüzden, doğrusunu söylemek gerekirse, ikinci yasayı böyle küçük düzeneklere uygulamamamız gerekir. Bu uyarıyı bir yana bırakırsak, moleküller yasayı ne sıklıkla çiğnerler ve sonuçları neler olabilir?

İkinci yasa bize, sistemin herhangi bir yönlü hareketinin sürtünme direnci ile karşılaşacağını söyler. Sürtünme, çok sayıda gelişigüzel hareket eden molekülün herhangi bir gelişigüzel olmayan hareketten enerji aşırmasının sonucudur. Şimdi, zeki bir lise öğrencisinin enerjinin korunumunu henüz öğrendiğini düşleyelim. Bir dağın yüksekliğini ölçmek için ortaya bir taslak koyar: Dağdan aşağı başta hareketsiz olan bir top yuvarlayın ve zeminde hızını ölçün. Sonra da yüksekliği hesaplayın. Bu hesaplama, kolay bir alıştırmadır ve fiziğe giriş öğrencilerime buna benzer sorular veririm. Tüm yapmanız gereken, enerjinin korunumuna göre (top dağın tepesindeyken) baştaki kütleçekimsel enerjinin topun dağın eteğine

ulaştığı andaki son hareket enerjisine eşit olması gerektiğinin farkına varmaktır. Kütleçekimsel potansiyel enerji yükseklik ile doğru orantılıdır ve bu yüzden iki enerjiyi eşitleyerek yüksekliği çekebiliriz (sonuç da $h = v^2 / (2g)$ olur; burada h dağın yüksekliği, v topun zemindeki hızı ve g düşüşün ivmesidir). Ama uygulamada, ölçüm her zaman hesaplanandan az çıkar. Topun dağın dibindeki hareket enerjisi, dağın tepesindeki kütleçekimsel potansiyel enerjiden *biraz daha* azdır. Bunun nedeni, bir miktar enerjinin sürtünmeden dolayı ısı olarak kaybedilmiş olmasıdır. Şimdi zeki lise öğrencisi deneyi yüz defa tekrarlayarak doğruluğunu artırmaya karar versin. Yardımı olur muydu? Pek sayılmaz; sürtünme daima orada olacak ve her bir ölçüm kısa düşecektir.

Şimdi, gelin nanoölçekte benzer bir deney düşleyelim. Nanoölçeğe küçültülmüş olan liselimiz, deneyini nanoölçekli bir dağda yinelesin. Çoğunlukla ölçümleri büyük ölçekli ölçümlerle benzer bir eğilim gösterir: Hız, dağın yüksekliğinden beklenenden daha azdır, zira sürtünme etkili olmuştur. Ama nanoölçekli öğrencimizi hayrete düşürecek biçimde, nadiren ve tamamen gelişigüzel zamanlarda topun hızı beklenenden *fazladır*. Çevredeki gelişigüzel hareket eden atomlar topun hareketine direnç göstermenin aksine onu hareket yönünde iteler! Sistemler yeterince küçük olduklarında sistemi çevreleyen atomik karmaşanın sistemden enerji çalmak yerine ona enerji eklemesi olasılığı vardır; bu, nadir de olsa sonlu bir olasılıktır.

Dağın yüksekliğini bulmak için ölçümleri birleştirmenin bir yolu var mı? Evet, var. Jarzynski'nin eşitliği, ölçülmüş hareket enerjilerinin değil de kinetik enerjilerin üstel bir işlevinin ortalamasını alarak bunu olası kılar. Jarzynski moleküler karmaşa ve bu bakımdan sürtünmenin varlığında iki durum (örneğin dağın tepesi ve dağın tabanı) arasındaki enerji farkını kuramsal olarak elde edebileceğinizi göstermiştir.

Bu muhteşem kuramın deneysel olarak onaylanması çok uzun sürmedi: Lazer cımbızı kullanarak, California-Berkeley Üniversitesi'ndeki biyofizikçiler Carlos Bustamante ve Jan Liphardt bir halka barındıran tek bir RNA molekülünü çekip aldılar. Halka kapalı ve açıkken RNA molekülleri arasındaki enerji farkını bilmek istiyorlardı. Ama bu nasıl ölçülebilirdi? Her çektiklerinde değişik bir yanıt aldılar. Çevreleyen su molekülleri sürtünme yarattı ve açık ve kapalı halka durumları arasındaki ölçülen enerji farkını iki durum arasındaki gerçek enerji farkından daha büyük hale getirdi. Doğru yanıta yaklaşmanın bir yolu ölçümü çok ama çok yavaş yapmaktı. Yavaş gitmenin yararı olur çünkü yavaş hareket düşük hareket enerjisi ile ilişkilidir ve eğer hareket enerjisi düşükse çevredeki atomlar çok fazla enerji aşıramazlar. Ne var ki, halkayı yüksek hızla çektiklerinde ölçülen enerji farkı hemen her zaman düşük hızlarda ölçülen değerlerden daha fazlaydı. Sürtünme etkili olmuştu.

Bazen tesirini gördüler ve ölçtükleri enerji farkı halkayı açmak için gereken asgari enerjiden daha azdı. Bu, ikinci yasanın ara sıra çiğnendiği anlamına geliyordu. Bu nadir vakalarda, gelişigüzel hareket eden su molekülleri halkanın açılmasına direneceklerine yardım etmişlerdi. Jarzynski'nin denklemini uygulayan Bustamante ve Liphardt, tüm verilerinin ortalamasını aldılar ve doğru yanıt belirdi. Artık deneysel olarak onaylanmıştı: Nanoölçekli düzenekler termodinamiğin ikinci yasasını ara sıra çiğnerler. Moleküler ölçekte entropi bazen kendiliğinden azalabilir (gerçi doğrusunu söylemek gerekirse entropi bu ölçekte tanımsızdır). Bu olduğunda, zaman adeta tersine dönmüştür.

Bu bakımdan nanoölçekte Loschmidt ve Maxwell'in iblisleri kısa süreliğine uykularından *uyanabilir* ve ikinci yasayı görünüşte çiğneyebilirler. Yaşam makineleri, ikinci yasanın

çiğnendiği nadir ve öngörülemez durumlara bel bağlayarak karmaşadan düzen yaratan Maxwell iblisleri olabilirler miydi?

Devridaim

Önceki bölümde yöneltilen soruyu yanıtlamak adına; yanıt açık bir biçimde hayırdır. Eldeki tüm kanıtlar hayatın herhangi bir biçim veya varoluşta ikinci yasanın çiğnenmesine dayalı olmadığını gösterir. Bunu nasıl biliyoruz? Bunu Lavoisier, Helmholtz ve diğerleri vücudumuzun enerji üretmeyip aksine çarçur ettiğini gösterdikleri için biliyoruz. İnsan bedeninin verimliliği (yani, elde edilen fiziksel işin giren gıda miktarı ile kıyaslanması) yaklaşık yüzde 20'dir. Gerisi (gıda biçimindeki enerji girdisinin yüzde 80'i) ya doğrudan sürtünme yoluyla ısıya dönüşür ya da hücrelerimizdeki temel metabolik süreçleri sürdürmeye hizmet eder.

Helmholtz ve Mayer birinci veya ikinci yasanın canlılar tarafından çiğnenmesinin, bir devridaim makinesinin (enerjiyi yoktan var edebilen veya yüzde 100 verimlilikle çalışan bir makine) mümkün olduğu anlamına geleceğinin zaten farkındalardı. Her ikisi de imkânsızdır. Devridaim makinesinin olanaksızlığı, bir yaşam kuvvetinin varlığına karşı temel savı oluşturmuştur. Sav şöyledir: Eğer fiziksel enerji dönüşümünden gelmemiş ama bir biçimde yaşamın özünde olan gizemli bir kuvvet var olsaydı, böyle bir kuvvet yaşayan sisteme fazladan (gıda olarak sağlanmamış) bir enerji ekleyebilirdi. Helmholtz'ün *Royal Society Bildiri Kitapçığı*'ndaki ölüm ilanı ortaya benzer bir sav koyuyordu: "Helmholtz bu konu [enerjinin korunumu] hakkındaki tartışmaya 'yaşam kuvveti'nin doğasıyla ilgili düşünceler sayesinde çekilmişti. O, canlıların kimyasal veya fiziksel kuvvetlerin etkilerini kısıtlayıp özgür

bırakabilmesinin doğru olması halinde devridaim hareketinin gerçekleştirilebileceğine kendisini ikna etmişti." Yaşam kuvvetinin yoktan enerji üretebileceğini düşünmek çok saçma bir beklentiydi. On sekizinci yüzyılda bile, fizikçilerin çoğu bir devridaim makinesi yapılmasının (prensipte) imkânsız olduğuna sıkı sıkıya inanıyordu.

Yaşam kuvvetinin imkânsızlığı, bir Maxwell iblisinin imkânsızlığı ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Sav şudur: On sekizinci yüzyıl biyologları neden bir yaşam kuvveti öne sürdüler? Çünkü canlılarda görülen "yönlü etkinliği" açıklayabilecek bir şey arıyorlardı. Yaşam kuvveti, "amaç"ı, mütevazı hücrelerin ve mikropların içinde işliyor görünen "zekâ"yı açıklamanın bir yoluydu. Sonuçta bu yönlü etkinlik canlıyı oluşturan moleküllerin yönlü etkinliğinden kaynaklanıyor olmalıydı. Bu etkinliği kim yönetiyor olabilirdi? Sadece bir moleküler Maxwell iblisi, zekâsını kullanarak moleküllerin hareketlerine amaç aşılayabilirdi; böyle bir amaç aşılanmamış olsa bu hareketler anlamsız kalırdı.

Ama Maxwell iblisi imkânsızdır çünkü devridaim makinesi imkânsızdır. Bilgi ile entropi arasındaki, iblisin düşünce deneyi ile açıkça ortaya konmuş bağlantı, termodinamiğin istatistiki ikinci yasasının geçerli olması halinde zekâ, amaç ya da yaşam kuvvetlerinin moleküler ölçekte hiçbir etkisi olamayacağını gösterir. Maxwell'in iblisi akıl edilmeden önce Helmholtz ve Mayer yaşam kuvvetlerinin moleküllerin (hatta hücrelerimizin içinde barınan moleküllerin) oyununda bir yeri olmadığını zaten fark etmişlerdi.

Feynman Cırcırı

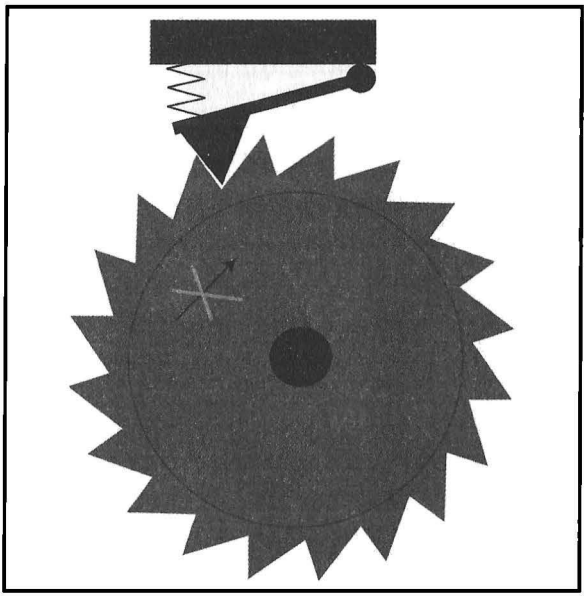
Tartışmamızın sonunda elimiz boş kalıyor: Yaşamın işlemesi için Maxwell iblisi *gibi* bir şey lazımdır; karmaşadan yönlü et-

kinlik yaratabilecek bir şey. Fakat Maxwell iblisi imkânsızdır. Böyle bir varlık veya nesnenin oluşu, devridaim makinelerinin ortaya çıkışına ön ayak olarak ikinci yasayı çiğneyecektir. İkinci yasanın görünüşte bazen çiğnenebildiği gerçeğinin de pek yararı dokunmaz çünkü yalnızca tekil moleküller tarafından, gelişigüzel bir biçimde ve tekrarlanmaksızın çiğnenebilir.

Açıkçası, ikinci yasa istatistiki bir yasadır; yani uzun sürelerin veya birçok molekülün ortalamasının sonucudur. Bu nedenle, kendisine zıt gidiyor görünen nadir olaylarca gerçekten çiğnenmiş olmaz. *Ortalamada* hiçbir şey, moleküller bile, ikinci yasayı çiğneyemez. Ve sadece arada bir çalışan ve genellikle yanlış yönde giden bir molekülden işlevsel bir makine yapamazsınız.

Marian Smoluchowski, Maxwell'in iblisinin, moleküler makinelerin gizemi ile yakından ilgili olan, basitleştirilmiş başka bir sürümünü geliştirdi. Maxwell'in iblisine bakarak tekdüze sıcaklığa sahip bir ortamda moleküllerin gelişigüzel hareketlerinden iş çıkaracak küçük bir makine geliştirmenin mümkün olup olmadığını merak etti. Atomların gelişigüzel ısıl hareketi, moleküler fırtına, enerji barındırır. Ama biz bu enerjiyi nasıl kullanabiliriz? Smoluchowski'nin makinesi bir ucuna cırcır bağlı bir telden oluşuyordu. Yıllar sonra, fizikçi ve Nobel Ödülü sahibi Richard Feynman, Smoluchowski'nin çalışmalarını okudu, onun makinesini verimini epeyce artırarak yeniden tasarladı ve böylece Feynman cırcırı ortaya çıktı.

Ne çeşit bir moleküler aygıt gelişigüzel moleküler hareketi yönlendirilmiş etkinliğe aktarabilirdi? Böyle bir aygıt, belirli yönlerdeki harekete izin verirken diğerlerini reddetmeliydi. Bir cırcır, yani asimetrik dişleri yaylı bir kilit mandalı tarafından engellenen bir çark, bu işin hakkından gelebilirdi (Şekil 5.2). Eski saatlerin kurma düzeneklerinde, kasnaklarda oldu-



Şekil 5.2. Cırcır yani asimetrik dişli çark ve kilit mandalı; bir yöndeki hareketi engellerken (bu örnekte saat yönü) diğer yöndekine izin veren (saatin aksi yön) basit bir aygıt.

ğu gibi, cırcırlar bulunur. Bir saatçinin oğlu olarak, kurmalı kol saatlerinde ufacık cırcırları pek çok defa görmüşlüğüm vardır. Cırcır, saatimizi kurmamıza izin verir ama kasnağı gevşetmemize izin vermez. Bir yönde kolaylıkla hareket etmeye izin verirken, ters yöndeki hareketi engeller. Belki, doğa moleküler fırtınadan bir yöndeki işine gelen itişlere izin verirken karşı yönden gelen olumsuz itişleri reddeden moleküler ölçekli cırcırlar yapmıştır. Bu, gelişigüzel hareketten enerji hasat etmek için çok güzel bir yol olurdu.

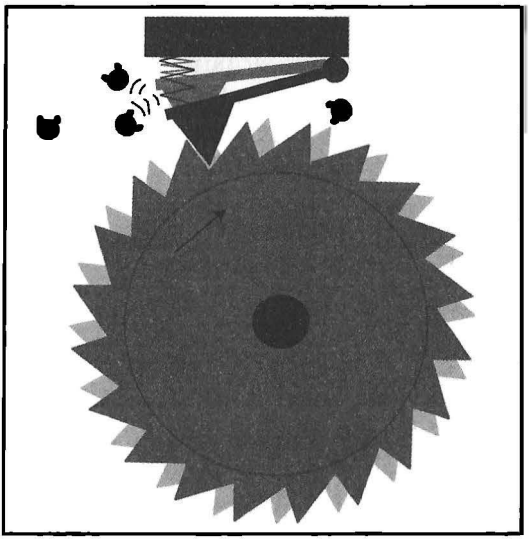
Eminim bu önermede bir bit yeniği olduğunu çoktan sezmişsinizdir. Sonuçta moleküler fırtınadan kullanılabilir iş çı-

karabilecek makineler, kapılar ya da iblisler yapmak yönündeki her girişim başarısız olmuştur. Ama elbette, bu umut verici görünüyor: Tek yapmanız gereken kilit mandalının sertliğini doğru ayarlamaktır; böylece çark ileri doğru kolayca dönerken geriye doğru hareket etmeyecektir. Bu düşüncede ne aksaklık çıkabilir ki?

Cırcır Çuvallar

Ne yazık ki, Feynman bu varsayımsal makinenin de olanaksız olduğunu gösterdi. Moleküler ölçekli cırcırı işletmek için mandalın yaylı olması gerekir ki çentikten çentiğe yukarı aşağı hareket etsin. Dişlinin dönmesine izin vermek için kilit mandalının bir diş yüksekliğine kadar itilmesi gerekir. Geri adım engellenmiştir çünkü mandalı dişin dik kenarının üstüne itmek için diğer yandaki yumuşak eğime kıyasla çok daha büyük bir kuvvet gereklidir. Enerji ya da iş iki durumda da aynıdır çünkü iş, kuvvet ile mesafenin çarpımına eşittir. Mandalı yumuşak eğimde yukarı itmek daha az kuvvet harcamayı ve daha uzun yol almayı gerektirirken dik kenardan yukarı itmek daha fazla kuvvet harcamayı ve daha az yol almayı gerektirir.

Dişli ve mandaldan oluşan makinenin moleküler fırtınadan enerji elde edebilmesi için mandalı, dişlerinin üzerinden aşırtmanın kolay olması gerekir. Mandal yayı, en başta mandalın hareketine izin vermek için çok zayıf olmalıdır. Aksi halde, dişliye denk gelen birkaç su molekülü, mandalı dişlerin üzerinden aşırtacak kadar kuvvetli olmayacaktır. Kilit mandalı, tıpkı dişli gibi, su molekülleri tarafından sürekli topa tutulmaktadır. Zayıf yay Şekil 5.3'te gösterildiği gibi mandalın gelişigüzel bir biçimde yukarı aşağı sekerek zaman zaman açılıp cırcırın geriye kaçırmasına izin verir. En fenası,



Şekil 5.3. Molekül ölçeğindeki bir cırcırda, moleküllerle yaşanan çarpışmaların dişliyi döndürmesine izin verecek kadar zayıf bir mandal yayı olması gerekir. Ama bu kadar zayıf bir yay aynı zamanda su moleküllerinin mandalı gelişigüzel açıp dişlinin geri kaçmasına izin vermesini mümkün hale getirir.

kilit mandalı iki diş arasındaki en alçak noktadayken yay en gevşek konumunda olduğu için mandal, zamanının çoğunu dişlerden birinin dik kenarına dokunur konumda geçirir. Tam mandal açılmışken istenmeyen bir darbe dişliyi geriye ittiğinde sıradaki dişin eğimine oturmak için çok uzağa gitmesine gerek yoktur ve yay, mandalı yokuş aşağı iterek dişliyi ters yönde döndürecektir!

Feynman, dişlinin ileri ve geri hareket etmesinin olasılıklarını hesaplamış ve her zaman eşit olduklarını bulmuştur. Dişli ileri geri hareket edecek, ancak herhangi net bir ilerleme yaratmayacaktır.

Ne kadar dahice tasarlanmış olursa olsun herhangi bir basit aygıt yalıtılmış, tekdüze sıcaklıklı bir banyoya sokulduğunda sadece gelişigüzel hareket edebilir. İster Smoluchowski'nin tuzak kapısı ister Feynman'ın cırcırı olsun, gelişigüzel ısıl enerjiden yönlü hareket elde edebilen, basit, edilgen makineler yapmanın olanaksızlığı termodinamiğin ikinci yasasının güçlü bir biçimde ortaya konuşudur.

Tekdüze sıcaklıktaki yalıtılmış bir havuzdan tekrar tekrar iş elde edilemez. Bunu başarabilen makineler yapmak mümkün olsaydı enerji sorunlarımız çözülmüş olurdu: Böyle makineler, çevremizdeki ısıyı düzenli mekanik enerjiye dönüştürürlerdi. Evinizin avlusuna böyle bir sistem yerleştirdiğinizi düşünün. Avludaki havayı soğuturken elde ettiği ısıyı da elektriğe çevirirdi. Bu, muhteşem olurdu ama ne yazık ki, hiç kimse termodinamiğin ikinci yasasını çiğneyememiştir. En azından on nanometreden daha büyük hiç kimse. Ve hatta on nanometrede bile bu, sadece rastgele ve nadiren gerçekleşir.

Yani, bir engele takıldık gibi görünüyor: Hücrelerimizin ufak makinelerle dolu olduğunu biliyoruz ve bunların moleküler ölçekte olmaları gerektiğini biliyoruz; ama henüz nasıl çalıştıklarını açıklamış değiliz. Yaşamın gizemli bir "termodinamiğin ikinci yasasına (cansız evrende koşulsuz hüküm süren bir yasaya) meydan okuma gücü" mü var? Yoksa hayatın moleküler düzeneklerinin mutlak güce sahip bu fizik yasasını çiğnemeden moleküler fırtınayı kullanmasına izin veren çok önemli bir bileşenini kaçırıyor muyuz?

6

Yaşamın Gizemi

Yaşamın belirleyici özelliği nedir? Bir madde parçasına ne zaman canlı denir? Benzer koşullar altında cansız maddenin "sürdürebileceğini" umduğumuzdan çok daha uzun süre "bir şey yaptığı», hareket ettiği, çevresi ile madde alışverişinde bulunduğu ve benzeri şeyleri yaptığı zaman.

— ERWIN SCHRÖDINGER, *YAŞAM NEDİR?**

Moleküller için gelişigüzel olmayan bir biçimde hareket etmek bir kasırgada yürümeye benzer: parçacığı istenilen bir yol boyunca iten güçler çevre tarafından uygulanan gelişigüzel kuvvetlere kıyasla cılızdır. Oysa hücreler gelişirler. Malzemeleri taşır, iyonları aktarır, proteinler inşa eder, oradan oraya gezinirler. Anarşiden düzen üretirler.

— R. DEAN ASTUMIAN, "MOLEKÜLLERDEN MAKİNELER YAPMAK"**

Moleküler makineler DNA'yı okuyup çevirerek yeni makineler yapar; hücrelerin üremesini, besin taşımalarını ve atıkları uzaklaştırmalarını sağlayan süreçleri işletirler ve

* Cambridge University Press'in izniyle alıntılanmıştır.
R. Dean Asumian'ın izniyle alıntılanmıştır. *Scientific American* (Temmuz 2001).

hücrenin biçim değiştirmesine ve hareket etmesine yardımcı olurlar. Bu küçük makineler hayatın temelidir. Ama bunlar nasıl çalışırlar?

Şimdiye kadar, moleküler makinelerin moleküler fırtınanın ortasında nasıl iş ürettiklerini açıklama çabalarımız termodinamiğin ikinci yasası tarafından engellenmiştir. Hiçbir makine, ne kadar dahice tasarlanmış olursa olsun, gelişigüzel ısıl enerjiyi doğrudan Jacques Monod'un deyişiyle "yönlendirilmiş, uyumlu etkinliğe" dönüştüremez. Neyi kaçırıyoruz?

İkinci Yasayı Çiğneyemezsin!

Hiciv gazetesi *The Onion*'da Eylül 2000'de yayınlanan bir şaka haberde endişeli seçmenler yasa yapıcılardan termodinamiğin ikinci yasasını yürürlükten kaldırmalarını talep ediyordu:

"'Neden her şeyin bozunmasındansa düzensizlik zamanla azalamasın?' 'Çok şey mi istiyoruz? Burada çocuklarımızın geleceği söz konusu!'" Eğer ikinci yasa, hain fizikçilerin bize dayattığı bir kaide olsaydı, Meclis bize ondan kurtulmamızı söyleyebilirdi. Ama biz (kötü bilim insanları hakkındaki komplo kuramlarına rağmen) o kadar güçlü değiliz. İkinci yasa, *kaçınılmaz* (küçük ölçekli) moleküler fırtınanın gelişigüzelleştirici gücünün *kaçınılmaz* (büyük ölçekli) bir sonucudur.

Fizikçiler Dean Astumian ve Peter Hänggi'nin 2002 yılında Physics Today'de Brown motorları hakkındaki makalelerinde açıkladıkları üzere, tipik bir moleküler motor saniyede yaklaşık 100 ila 1000 ATP molekülü kullanır. Bu, yalnızca 10^{-16} Watt (1 Watt = 1 Joule/saniye) ile işlemek anlamına gelir.

Sıradan bir araba motoru kadar güç üretmek için 10^{21} moleküler motor gerekirdi; bu akıl almaz büyüklükte bir sayıdır. Yine de, bu sayıda moleküler makine bir tatlı kaşığını ancak doldurur; 130 beygir gücü üretebilecek bir tatlı kaşığı! Mole-

küler makinelerin güç yoğunluğu (makinenin kapladığı hacim başına üretilen güç) çok büyüktür; metreküp başına yaklaşık 10^8 Watt. Bir araba motorunun güç yoğunluğu, bunun binde biri kadardır. Bu küçük makineler son derece verimlidirler: Daha önce belirtildiği gibi, bu makinelere dayanan organlarımızın hepsi yalnızca 100 Watt'lık bir güç "bütçe"si üzerinden çalışırlar, aynı (büyük) akkor bir ampul gibi.

Bu yeterince şaşırtıcı değilmiş gibi, bir de bu makinelerin barındığı dünyayı düşünün. Nanoölçekte, hiçbir şey moleküler fırtınadan kurtulamaz. Astumian ve Hänggi'nin ortaya koyduğu gibi, vücudumuzdaki her bir moleküler makineye her 10^{-13} saniyede bir hızlı hareket eden bir su molekülü çarpar. Her çarpışma ortalama $4{,}3 \times 10^{-21}$ joule enerji aktarır (enerjiyi Boltzmann sabitinin çarpılması ile belirleyerek ve vücut sıcaklığını Kelvin cinsinden alarak). Bu, 10^{-8} Watt'ın üzerinde bir ortalama güç girdisi demektir. Bir moleküler makinenin sadece yaklaşık 10^{-16} Watt güç üretebildiğini hatırlayın. Bu durumda, su moleküllerinin gelişigüzel çarpmalarından kaynaklanan güç girdisi, makinemizin güç çıktısından yüz milyon kat daha büyüktür! Durumu daha anlaşılır kılmak için bunu fırtınadaki bir arabayla karşılaştıralım. Bir arabaya, arabanın motorunun üretebileceğinden yüz milyon kat daha fazla güç aktarmak için bir fırtınanın ne kadar güçlü olması gerekirdi? Arabanın hava direncini hesaba katarak, moleküler fırtınanın bizim çaresiz moleküllerimiz üzerindeki etkisine sahip olması için, fırtınanın saatte yüz on bin mil gibi inanılmaz bir rüzgâr hızına erişmesi gerekir! Bir Hummer'ın bile böyle bir fırtınada pek yol alacağını sanmam.

Moleküler Hummer

Büyük ölçekli bir fırtına ile bizim moleküler fırtına arasındaki önemli bir fark moleküler fırtınanın moleküler yön ayırt et-

memesidir. Diğer bir deyişle, bir su molekülü ile geçekleşen her çarpışma gelişigüzel bir yönden gelmektedir. Bizim günlük yaşamda karşılaştığımız fırtınalar az çok sabit yönde eserler ve kullanılır iş çıkarabilirler (örneğin, bir yelkenli veya bir rüzgar değirmeni). Nanoölçekte, moleküler fırtına yalnızca ezici değil, aynı zamanda tamamen gelişigüzel bir kuvvettir. Moleküler fırtınanın kullanılır bir iş için nasıl bir enerji kaynağı olarak hizmet edebileceğini düşlemek zordur.

Ne yapmalı? İki olasılık düşünebiliriz. Çevredeki ısıl karmaşaya direnirken küçük, hesaplanmış adımlar atan inanılmaz sağlam bir makine, bir tür moleküler süper-Hummer inşa edebiliriz. Ya da, "bükemediğin bileği öpeceksin" ilkesine göre çalışan "rahat" bir makine yapabiliriz. Yani, gelişigüzel çarpmalardan istenen yöndeki itmeleri "hasat" edebilecek bir makine yapılabilir. İkincisi 5. Bölüm'deki yaklaşımımızdır, fakat bu yaklaşım şimdiye kadar acınası biçimde başarısız olduğundan, ilk seçenekle yola devam etmek çekici gelebilir. Ama süper-Hummer seçeneği de açıkça işe yaramaz. Bu çeşit bir moleküler makinenin moleküler fırtınaya dayanacak derecede "sıkı" yapılması gerekmektedir. Eğer o kadar sıkı olursa, nasıl hareket edebilir ki? Hareket etmek istediği zaman yaylarını gevşetmesi gerekir. Ama yaylar gevşetilirse, makine aynı daha önce olduğu gibi fırtınada itilip kakılacaktır. Dahası, en başta hareket nereden geliyor? Görüldüğü gibi, moleküler ölçekte var olan *tek* hareket moleküler fırtınadır. Bir moleküler makine bu harekete direnirken nasıl ilerleyebilir?

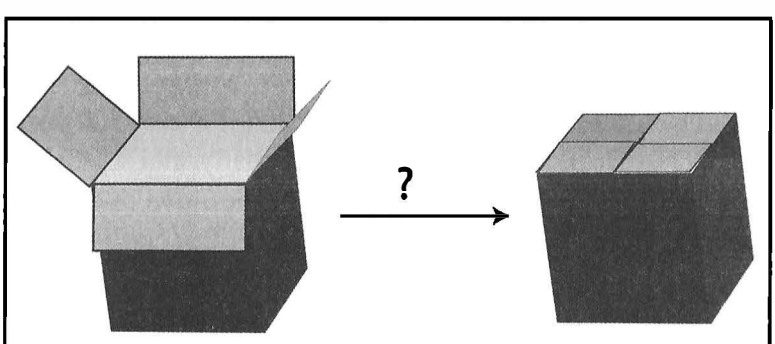
Sıkı ya da gevşek olmasından bağımsız olarak, makinemizin bir şekilde moleküler fırtınayı ehlileştirmesi gerektiği anlayışı ile devam edelim. Moleküler makinelerin ısıl hareketin karmaşasını nasıl ehlileştirdiklerini anlamak için, öncelikle bu makinelerin aslında neye benzediğini öğrenmemiz gerekir. Onların gerçekten, anlaşılır benzetmeler olarak kul-

landığımız cırcırlar veya araba motorları olmadıkları açıktır. Moleküler makineleri tanımlamak için, biraz biyokimya öğrenmemiz gerekir.

Sığmak İçin Sıkış

Moleküler makineler yer değiştirme yaratabilmek için biçimlerini değiştirmek zorundadırlar. Bu nasıl olabilir? İyi bir başlangıç noktası olarak kimyasal tepkimelere bakılabilir: Kimyasal tepkimelerde moleküllerin yeni yollardan bir araya gelebilmeleri için biçim değiştirmeleri gerekir. Bu biçim değişiklikleri, serbest enerjideki düşüşten güç alırlar.

Kimyasal tepkimelerin tek itici gücü bu olsaydı, bir çırpıda gerçekleşirlerdi. Ancak, birçok kimyasal tepkime zaman alır. Arabanız bir gecede pas yığını haline gelmez ve sütünüz kartonunu açar açmaz kesilmez. Kimyasal tepkimelerin hızı *etkinleşme enerjisi* kavramı ile açıklanır. Herhangi bir kimyasal tepkime sırasında, moleküllerin artık özgün biçimlerine sahip



Şekil 6.1. Karton bir kutuyu kapatmak. Hem açık hem de kapalı kutu kararlı hallerdir ama birinden diğerine geçmek için dört kapağın hepsini aynı anda itmemiz gerekir; bu süreç düzeneğin oldukça kararsız ve tuhaf bir halidir.

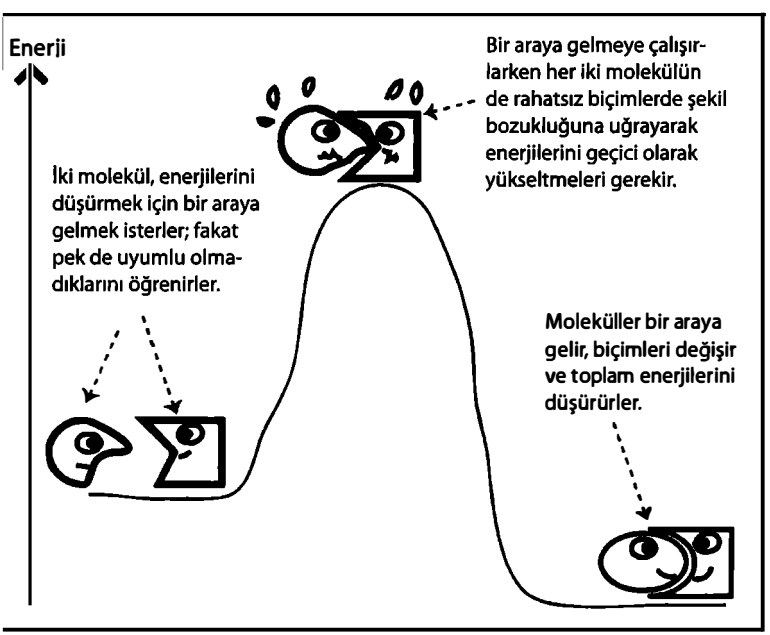
olmadıkları ama son şekillerini de almamış oldukları garip bir an vardır. Başlangıçtaki durumları (tepkimeye girenler) ve sondaki durumları (ürünler) arasında bir geçiş durumu oluştururlar. *Geçiş durumu* olarak adlandırılan bu ara devre moleküller için rahatsızlık vericidir.

Şekil 6.1, geçiş durumunu bir karton kutunun kapanışı ile göstermektedir. Bir karton kutuyu kapatmanın bir yolu dört kanadın her birini komşusunun üstüne denk getirmektir. Bunu yapmaya çalışırken, dört kapağı birden aşağı itmeye çalıştığım zor bir an gelir; bir tanesi her seferinde fırlar. Ama fırlamayı engellemeyi başaracak olursam kutu kapanır son derece mutlu olur.

Bu bakımdan, iki rahat (düşük enerjili) durumumuz vardır. Başlangıç durumu: kutu (ve kapaklar) açık; son durum: kutu kapalı. Bir durumdan diğerine geçmek için rahatsız, yüksek enerjili bir ara durumdan geçmemiz gerekir (şekilde soru işareti ile gösterilmiştir).

Aynısı kimyasal tepkimeler için de geçerlidir. Tepkimeye girenler, ürünlere dönüşürken, moleküller son biçimlerini alıp rahatlamadan önce kimyasal bağlar bir anlığına zorlanır. Bu zorlanmış durum dönüşümdeki hem özgün hem de son durumdan daha yüksek enerjiye sahiptir. Şekil 6.2'de iki molekül pek de uyumlu değiller ama birleşip daha düşük enerjili bir bileşik molekül oluşturmaya "çabalıyorlar" Eğer iki molekül birleşirse enerjilerini düşürebilirler ama önce geçiş durumunu aşabilmeye yetecek enerjiyi edinmeleri gerekir. Karton kutu örneğinde kanatları yerlerine oturmalarına yetecek kadar kuvvetle bastırmam gerekmişti. Diğer bir deyişle, dört kanadın birbirini ittirdiği garip düzenlemenin ötesine geçebilmek için yeterli enerjiyi sağlamam gerekmişti. Kimyada geçiş durumunu aşmak için gerekli olan enerjiye *etkinleşme enerjisi* denir. Bu, kimyasal bir tepkimeyi etkinleştirmek için gereken en düşük enerji miktarıdır.

Moleküller, gerekli etkinleşme enerjisini nereden elde eder? Moleküler fırtınadan! Geçiş durumunu aşmak için gereken itici güç küçük, hızlı moleküllerin (genelde su molekülleri) tepkimedeki moleküllere doğru itişi sağlamak üzere gelişigüzel çarpmalarından gelir. Şanslılarsa bu itiş, moleküllerin yeni biçimlerine oturmalarına neden olur. Tabii ki, çarpan su moleküllerinin her biri yeterli enerjiye sahip değildir ya da tepkimedeki moleküllere doğru yönde çarpmazlar. Kimyasal tepkimeler zaman alır; doğru itişin denk gelmesini beklememiz gerekir ve yüksek enerjili çarpışmalar düşük enerjililere göre çok seyrek olduklarından gereken etkinleşme enerjisi yükseldikçe tepkimenin gerçekleşmesi daha uzun zaman alır.

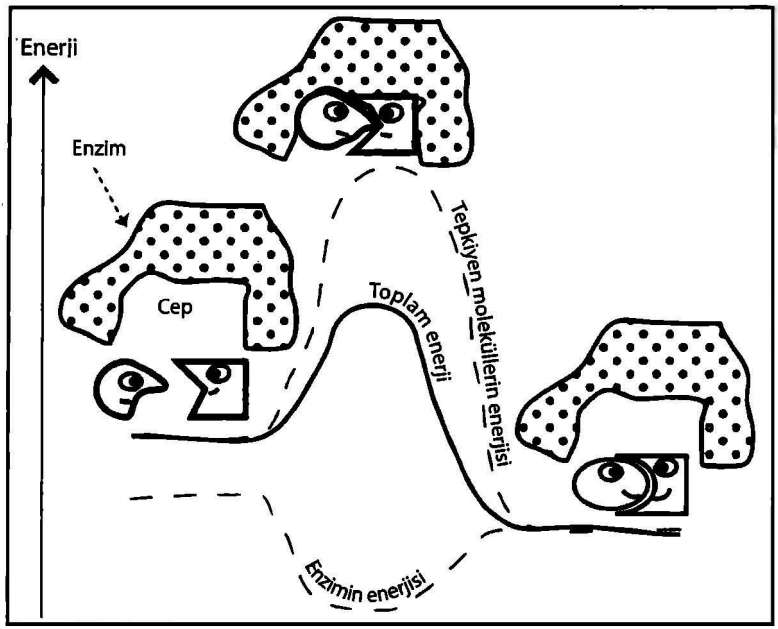


Şekil 6.2. Kimyasal tepkimeler "rahatsız" geçiş halleri kanalıyla ilerler.

Etkinleşme engelinin yüksekliğini ne belirler? Özetle, moleküllerin ilk durumdan son duruma geçerken ne kadar rahatsız olduklarına bağlıdır. Eğer bir molekülü, çok sayıda bağını yeniden düzenleyerek değiştirmeye çalışırsam epey bükme ve burma gerektirecektir ve etkinleşme enerjisi yüksek olacaktır. Diğer yandan, tek bir atomu azıcık yeniden düzenlemek yetecekse etkinleşme enerjisi düşük olabilir.

Hücrelerdeki önemli kimyasal tepkimelerin pek çoğu devasa etkinleşme enerjisi gerektirir. Bu dönüşümler o kadar ağır bir hızda seyreder ki muhtemelen hücrelerimiz bunların bir döngüsünü tamamlamadan ölmüş olurduk. Bu sorunu çözmek için doğa çok zekice bir çalım icat etmiştir. Gelin işi geçiş durumunu daha rahat hale getirmek ve böylece etkinleşme enerjisini düşürmek olan bir yardımcı molekül düşleyelim (Şekil 6.3). Etkinleşme enerjisi düşürülürse tepkimenin hızı artar. Bu gibi yardımcı moleküllere enzimler denir ve onların katılımı, tepkimeleri kat be kat hızlandırır. Enzimler, biyolojik kolaylaştırıcılardır; bunu, arabanızda zararlı egzoz gazlarının yükseltgenmesini hızlandıran katalitik konvertör ile karşılaştırabilirsiniz.

Enzimlerin, substrat (tepkimedeki moleküller) üzerine oturacak şekilde özel yapım bir cebi bulunur. Başlangıçta substrat, enzimin cebine bağlandığında tam bir eşleşme gerçekleşmez ama enzim ve substrat yavaş yavaş biçim değiştirip daha rahat bir şekilde kenetlenmeye başladıkça enzim, substratı geçiş durumuna doğru itekler. Substrat geçiş durumuna geldiğinde enzim mutludur (düşük enerjidedir) ve düzeneğin toplam enerjisi (geçiş durumunun enerjisi artı enzimin enerjisi) azalmıştır (Şekil 6.3). Geçiş durumunun enerjisi halen son ürün durumunun enerjisinden daha yüksek olduğundan geçiş sürecinin ürüne dönüşmekten başka bir seçeneği yoktur. Ürün, enzimin cebinde rahatsızdır ve salıverilir.



Şekil 6.3. Bir enzimin, bir geçiş haline yardımcı olarak kimyasal tepkimenin etkinleşme enerjisini düşürüşü.

Enzim, eski biçimine döner ve dönüştürmek üzere yeni bir substrat almaya hazırdır.

Enzimlerin muazzam kolaylaştırıcı becerilerini anlatmak adına fosfoglükomütaz adlı bir enzimi ele alalım. Bu enzim, sindirilemez bir çeşit şekeri daha tüketilebilir hale dönüştürür. Dönüşüm sürecini bir trilyon defa hızlandırarak bir fosfoglükomütaz molekülü saniyede yüz şeker molekülünü dönüştürebilir. Bu enzim olmadan tek bir şeker molekülünü dönüştürmek üç yüz yıl sürerdi!

Enzimler proteinlerden (4. Bölüm'de anlatıldığı üzere karmaşık biçimlere katlanmış uzun aminoasit zincirlerinden) oluşan büyük moleküllerdir. Proteinler bir kutu Lego gibidir:

Aminoasitlerin dizilişi değiştirilerek hemen her biçimde protein inşa edilebilir. Evrimin deneme yanılmasını kullanarak her biri belirli bir tepkimeyi kolaylaştırmak üzere özel üretilmiş sayısız enzim evrimleşmiştir.

Moleküler makineler özel bir tür enzim olarak düşünülebilir. İleride anlatılacağı üzere, enzimlerden evrimleşmişlerdir. Enzimler ile moleküler makinelerin pek çok ortak özelliği vardır. Bir bakıma enzimler de makinelerdir: Moleküllere bağlanıp, onları dönüştürüp serbest bırakmaları özgül yapılarından ötürüdür ama aynı zamanda moleküler fırtına tarafından itilip kakılmalarının bir sonucudur. Bir molekül, enzimin bağlanma cebine nasıl yerleşeceğini bilmez. Bunun yerine, su moleküllerinin sürekli topa tutuşu (yaklaşık 10^{-13} saniyede bir) molekülü hızla döndürür ve biçimini bozar. Bir milisaniye sonra molekül, şans eseri, enzimle birleşebilecek doğru biçim ve yönelime dövülmüştür. Eğer molekülün doğru yönelim ve biçimi bulabilmesine hayran kaldıysanız bir milisaniyede ortalama bir molekülün su molekülleri ile on milyar çarpışma yaşadığını göz önünde bulundurun.

Denetimi Elden Bırakmamak

Enzimler muhteşem moleküllerdir ama canlı değillerdir. Her şeyden önce, hareket etmezler. Bir susbstrat molekülüne bağlanırken biraz biçim değiştirirler ama bu bir moleküler makine işletmek için pek yeterli görünmüyor.

Biyokimyanın erken dönemlerinde biyologlar hücreyi, çeşitli tepkimeleri kolaylaştıran enzimleri içeren bir torbacık gibi kurguluyorlardı. Hücre, küçük bir tepkime kabından öte bir şey olarak düşünülmüyordu. Ne var ki, enzimlere molekülleri yapmak ve yıkmak için tam yetki verilse hücrelerin uzun süre yaşayamayacağı kısa zamanda anlaşılmıştı. Hücre-

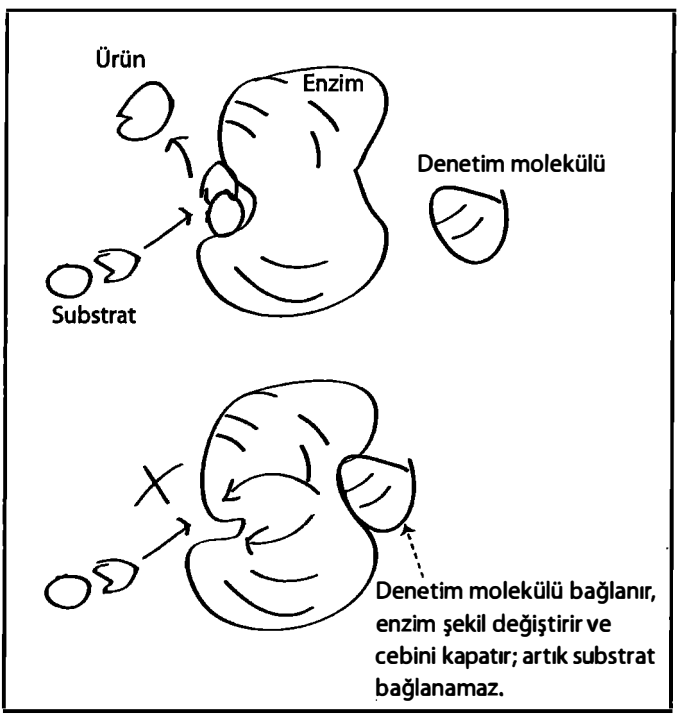
lerin, çevrelerine tepki vermeleri gerekir. Hücrelerin, kararlar verebilmeleri gerekir.

Bilgisayarlar karar verebilir çünkü bilgisayar yazılımları "EĞER ... İSE, O HALDE ..." gibi mantıksal komutlar içerir. Bir hücrede, mantıksal kararlar moleküler bir ölçekte alınır. Bu hücresel yazılımın bir kısmı tabii ki, değişik proteinlerin nasıl yapılacağının ve bir bedenin gelişimi içerisinde nasıl yönlendirileceğinin bir kalıbını içeren DNA'dır. Ama DNA hücrenin gündelik işleyişini denetlemez. Bu görev enzimler ve moleküler makinelerce yerine getirilir. Bu durumda asıl soru şudur: enzimler nasıl hesap yaparlar?

Bu gizem, Paris'te Pasteur Enstitüsü'nde Jacques Monod laboratuvarında genç bir yüksek lisans öğrencisi olan Jean-Pierre Changeux (d. 1936) tarafından 1960'ların başında çözülmüştür. L-treonin deaminaz olarak adlandırılan bir enzimin bir aminoasit olan susbstratı treonini yıkışını incelerken enzimin etkinliğinin, başka bir amino asit olan izolösin molekülünün var olması halinde engellendiğini bulmuştur. Enzimlerin kısıtlanmaları daha önce de görülmüştü ve enzim, substratından farklı bir moleküle bağlandığı zaman bunun meydana geldiği düşünülmekteydi. İstenmeyen misafirlerin, enzimin bağlanma cebini tıkadığı bu sürece rekabetçi baskılama denir. Bildik bir örnek karbonmonoksit zehirlenmesidir: Bu gaz hemoglobinin (kırmızı kan hücrelerimizdeki oksijen taşıyan proteinler) oksijen bağlayıcı cebine öyle kuvvetli tutunur ki bir daha serbest kalamaz. Oksijen ile karbonmonoksit arasındaki rekabette, karbonmonoksit açık ara kazanır. Kurbanın kanındaki hemoglobin karbonmonoksit ile bir defa tıkandıktan sonra oksijen aktarımı durur ve çaresiz kurban boğulur.

Ancak, Changeux'nun deaminazı rekabetli baskılama düzenine uymuyordu. Enzim üzerinde izolösinin bağlandığı

bölgeyi kapatmaya çalıştığında enzim enzimatik etkinliğini baskılanmadan sürdürmüştü. İzolösin bağlanma bölgesi ile kolaylaştırıcı cep bir ve aynı olsaydı (hemoglobinde olduğu gibi) enzimin, treonin substratına bağlanma yeteneğinin engellenmiş olması gerekirdi. Changeux, enzimin *iki* bağlanma cebi olduğu sonucuna ulaştı: biri treonin (enzimin substratı) için ve diğeri enzimin etkinliğini düzenleyen izolösin için.



Şekil 6.4. Üst: allosterik bir enzim iki küçük molekülü (substratları) yapısındaki uygun bir cebe (etkin bölgesi) bağlayarak daha büyük bir molekül oluşturmak üzere birleştirir. Bir denetleme molekülü (sağda) enzime yaklaşır. Alt: denetleme molekülü kendisini enzimin denetleme bölgesine eklemiş. Bu, enzimin biçim (üç boyutlu yapı) değiştirmesine ve etkin bölgesini kapatmasına neden olmuştur. Denetleme molekülü bağlı kaldığı sürece enzim katalitik etkinliğini durdurur.

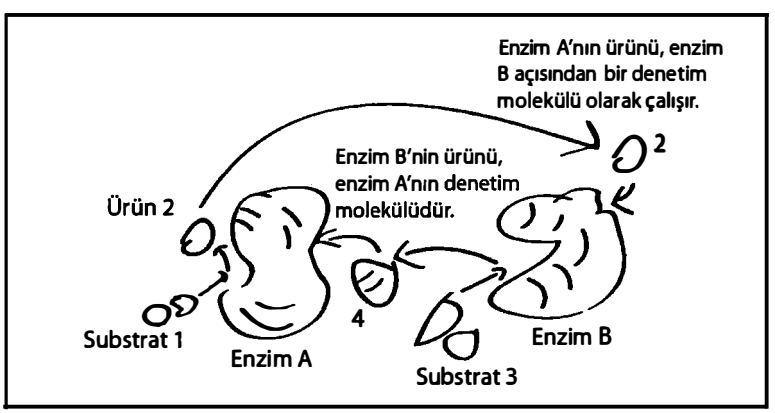
Özyaşamöyküsü makalesi "Alosterik Reseptörler: Elektrikli Orgdan Bilişe"de Changeux, şaşırtıcı bulgularını ilk defa 1961'de Cold Spring Harbor Nicel Biyoloji Kurultayı'nda sunduğunu hatırlatır. Orada, yoldaşı bilim insanlarına "bu iki bölge arasındaki etkileşim dolaylıdır ve protein molekülünün biçimsel değişimi ile iletilir" demiştir. Diğer bir deyişle, izolösinin bağlanması enzimin biçiminde büyük bir değişime neden olarak substrat için olan bağlanma cebini kapatıp enzimi, treonin moleküllerini işleyemez hale getirmiştir (Şekil 6.4). İzolösin bir denetim molekülü gibi davranmıştı; sanki bir bilgisayar yazılımında "EĞER izolösin var İSE, O HALDE treonini işleme" diyen bir satır vardı.

Canlı hücrelerdeki enzimatik etkinliğin çoğu bu gibi denetim moleküllerinin bağlanması ve serbest kalması ile denetlenir. Bir denetim molekülünün bağlanması, enzimin bir parçasının diğer parçalarına göre hareket ederek biçim değiştirmesine neden olur. Bu biçim değişikliği, enzimin susbstratına bağlanan cebi açarak ya da kapayarak kolaylaştırıcı etkinliğini artırabilir veya azaltabilir. Denetim molekülleri enzimi tamamen kapatabilir de. Denetim molekülünün enzimin biçimini ve etkinliğini değiştirme becerisine Changeux'nun tez danışmanları, Jacques Monod ve François Jacob tarafından *alosteri* adı verildi.

Elinizde alosteri varsa, bir hücrede kimyasal tepkimeleri denetlemek üzere çok sayıda kullanışlı düzeneği uygulamaya geçirebilirsiniz. Bir enzimin, kendisinin denetim molekülü olarak da işlev gören bir ürün ortaya çıkardığını düşünün. Bu, bir ürünün kendi üretimini düzenlemesine olanak tanırdı. Bu gibi dairesel düzenekler geribesleme döngüleri olarak bilinir. Tanıdık bir geribesleme döngüsü, hoparlör ile gitar manyetiği arasındaki geribildirimdir; bir rock gitaristi, gitarını bir hoparlöre karşı tuttuğunda hoparlörden gelen ses gitar tellerinin titreşmesine neden olur. Bu, manyetik tarafından alınır,

yükseltilir ve hoparlöre geri beslenir ve böylece şimdi daha da yüksek bir ses ortaya çıkıp gitar tellerini daha da titreştirir. Sonuç sadece yükselticinin gücüyle sınırlanan gittikçe yükselen bir çığlıktır. Bu çeşit geribesleme, *olumlu geribesleme* olarak bilinir; ürünün (bizim örneğimizde ses), daha çok ürün üretimini pekiştirdiği bir geribesleme. Olumlu geribesleme, hücrelerde de vardır; bazı enzimler ürününün varlığında üretimi hızlandırır. Sonuç; üründe hızlı, patlayıcı bir artıştır (tepkimeye giren maddeler bitene kadar). Bu, hücre dış bir uyarana yanıt olarak bir kimyasalı çok hızlı bir biçimde üretmesi gerektiğinde yararlı olabilir.

Daha sık görülen durum bunun tersidir: *olumsuz geribesleme*. Bir örneği Changeux'nun L-treonin deaminaz'ıdır. Bu enzim, treoninden başlayarak izolösin yapmak için birlikte çalışan bir dizi enzim arasında yer alır. Ama izolösin aynı



Şekil 6.5. Moleküler bir geribesleme döngüsü. Enzim A'nın ürün 2'si, enzim B için bir denetleme molekülü olarak iş görürken enzim B'nin ürün 4'ü enzim A için bir denetleme molekülü olarak iş görür. Denetleme molekülünün enzimler üzerindeki etkisine bağlı olarak (kısıtlama veya yükseltme) bu yolla pek çok program gerçekleştirilebilir.

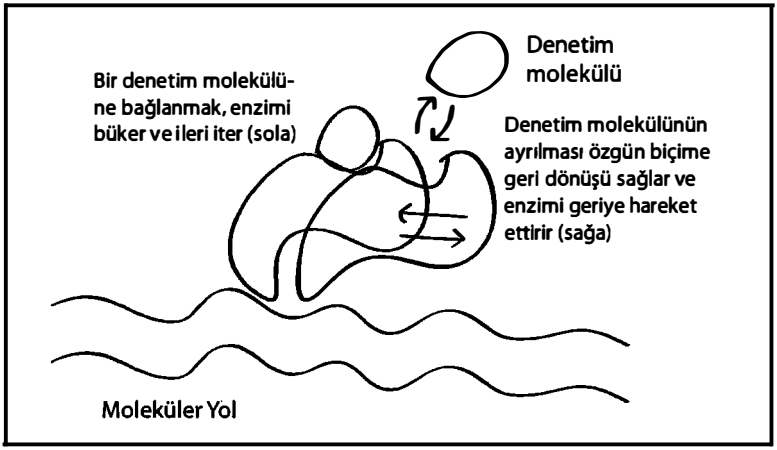
zamanda L-treonin deaminaz'ın etkinliğini baskılayan denetim molekülüdür. Bu nedenle ürün, kendi üretimini baskılar. Sonuç olarak enzimler ancak ürün moleküllerinin daha fazla üretim yapılmasını engellemelerine yetecek kadar ürün çıkarabilirler. Bu, bir hücrede bir ürün molekülünün miktarının üst sınırını denetlemenin hoş bir yoludur.

Etkileşim halindeki enzimlerden oluşan engin ağlar içeren daha karmaşık düzenler de vardır. Bir enzimin ürünü başka bir enzimin denetim molekülü olarak hareket edip onun etkinliğini artırabilir ya da baskılayabilir. Bu ikinci enzimin ürünü ise ilk enzimi denetleyip Şekil 6.5'te gösterildiği gibi iki enzimli bir geribesleme döngüsü oluşturabilir ya da ürün, üçüncü bir enzimi etkiler, o da dördüncüyü vs. Karmaşık geri bildirim döngüleri ve karşılıklı yükseltme veya baskılama düzenekleri canlı hücreleri zeki gösteren hesaplama gücünü sağlar.

Enerji Yüzeyinde Gezinmek

Alosterik enzimler bizi moleküler makineleri anlamaya bir adım daha yaklaştırır. Bir substrata ya da denetleme molekülüne bağlanan bir enzimin biçimindeki büyük değişim bir hareket çeşidi olarak görülebilir. Örneğin, alosterik bir enzimi moleküler bir yola yerleştirdiğimizde bu biçim değişikliğinin ileri yönlü bir hareket meydana getirdiğini düşleyebiliriz: Enzim her biçim değiştirdiğinde yolu iterek kendisini ileri atar (Şekil 6.6). Genellikle uzun protein tellerinden oluşan iplikler ve iplikçikler moleküler yollara örnektir. Bunun bir örneği, 4. Bölüm'de zaten karşılaşmış olduğumuz aktindir. Diğer bir örnek DNA'dır ve gerçekten de DNA'nın üzerinde tıpkı bir lokomotifin tren yolunda yaptığı gibi ilerleyen özelleşmiş makineler vardır.

Ne var ki, bir moleküler makine basitçe bir yola sabitlenmiş alosterik bir enzim değildir. Bu düşüncedeki sorun, alosterik



Şekil 6.6. Moleküler bir yola bağlı alosterik bir enzim. Denetleme molekülü bağlanırken enzim biçim değiştirrir ve enzimi yol üzerinde ileri iter. Ne var ki, denetleme molekülünün ayrılması enzimi geriye geldiği yere iter. İleri gitmek için geçici olarak yoldan ayrılması gerekirdi.

bir enzimin kesin bir biçimde iki durumda var olmasıdır: Denetleme molekülü takılıyken A biçiminde ve denetleme molekülü ayrılmışken B biçiminde. Enzim, bir denetleme molekülüne bağlanırken kendisini ileri itebilir ama denetleme molekülü ayrılır ayrılmaz eski biçimine döner ve geriye gider. Tıpkı 5. Bölüm'deki cırcırımız gibi, molekül ileri geri kıpırdanır ama hiç yol alamaz. İleri gitmek için makinenin, geri adım sırasında yola tutunuşunu gevşetmesi ve yalnızca ileri adımda tutunması gerekir. Ama makine, yola tutunuşunu gevşetirse moleküler fırtına onu sürükleyip götürecektir.

Nanoölçekte Sisifos

Görünen o ki özgün sorunumuza döndük ve bu yüzden bir adım daha eklemeliyiz: Makinenin, geri yönlü hareket mey-

dana getirmeden kendisini özgün biçimine döndürmesi gerekir. Tıpkı Maxwell'in iblisi gibi, makinenin yeniden başlatma düğmesine gereksinimi vardır. Hatırlayın, Mawell'in iblisi ancak belleğini silmek yani yeniden başlamak için dışarıdan enerji alırsa işleyebilirdi.

Moleküler bir yolda ilerleyen bir makine için yeniden başlatma tuşu geçici olarak yoldan ayırmak, denetleme molekülünü serbest bırakmak ve makinenin biçimini sıfırlamaktan oluşurdu. Sonra makine yola yeniden bağlanır, bir denetim molekülüne bağlanır ve kendisini yolda iteler ve döngüyü tekrarlardı. Bu düşünce bizi birkaç soru ile baş başa bırakır: Neden makinenin hareketi, sıfırlama adımında gelişigüzel bir hal almaz? Yani, ayrılmış durumdaki makine neden moleküler fırtına tarafından sürüklenip gitmez? Ve bir sıfırlama adımının varlığı moleküler makinelerin ikinci yasayı nasıl çiğnediklerinin açıklanmasına nasıl yardımcı olur?

Bu soruları yanıtlamaya çalışmak için gelin tanrılar tarafından (ilahları kızdıran bir gaf yüzünden) büyük, ağır bir kayayı yalçın bir yamaçtan yukarı sonsuza kadar itmek cezasına çarptırılmış efsanevi kahraman Sisifos'a bakalım. Eğer kayayı yamacın tepesine ulaştırabilirse, kefareti ödenmiş olacaktı. Ne yazık ki, kayası lanetliydi: Yamacın tepesine her yaklaştığında kaya ellerinden kayıp geriye aşağı yuvarlanıyordu. Bir kayayı itmeyi bu kadar zor kılan nedir? Bir şeyi yokuş yukarı ittiğimizde sürtünme ve yer çekimini yenmeye yetecek kadar kuvvet uygulamamız gerekir. Bu kuvveti uygulayıp kayayı bir yol boyunca hareket ettirdiğimizde iş yapmış oluruz (fizikte iş, kuvvet ile yolun çarpımıdır) ve iş yapmak enerji gerektirir.

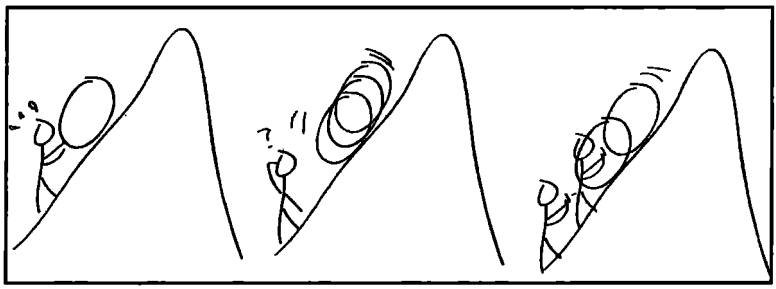
Sisifos ve kayasının nanodünyanın sakinleri olduğunu düşleyin. Kaya nanoölçekli olsaydı moleküler fırtına tarafından sürekli itilip kakılırdı. Yanal hareketi göz ardı edersek,

kaya yokuşta aşağı yukarı gelişigüzel itilirdi (yukarıdan sık aşağı, çünkü yukarı daha fazla enerji gerektirir). Sisifos kayayı yokuş yukarı itmek için enerji verimliliği çok yüksek bir yöntem benimseyebilirdi: kayanın moleküler fırtına tarafından gelişigüzel bir biçimde itilerek kendiliğinden yokuş yukarı hareket etmesini bekleyin. Ama bu, işe yaramaz; kayanın yokuş yukarıdansa yokuş aşağı gitmesi daha olasıdır.

Ya Sisifos aşağı kayan kayanın önünde dursaydı? Yukarı yönlü harekete izin verirken, kayanın aşağı yönlü hareketini engelleyebilirdi (Şekil 6.7). Yokuş yukarı her sıçramasında çabucak kayanın arkasına geçtiği sürece bunu yamacın tepesine kadar yol boyu tekrarlayabilirdi. Şimdi bir yere varıyoruz: Kaya, moleküler fırtına tarafından itilir ama bu gelişigüzel hareket Sisifos'un, istenmeyen yöndeki hareketini engellemesi sayesinde düzeltilir. Bu, kayayı hareket ettirmenin aşırı derecede verimli bir yoludur; bir nano-Sisifos kayayı itmek zorunda kalmazdı ve kaya, moleküler fırtına tarafından güdülerek, kendiliğinden hareket ederdi. Bu, Sisifos'un kayayı hareket ettirmek için enerjiye gereksinim duymadığı anlamına mı gelir? Hayır! Sisifos'un hâlâ yokuş yukarı hareket etmesi gerekir, adım adım. Bu adımlar enerji gerektirir.

Bunun, 5. Bölüm'deki cırcırdan ne farkı var? Cırcırın bir sıfırlama tuşu yoktu ve enerji gerektirmiyordu. Cırcır, ısıl hareketi kendiliğinden düzeltmesi gereken edilgen bir aletti. Ama Sisifos farklıdır: O, düzeneği sıfırlamak için bir enerji kaynağı kullanma pahasına ısıl hareketi düzeltir (kayanın arkasına dikilerek).

Gelin bu benzetmeyi daha ileri götürelim. Nano-Sisifos yokuş yukarı adım atarken herhangi bir serbest enerji kaynağını hareket enerjisine dönüştürür. Sonra durur. Hareket enerjisi ısıya döner (sandaletleri yere basıyordur). Yokuş yukarı adım atma eylemi serbest enerjiyi ısıya indirger. Sisifos ve yer biraz



Şekil 6.7. Solda: Büyük ölçekli bir Sisifos bir kayayı çaresizce yokuş yukarı iterek ter dökmeye mahkûm edilir. Ortada: Nanoölçekli bir Sisifos gelişigüzel ısıl hareketi nasıl kullanabileceğini merak eder. Sağda: Nano-Sisifos'un aklına bir fikir gelir: Alçalmaya başladığında kayanın arkasında dur ama yokuş yukarı gidecek olduğunda özgürce hareket etmesine izin ver.

daha ılıyordur. Şimdi, kaya ne zaman aşağı gitmeye çalışsa (daha sıcak olan) Sisifos'tan seker ve bir miktar enerji (daha soğuk olan) kayaya aktarılır. Sonunda, Sisifos ve kaya aynı sıcaklığa varırlar (ısıl denge) ama sonuç olarak, her ne kadar Sisifos gerçekte kayayı itmiyor olsa da Sisifos'un serbest enerjisinin bir kısmı kayayı yokuş yukarı itmiş olur!

Dahası bu serbest enerji en sonunda, termodinamiğin ikinci yasasının gerektirdiği gibi, ısıya indirgenir. İkinci yasayı çiğnemeden kayayı hareket ettirmek için moleküler fırtınayı kullanmanın bir yolunu bulmuş bulunuyoruz. Moleküler fırtınanın karmakarışık hareketi olmasa kaya hiç hareket etmezdi ve Sisifos kayayı sonsuza kadar itme cezasına çarptırılmış olurdu. Fakat, makinemizi düzenli aralıklarla sıfırlamak için bir serbest enerji kaynağımız olduğu sürece nanoölçekte karmaşa, düzene çevrilebilir.

Moleküler makinenin çalışması için gerekli olduğunu bulduğumuz sıfırlama adımı pek çok biçim alabilir. Bu adım,

tersinmez denen adımlara bir örnektir çünkü serbest enerjiyi ısıya indirger ve bu ısı geri serbest (kullanılabilir) enerjiye dönüştürülemez. Bu tersinmez adım aracılığıyla moleküler makinemiz ikinci yasayı çiğnemeden moleküler fırtınadan enerji çıkarabilir.

Geriye dönüp bakınca akla uygun geliyor: Tersinir bir makine tersinmez adımı olmayan, termodinamik dengede bir makinedir. Ama bir makine tersinir ise bir yöne ya da diğerine aynı derecede kolaylıkla hareket edebilir. Eğer ileri gidebildiği kadar kolayca geri de gidebilirse hiç faydalı iş yapamaz. Bir makinenin faydalı iş yapması için tersinmezliğe gerek vardır. 5. Bölüm'de aradığımız o kayıp şey buydu.

3. Bölüm'de canlıların açık, savurgan, dengeye yakın düzenekler olduklarını bulmuştuk. Şimdi bu cümle yeni bir anlam kazanır: Hücresel düzeneğimizi işletmek için gereken tersinir adımların bedeli kesintisiz bir serbest enerji kaynağından ödenir. Dışarıdan (yiyecek veya güneş ışığı) serbest (düşük entropili) enerji almak zorundayız ve bu serbest enerji moleküler makinelerimiz tarafından moleküler fırtınayı dizginlemek için kullanılırken indirgenir (harcanır).

Moleküler Makinelerin Yemeği

Moleküler makineler bir enerji kaynağına gereksinim duyarlar. Bir anlamda serbest enerji yerler. Ama serbest enerjilerini nasıl severler? Ekmek arasına ketçapla mı? Şaka bir yana, hayvanlarda hücrelerin moleküler makinelerini besleyen serbest enerji besinden gelir. Mide, bağırsaklar ve hücrelerdeki başdöndürücü bir enzim ağı metabolizma kapsamında besinleri parçalarlar. Bu karmaşık sürecin son ürünü adenozin trifosfat ya da ATP denen bir moleküldür; 4. Bölüm'de söz edilen hareketlilik deneyinde miyozine can veren enerji saklama

molekülüdür. ATP'yi oluşturmak üzere adenozine üç fosfat bağlanır. Üç fosfatın her biri eklendiğinde ATP yoğunlaştırılmış bir enerji bohçası olur. Bir ya da iki fosfat kökünün koparılması büyük miktarda enerji açığa çıkarır; fosfatları hemen kopmaktan alıkoyan tek şey molekülün etkinleşme duvarıdır. Ama ATP bir moleküler makineye bağlandığında fosfat kökleri kolayca kopar, ATP ADP'ye (adenozin *di*-fosfat) dönüşür ve makineye büyük miktarda enerji sağlanmış olur.

Bu enerji hangi biçimdedir? Titreşim enerjisidir; fosfatın serbest kalması enzimi titretir ve zangırdatır. Bunu, bir anlamda bölgesel ısınma gibi düşünebiliriz (daha yüksek sıcaklık, daha şiddetli hareket demektir). Bir fosfatın kaybedilmesi ile açığa çıkan enerji, enzimi 7000 Fahrenheit (3871 Celcius) dereceye ısıtmaya eşdeğerdir. Bu ek titreme, moleküler makinenin aksi halde geçilemeyen etkinleşme duvarını aşmasına olanak tanır.

ATP ADP'ye yıkıldığında, ADP geriye hücrenin yeniden dolum tesisi olan mitokondriye gider. Mitokondri, şekerin ADP'ye yeniden fosfat eklenerek ATP'nin yeniden oluşturulması için enerji sağladığı hücresel bir fabrikadır.

Sıkı ve Gevşek

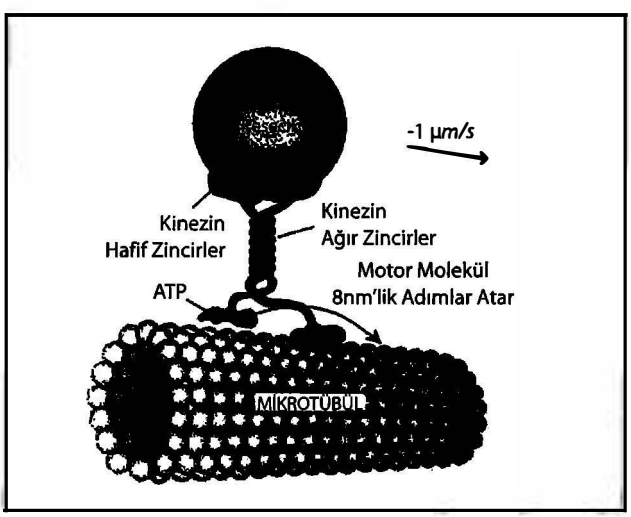
Bir moleküler makinenin mönüsünde ne olduğunu artık bildiğimize göre gelin gerçek moleküler makinelerin yukarıda özetlenmiş olan nano-Sisifos yöntemini nasıl uyguladıklarını bulalım. Önceden anlatıldığı üzere doğa, makine tasarımında iki ana yaklaşım benimsemiştir: çetin bir taktik (süper-Hummer) ve gevşek bir taktik ("Bükemediğin bileği öpeceksin"). Bilim insanları bunlara sırasıyla sıkı ve gevşek eşlenme derler. İkisi arasındaki sınırlar iyi belirlenmiş değildir ve bilim çevrelerinde hararetle tartışılır. Yeni bir moleküler makine ta-

rımlandığı her seferde, iki güruhun da yeni makinenin kendi taraflarında olduğunu iddia ettiği sıkı-gevşek tartışması yeniden alevlenir. Bu tartışmaya katkıda bulunmayı denememden önce iki düzenek arasındaki farkı açıklamama izin verin.

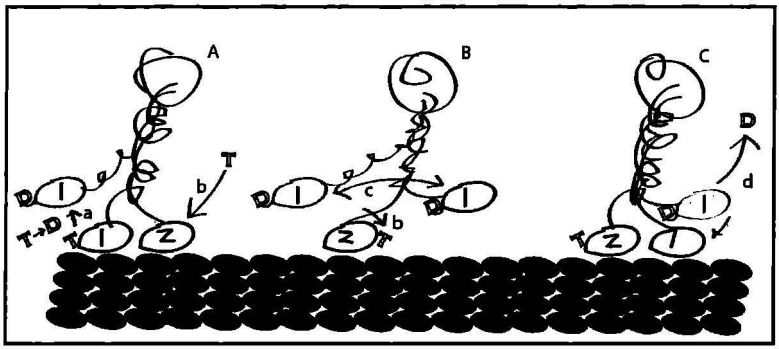
Biyofizikçiler sıkı eşlenmeden söz ettiklerinde iki (birbiriyle ilgili) düşünceye atıfta bulunurlar. Birinci düşünce, ATP ile iş adımları arasındaki yakın eşlenmedir. İkinci düşünce, sıkı eşlenmenin moleküler makinenin bir moleküler yola sürekli olarak bağlı olmasıyla ilgili oluşu üzerinde durur. Sıkı eşlenmiş bir motor, bir yola en azından kısmen bağlıyken tam olarak bir adım atmak için bir ATP molekülü kullanır. Gevşek eşlenmiş bir makine ise aksine zaman zaman yoldan ayrılabilir. Yoldan kopmak, gevşek eşlenmiş bir makinenin bir ATP molekülü başına birden fazla adım atabilmesine olanak sağlar ama aynı zamanda moleküler fırtınanın makineyi istenmeyen bir yönde itelemesine de izin verir.

Daha önce tartıştığımız üzere, süper-Hummer (yani sıkı eşlenmiş bir makine) örneğinde asgari düzeyde gevşetme olması zorunludur; aksi halde makine hiç hareket etmezdi. Yürüyen bir insan bunun için iyi bir benzetmedir. İleri gitmek için zaman zaman yerle bağımızı kesmemiz gerekir (ayak sürüdüğümüzde bile sıkı bağdan kaymaya geçeriz). Bunu yapabilmemizin nedeni bir ayağımızı hareket ettirirken diğerini her zaman sıkıca yere çakılı tutmamızdır. Bir dizi moleküler makine ya da motor, özünde böyle çalışır. Örneğin, kinesin adlı bir moleküler motor (protein moleküllerinden oluşan elli nanometre uzunluğunda bir düzenek) mikrotübül denen bir moleküler yol üzerinde her zaman bir ayağını yola çakılı tutarak iki ayak (ya da biyologların kafa karıştırıcı biçimde adlandırdığı üzere, baş) üstünde yürür. Bu motorlar hücrelerin içinde yük taşımak için kullanılır; bunlar, ağır moleküler yükleri tek yönlü bir yol üzerinde hücrenin uzak bölgelerine taşıyan nanoölçekli Şerpalardır (Şekil 6.8).

Kinezin motorlarının nasıl çalıştıklarını anlamak için gelin konuyu adım adım (kelimenin tam anlamıyla) ele alalım. Başlangıçta her iki ayak mikrotübüle takılıdır ve bir tanesi bir ATP molekülüne bağlanmıştır. ATP molekülü (ADP'ye dönüşerek) enerjisini serbest bırakır ve bu enerji, ayağı mikrotübülden ayırmak için kullanılır. Bu ayak ayırıldığında moleküler fırtına, ayağı başta ileri geri iter ama diğer ayak hâlâ yola tutunduğundan serbest ayak çok uzağa gidemez. Şimdi, hâlâ yola çakılı olan ayak bir ATP molekülü alır ve alosterik bir biçim değişikliği ile bütün kinezin molekülünü ileri büküp sallanan ayağı ileri yönde gitmeye zorlar. Şimdi, sallanan ayak çakılı ayağın önüne bağlanır ve ADP'yi serbest bırakır. Buna karşılık olarak çakılı ayak ATP'yi yıkar, yoldan kopar ve bu döngü yinelenir (Şekil 6.9).



Şekil 6.8. Besinlerle dolu bir keseciği taşıyan bir kinezin moleküler motoru bir mikrotübül boyunca yürüyor. Moleküler motorun tamamının yüksekliği yalnızca yaklaşık elli nanometredir. © 1999 Robert A. Freitas Jr., www.nanomedicine.com. İzin alınarak kullanılmıştır.



Şekil 6.9. Bir kinezin molekülünün hareketi (oldukça basitleştirilmiş). A: Ayak 2, bir ATP molekülüne bağlanırken ayak 1 ATP'yi (T) ADP'ye (D) yıkar ve yoldan ayrılır. B: Bağlanan ATP (T) ayak 2'nin mikrotübül yola sıkıca kenetlenmesine neden olur ve bacağını alosterik olarak ileri büker. O sırada, ayak 1 yoldan ayrılmıştır (adım A'daki ok a) ve ileri geri sallanır (ok c). C: Ama ayak 2 ve bacağı molekülü ileri yatırdığından ayak 1 ileri harekete yatkındır ve önünde sonunda ayak 2'nin ilerisinde yola zayıf bir biçimde bağlanarak, ok d'de görüldüğü gibi, ADP'yi serbest bırakacaktır. Molekül bir adım atmıştır. Son olarak (gösterilmemiştir), ayak 1 bir ATP'ye bağlanır, yola sıkıca kenetlenir ve bacağını ileri büker. Ayak 1 ve 2'nin görevleri değişerek bu döngü tekrarlanır: Ayak 2 ATP'sini ADP'ye yıkar ve yoldan ayrılır ve böyle devam eder.

Burada bizim nano-Sisifos örneğimize benzer bir düzenek buluruz: Alosterik etkileşim serbest ayağın moleküler fırtına tarafından gelişigüzel itilirken geriye salınmasına izin vermeyerek Sisifos'un görevini üstlenir. Ayak bir adım attığında geride kalan ayağın tersinmez bir sıfırlama adımı olan ATP molekülünün daha düşük enerjili ADP molekülüne yıkılması ile serbest bırakılması gerekir. ATP molekülü kaynağı bulundukça motor yürümeyi sürdürecektir.

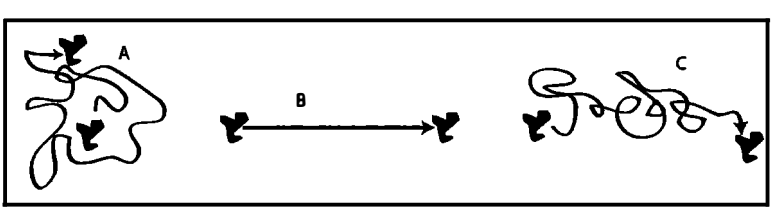
Sıkı eşlenmiş moleküler motorun alamet-i farikası her adımında sabit sayıda ATP molekülü kullanılan, iyi tanımlanmış

döngülerden geçmesidir. Yine de motorun hareket yeteneğinin ardındaki itici güç, sonuç olarak motorun ayaklarını ileri hareket ettirdiği için, gelişigüzel harekettir; bu hareket elbette motorun ayakları ile ATP'nin alosterik etkileşimi tarafından düzeltilmektedir.

Buna zıt olarak, gevşek eşlenmeli motorlar gelişigüzel hareketi daha çok temel alır ve sabit-adımlı döngüsü yoktur. Ve anlaşılmaları daha zordur.

Olasılıklar Nedir?

Gevşek eşlenmiş motorları anlamak için nanoölçekli nesnelerin su içinde gerçekleştirdikleri iki hareket şeklini ele alalım. Hızlı hareket eden su molekülleri ile yaşanan çarpışmalardan ileri gelen gelişigüzel hareketle zaten tanışmıştık. Fizikçiler bu gelişigüzel harekete *yayınım* adını verirler (Şekil 6.10). Bir molekül salt yayınım ile hareket ettiğinde gelişigüzel bir yürüyüş gerçekleştirir: Attığı her adım bir öncekinden bağımsız olarak gelişigüzel bir yöndedir. Sonuç olarak molekül felek-



Şekil 6.10. Olası moleküler hareketler. (A) Salt yayınım: Molekül gelişigüzel bir yol üzerinde hareket eder ve belli bir yolu kat etmez. (B) Salt sürüklenme: Molekül düz, belirli bir yol üzerinde, uygulanan bir kuvvet yönünde hareket eder. (C) Sürüklenme ve yayınım: Molekül ortalamada kuvvet yönünde hareket eder ama ek olarak gelişigüzel, yayınımsal hareket vardır.

ten bir gece çalmış bir sarhoş gibi amaçsız dolanır (bazen bu harekete *sarhoş yürüyüşü* de denir).

Diğer bir çeşit hareket moleküle bir kuvvet uygulandığında gerçekleşir. Molekül hâlâ moleküler fırtınadan kaynaklanan gelişigüzel çarpışmaların etkisindedir ama şimdi moleküler bora içinde bir yandan da uygulanan kuvvet tarafından sürüklenmektedir. Fizikçiler bu çeşit harekete *sürüklenme* adını verirler. Moleküllere ne gibi kuvvetler etki edebilir? Sonuçta, moleküler âlemdeki tüm kuvvetler elektrostatik kökenlidir. Bir kimyasal bağ dahi sonuç olarak elektrostatik çekimden ileri gelir (bununla birlikte bir kimyasal bağın kökenini tamamen açıklamak için biraz kuantum mekaniği gereklidir).

Hatırlanması gereken önemli bir gerçek, kuvvetlerin sistemleri düşük enerjiye doğru götürdükleridir. Bir molekül, bir diğerine bağlanırsa başlangıçta iki molekül birbirine kusursuzca bağlanmayacaktır; aralarında hâlâ belli bir uzaklık bulunacaktır. Ama moleküller birbirlerini duyumsadıklarında birleşik enerjileri azalmaya başlar ve bir çekim kuvveti onları birbirlerine doğru çeker. Bu kuvvet, molekülleri enerjide daha da fazla bir düşüş yönünde, yani bağı tamamlama yönünde çeker.

Genelde moleküller her iki çeşit hareketi deneyimlerler; yayınım ve sürüklenme. Sürüklenme gelişigüzel olmayan, daima düşük enerji yönünde bir hareketken, yayınım, molekülün izleyeceği yola gelişigüzel bir unsur katar (Şekil 6.10). Bu gelişigüzellikten dolayı, bir molekülün hareketini tanımlamanın en iyi yolu istatistiki mekanik kullanmaktır. "Üç saniye içinde molekül beş nanometre sola hareket edecek" ifadesi anlamsızlaşır ve ancak bu konuma hareket edebilmesi *olasılığını* belirtebiliriz. Fizikçiler, Fokker-Plank denklemini (genelde bilgisayarlar tarafından çözülen zor bir denklem) kullanarak bir molekülün belirli bir konuma hareket etmesinin olasılığını hesaplayabilirler. Bu denklem hareketin olası-

lığını molekülün enerji yüzeyine dayanarak hesaplar. Enerji yüzeyi, molekülün enerjisinin kavramsal bir resmini, konum ve yapılanmanın bir fonksiyonu olarak verir. Manzaradaki sarp bir yamaç (yani molekülün küçük hareketlerine karşılık enerjideki büyük bir düşüş) sürüklenmeye önayak olur. Bunun nedeni, enerjideki keskin değişimlerin düzeneği enerji yamacından aşağı yönlendiren büyük kuvvetlere karşılık gelmesidir. Öte yandan, manzaranın ovalık kısımlarında (ki bu kısımlarda molekülün konumundaki ya da biçimindeki değişimler enerjide büyük değişimlere neden olmazlar) kuvvetler önemsizdir ve yayınım hüküm sürer.

Zihnimizde bu resimle, gevşekçe eşlenmiş motorların nasıl çalıştıklarını anlayabiliriz. Gevşekçe eşlenmiş bir motor, kısmen gelişigüzel harekete (yayınım) dayanır fakat yine de yönlü hareket sergileme yetisine sahiptir. Yola tutunurken sürüklenmeye tabidir ve kendisini yol üzerindeki en düşük enerjili konuma yönlendiren bir kuvveti duyumsar. Yoldan ayrıldığında serbestçe yayınır. Gevşekçe eşlenme ikinci yasayı çiğnemez, çünkü yodan ayrılmak, ısıya indirgenen serbest enerji gerektirir. Ayrılma, tersinmez sıfırlama adımıdır.

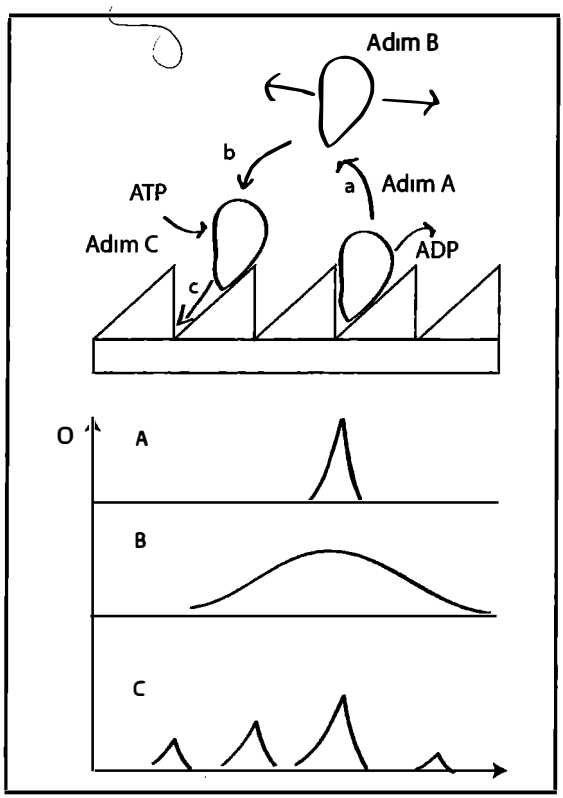
Böyle bir makine nasıl hareket eder? Olasılıklar hakkında düşünmemiz gerekir. Şekil 6.11 asimetrik bir enerji yüzeyine sahip bir yoldaki bir moleküler motoru göstermektedir. Enerji bir yönde, diğerine göre daha ani değişerek (cırcırın dişlerine benzer) bir testere ağzı deseni ortaya çıkarır. Böylesi bir enerji yüzeyinde sürüklenme ile yayınımın birleşimi makinenin bir yönden diğerine doğru hareket etme olasılığını yükseltecektir.

Yolun enerjisinin asimetrik oluşunun makine üzerinde iki etkisi vardır: Birincisi, makine zamanının çoğunu yolun enerji tabanı yakınında geçirecektir. Bu taban, yolun en alçak noktasıdır (Şekil 6.11, adım A). Şimdi, makine ayrıldığında soldaki komşu dişle arasında yalnızca kısa bir aralık vardır; oysa

sağdaki diş ile arasındaki mesafe daha büyüktür. İkincisi, motor yoldaki gelişigüzel bir noktaya yeniden bağlandığında olasılıkla enerjinin hafif eğimli bir yerine konacaktır. Bu eğim de sola yatıktır; bu yüzden motor kendisini bir sonraki dişin en düşük enerjisine doğru sola iten bir kuvvet deneyimleyecektir. Toplamda sonuç, yolun enerjisinin asimetrik oluşunun motorun hareketini sola meyilli hale getirmesidir.

Şekil 6.11'de, her biri üst resimdeki bir adıma karşılık gelen altta bulunan üç grafik bu hareketi olasılık çizimleri ile birlikte göstermiştir. Başlangıçta, motorun belirli bir enerji tabanına bağlı olduğunu biliyorsak bu konumda bulunma olasılığı yüzde 100 olur (çizim A). Sonra motor ayrılır ve özgürce yayınır. Bu, çizim B'de görülen olasılıktaki basık tepe ile gösterilmiştir. Motor yeniden bağlandığında çabucak en yakındaki enerji tabanını bulur. Özgün konumunun solundaki tabana daha yakın olduğundan sağdansa sola hareket etmiş olması bir miktar daha yüksek olasılıktır. Bu, çizim C'de başlangıç konumunun solundaki olasılığın hafifçe daha büyük tepeleri ile gösterilmiştir. En büyük olasılık tepesinin başlangıç konumunda olduğuna dikkat ediniz; bu, motorun sıklıkla hiç hareket etmediği ve özgün konumuna geri bağlandığını gösterir. Başlangıç konumunun *sağ* tarafında da küçük bir tepe vardır; bu, motorun geriye gitmesine dair küçük ama göz ardı edilemez olasılığı gösterir. Ne var ki, pek çok adım sonunda motor ortalamada sola hareket edecektir. Yani yönlü hareket gerçekleştirecektir.

Eğer bu düzenek kulağa 5. Bölüm'deki cırcırımıza gizemli bir biçimde benzer geliyorsa fizikçilerin bu çeşit gevşek eşlenmiş makinelere *Brown cırcırı* dediklerini göz önünde bulundurun. Brown cırcırı, Feynman'ın edilgen cırcırının aksine, tersinmez bir adım atar: bir ATP molekülünün yıkımı ile beslenen, yoldan ayrılan bir adımdır bu. Aslında, eğer mandal yayını gevşetmek ve yeniden sıkmak için arada sırada enerji



Şekil 6.11. Üstte: Gevşekçe eşlenmiş motorun hareketi. Adım A'da ATP molekülünün yıkımı ve ADP'nin serbest kalması motoru yoldan ayırır (ok a). Adım B'de motor özgürce yayınır. Adım C'de motor yeniden bağlanır (ok b); bu süreçte ATP'ye de bağlanır. Moleküler yola bağlanırken sürüklenme ile çabucak en düşük enerji haline gider (ok c). Altta: Yukarıda gösterilen adımlara karşılık gelen olasılık grafikleri. (A) Tek bir olasılık tepesi motorun başlangıçta (adım A'da ayrılmasından önce) enerji tabanında konumlanmasına karşılık gelir. (B) Motor özgürce yayınarak olasılık tepesinin genişlemesine ön ayak olur. (C) Motor yeniden yola bağlanır. Yolun enerjisinin asimetrisinden dolayı başlangıç konumunun soluna bağlanma olasılığı sağına bağlanma olasılığından daha büyüktür. Motor geriye başladığı konuma da bağlanabilir. Ne var ki, sola hareket sağa hareketten daha olasıdır ve ortalamada motor sola gidecektir.

versek Feynman'ın cırcırını çalıştırabilirdik. Yayın gevşetilmesi ile birlikte dişli, bir yönde diğerine göre hafifçe daha yüksek bir dasılıkla, özgürce dönerdi. Mandal yayını sıkmak, çarkı istediğimiz yönde daha ileri iterdi. Çark ortalamada ileri hareket eder ve iş yapardı. Aslında, asimetrik bir enerji yüzeyinde işleyen ve tersinmez, enerji düşürücü bir adım içeren *her* moleküler makinenin moleküler fırtınadan faydalı iş çıkarabileceği gösterilebilir.

Gevşek eşlenmiş bir makinenin hareketine yayınım hükmettiği içinmakine bir defada çok sayıda adım atabilir ama geri de gidebilir. Bu yüzden, gevşek eşlenmiş makineler sıkı eşlenmiş mukineler kadar verimli ilerleyemezler. Dahası, tamamen ayrılmadan önce bir yol boyunca uzun mesafeler kat edemezler. Bir yol boyunca sürekli olarak ileri adım atarak uzun mesafeler kat edebilen motora *işler motor* denir. Sıkı eşlenmiş motorlar işler motor olma eğilimindelerdir; gevşek eşlenmiş motorlar ise değillerdir.

Çekişme

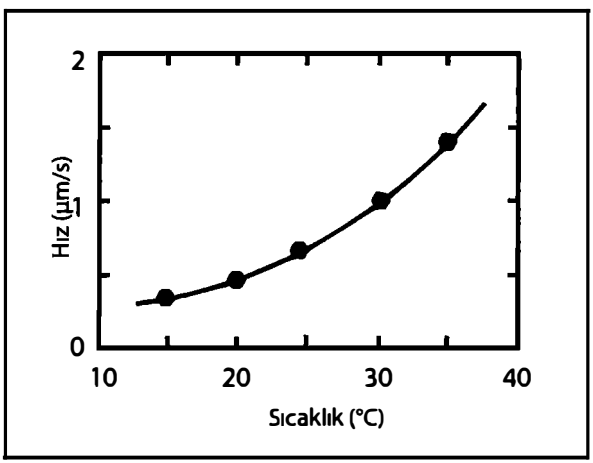
Önceden söz ettiğimiz üzere, bilim insanları arasında moleküler motorların sıkı mı yoksa gevşek mi eşlendiği konusunda bir anlaşmazlık vardır. Bu çekişmenin kökleri derine uzanır: Bazı bilim insanları ısıl hareketin gelişigüzelliğinin moleküler motorlarda önemli rol oynadığı düşüncesinden hoşlanırken diğerleri daha deterministik bir bakış açısını yeğler. Gevşek eşlenmiş motorların gelişigüzel harekete açık bir bağımlılığı vardır: Yolun asimetrik enerjisinin gereken ileri yönlü eğilimi sağlamasıyla birlikte gerçek adım atma eylemi aslen gelişigüzel yayınım tarafından gerçekleştirilir. Sıkı eşlenmiş motorlar gelişigüzel yayınımı bariz bir biçimde kullanmazlar; bu yüzden sıkı eşlenme düzeneği genelde gelişigüzellik-karşıtı kesimdekilerin çoğu tarafından yeğlenir.

Özellikle koyu bir tartışma, moleküler motor miyozin II üzerinedir. Doğada yaklaşık on sekiz farklı miyozin bulunur ve miyozin II molekülleri hayvanlarda kasların çalışmasını sağlar. Kolumuzu kaldırmaya karar verdiğimizde kaslarımızdaki sayısız miyozin molekülüne iletiler gönderip aktin liflerini çekmelerini söyleriz. Miyozinler halat çekme oyununda olduğu gibi bu lifleri tutar ve sıkıca çekerler. Miyozin motorları lifleri çektikçe kaslarımız kasılır ve kolumuz kalkar. Bir daha kolunuzu kaldırdığınızda (ya da bedeninizin herhangi bir kısmını oynattığınızda) bunun, miyozin nanobotlardan oluşan bir ordu tarafından başarıldığını hatırlayın.

Bu motorların nasıl çalıştıklarını tek molekül seviyesinde ölçmek zorludur ve beklendiği üzere, farklı laboratuvarlardan farklı sonuçlar çıkmıştır. Bu, çekişmeyi körüklemiştir. Yakın zamana kadar çoğu araştırmacı miyozin II'nin, tüketilen ATP molekülü başına beş ila on nanometrelik tutarlı adımlar atan, sıkı eşlenmiş bir motor olduğuna inanıyordu. Ne var ki, tek-molekül motorları inceleyen öncülerden Osaka Üniversitesi'nden Toshio Yanagida bu iddia ile çelişen tekrarlanmış ölçümler aldı. Yanagida, miyozin II'nin kat ettiği yolun azalıp arttığını ve ATP molekülü başına otuz nanometreye kadar ulaşabildiğini iddia etmektedir. Bu, ancak miyozin gevşek eşlenmiş bir motor olsaydı mümkün olabilirdi.

Bu çekişme nasıl sonlanırsa sonlansın, altta yatan moleküler fırtınanın gelişigüzel ısıl gürültüsünün göreli rolü ile ilgili tartışma biraz yapaydır. En sıkı eşlenmiş motor bile moleküler fırtınanın şiddetli ortamında hareket etmek zorundadır. Önceden gördüğümüz üzere, bir süper-Hummer makinesi arada sırada tutuşunu gevşetmeden çalışamaz. Bir moleküler makine kendini bıraktığında ısıl hareketin gelişigüzel kuvvetlerine tabi olur. Bu gelişigüzel hareketi kullanabilen bir makine, kullanamayandan daha verimli olacaktır. Sıkı eşlenmiş bir motor olan kinezin, gösterildiği üzere ayağını ileri itmek

için moleküler fırtınayı kullanır. Molekülün alosterik eğilmesi hareketin ileri yöne meyilli olmasını sağlar ama eğilme nereden gelir? Bir molekülün biçimindeki her değişim sonuçta moleküler fırtınanın molekülü azalan enerji yönünde, yani enerji yüzeyindeki bir vadinin içine doğru itelemesinin bir sonucudur. Eğer sıcaklık yeterli ısıl hareketi sağlayamayacak kadar düşükse moleküler motor çalışmayacaktır (Şekil 6.12). En sıkı denetlenen motor bile ara durumları aşmak ve sürekli değişen bir enerji yüzeyinde yolunu bulmak için ısıl dansın karmaşasına gereksinim duyar. Moleküler fırtınanın karmaşası olmaksızın hücrelerimizdeki moleküler motorlar hareket etmezlerdi ve biz ölmüş olurduk.



Şekil 6.12. Bir moleküler motorun hızı sıcaklığa bağlıdır. (Kenji Kawaguchi ve Shin'ichi Ishiwata'dan alınmıştır, "Tek Kinezin Moleküllerinin Kuvvet, Hız ve İlerleyiciliğinin Sıcaklığa Bağlılığı" *Biochemical and Biophysical Research Communications* 272, no. 3 (2000): 895-899, Elsevier'in izniyle). Hız, sıcaklıkla birlikte üstel olarak artar; bu, geçiş duvarlarını aşmak için ısıl harekete gereksinim duyan kimyasal dönüşümler için beklendik bir davranıştır.

7

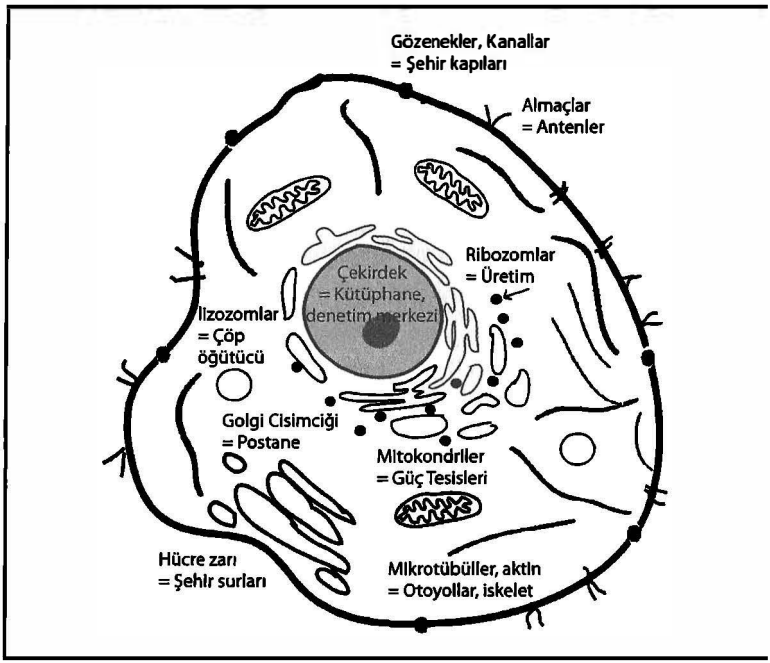
Bur ve Gönder

Doğa, moleküllerin makine işlevi görebileceklerini gösterir çünkü canlılar bu çeşit makineler sayesinde işler. Enzimler diğer molekülleri bir arada tutan bağları yapan, kıran ve yeniden düzenleyen moleküler makinelerdir. Kaslar, iplikleri birbirine karşı çeken moleküler makineler tarafından hareket ettirilir. Sayısal yönergeleri protein moleküllerini üreten moleküler makinelere yani ribozomlara ileten DNA bir veri saklama düzeneği olarak iş görür.

— K. ERIC DREXLER, "İÇ UZAYIN MAKİNELERİ", *NANOTEKNOLOJİ: ARAŞTIRMA VE GÖRÜŞLER**

Hücre bir şehre benzer. Bir kütüphane (kalıtımsal malzemeyi barındıran çekirdek), güç üretim merkezleri (mitokondriler), otoyollar (mikrotübüller ve aktin iplikçikleri), kamyonlar (kinezin ve dinein), çöp öğütücüler (lizozomlar), surlar (zarlar), postaneler (Golgi cisimciği) ve yaşamsal işlevleri yerine getiren diğer pek çok yapı bulunur (Şekil 7.1). Bu işlevlerin tamamı moleküler makinelerce gerçekleştirilir. Bazı makineler DNA'yı burar; bazıları moleküler otoyollar boyunca ya da hücre zarının içinden yükleri taşırlar. Şimdi

* Alıntıya izin veren K. Eric Drexler'a teşekkür ederim.

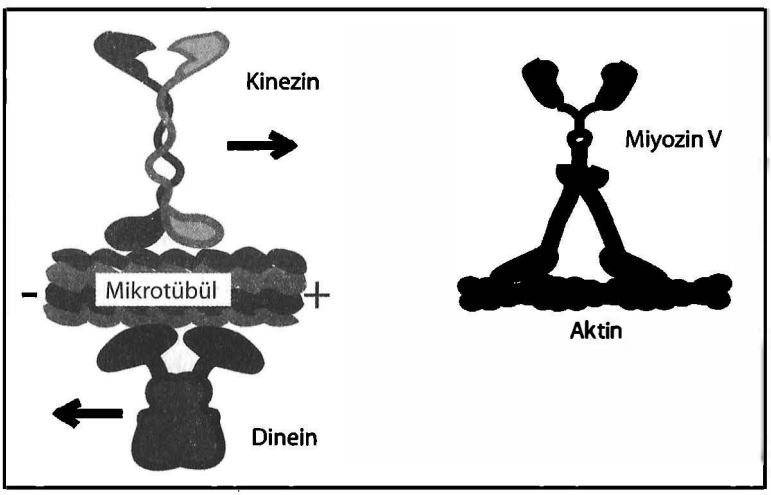


Şekil 7.1. Bir hayvan hücresinin taslağı.

biliyoruz ki moleküler makineler sürekli ATP perhizinde olan küçücük Maxwell iblisleri gibidirler. Şimdi nasıl çalıştıklarını biraz seziyoruz. Ama canlı hücrelerde pek çok değişik şey yapan, değişik biçimlerde hareket eden, hâlâ tamamen anlayamadığımız biçimlerde birlikte çalışan çok sayıda böyle makinelerden vardır. Bu bölümde bu makinelerden bazılarına bakacağız; ne yaptıklarını, neden onlara gereksinim duyduğumuzu, nasıl çalıştıklarını, bilim insanlarının onların gizemlerini nasıl açığa çıkardıklarını ve halen yanıt bekleyen soruları göreceğiz. Yaşamın, sırlarını öyle kolayca teslim etmediğini göreceğiz.

Yürüyüş:
Kinezin, Miyozin ve Dinein

Her şehirde vasıfsız işler vardır: kaldırma, taşıma, yeniden düzenleme, yeniden inşa. Hücre şehrinde durum değişik değildir. Bu işlerin çoğu, bundan sonra moleküler motorlar ya da motor proteinler olarak anacağımız üç çeşit moleküler makine tarafından gerçekleştirilir: kinezin, miyozin ve dinein (Şekil 7.2). Bir çeşit işi yapan bir tür kinezin, miyozin ya da dinein yoktur. Bunun yerine, uyarlanabilir kamyonlardan oluşan bir konvoy gibi bilinen on sekiz sınıf miyozin, on sınıf kinezin ve iki sınıf dineinden oluşan moleküler motor süperaileleri vardır. Her sınıfın da pek çok üyesi bulunduğundan ortak bir motifte çok sayıda çeşitlenim ortaya çıkar. İnsanlar yaklaşık 150 değişik kinezin, miyozin ve dinein (sadece miyozinler için 40



Şekil 7.2. Hücrelerimizdeki moleküler taşıma motorları. Bu yürüyen moleküller yaklaşık otuz ila elli nanometre boyundadır.

ila 50 arasında) kodlayan gene sahiptir. Diğer yandan, biranızı mayalayan gösterişsiz mayada 5 miyozin bulunur; tek hücreli canlı için bu bile hâlâ oldukça büyük bir sayıdır.

Her moleküler motorun merkez parçası bir ATPaz'dır. Son ek *–az* bir enzimi, yani bir kimyasal tepkimeyi kolaylaştıran bir proteini belirtir. Genelde, bir enzimin adı *X-az* gibi bir şey ise enzim, *X*'i yıkar. Aksine, enzim *X*'in yapımını destekliyorsa *X-sentaz* olarak adlandırılır. ATP sentaz ATP yaparken ATPaz ATP'yi yıkar. Bölüm 6'da tartışıldığı üzere, ATP'nin yıkımı büyük bir miktar enerjiyi özgür bırakır ve bir moleküler motoru çalıştıran enerjiye en çok katkı buradan gelir. Bu yüzden, moleküler motorun ATPaz bölgesi, motorun yanma odasıdır.

Moleküler bir cep olan yanma odasına bir ATP molekülü rahatça sığar. Bu ATPaz cebi, *hidrolizi*, ATP'den bir fosfat kökünün koparak geriye ADP bırakmasını kolaylaştırır. Hidroliz (ATP bir su molekülüyle etkileştiğinde fosfat kökü ayrılır) $5{,}8 \times 10^{-20}$ Joule ya da 0,36 eV'luk enerjiyi özgür bırakır. Bu, kulağa çok gelmiyor ama gerçekte ciddi bir miktar enerjidir; moleküler fırtınanın içinde molekül başına düşen ortalama enerjinin yaklaşık on dört katıdır. Bu denli yüksek bir enerji, molekülü yerel olarak 3900 Celcius ya da 7000 Fahrenheit dereceye kadar ısıtmak için gereken enerjiye denk gelir. ATP'nin hidrolizi aynı zamanda ATPaz cebinin biçiminde küçük bir değişime neden olarak yaklaşık 0,5 nm'lik bir yer değiştirme yaratır. Enerji ve yer değiştirmeyi bilerek ATPaz cebinde ATP'nin hidrolizi ile üretilebilecek azami kuvveti hesaplayabiliriz: Yüzde 100 verimlilik ya da salınan enerjinin tamamının iş yapmaya elverişli olduğunu varsayarsak kuvvet, salınan enerjinin yer değiştirmeye bölümüne eşittir ya da $5{,}8 \times 10^{-20}$ Joule bölü $0{,}5 \times 10^{-9}$ m (1 nm. = 10^{-9} m) 116 pikonewton'luk (pN) bir kuvvete eşittir (piko trilyonda bir ya da 10^{-12}

anlamına gelir). Bu, ne kadar büyük bir kuvvettir? 116 pN büyüklüğünde bir kuvveti gözle görülebilir en küçük toz parçacığının ağırlığı ile karşılaştırırsak, toz parçacığının ağırlığı hâlâ 5 kat büyüktür. Bir ATP molekülünden salınan enerji toz parçacığını ancak 0,1 nm ya da bir hidrojen atomunun boyu kadar kaldırabilirdi. Bu, kulağa inanılmaz küçük geliyor ama hücrelerimizin moleküler dünyasında 116 pN devasa bir kuvvettir. Örneğin, hücre zarını delmeye yeter.

Kuvvet büyük olsa da hareket küçücüktür. 0,5 nm'lik adımlarla hareket ederken çok miktarda yararlı iş yapmak zordur. Bu nedenle, moleküler motorlardaki ATPaz cebi mekanik bir yükseltici ile eşlenmiştir; bu, molekülün, ATPaz cebinin hareketini bir kaldıraç gibi işleyerek daha büyük bir yer değiştirme haline getiren bir parçasıdır. Bu çeşit mekanik yükseltme ile daha önce alosteriyi tartıştığımızda karşılaşmıştık. Enerji dönüşümü, kuvvetin, yer değiştirmedeki artışla orantılı olarak azaltılmasını gerektirir. Eğer hareketi on katına çıkarmak istiyorsam, bu örnekte 5 nm, üretebileceğim enerji on kat küçük ya da yalnızca 11,6 pN olurdu. Gerçekte, bu motorların verimliliği yalnızca yaklaşık yüzde 60'tır (bu, yine de çok iyidir) ve kuvvetler 1 ila 10 pN aralığında değişirken uzatılmış hareketler 5 ila 36 nm aralığındadır. Bu kuvvetler gerçekten de küçük görünür ama özellikle birkaç motor birlikte çalışırsa 1 pN bile moleküler yükü taşımaya yeter.

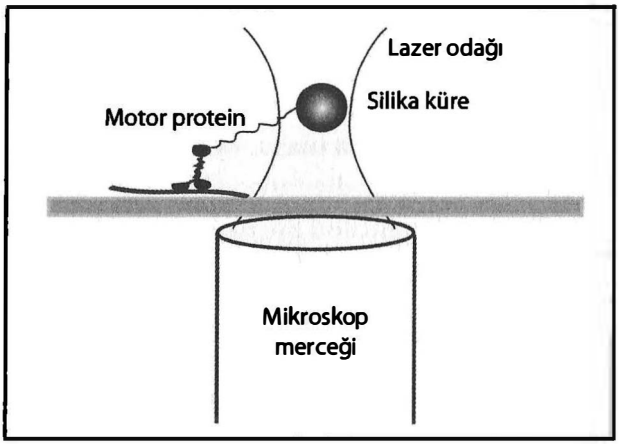
IŞIK CIMBIZLARI

Moleküler motorlarca üretilen yer değiştirmeleri ve kuvvetleri ölçmek kulağa son derece incelikli bir öneri gibi geliyor. Sonuçta bu motorlar yalnızca onlarca nanometre büyüklüğünde ve bir nanometrenin nasıl akıl almaz biçimde küçücük olduğunu görmüştük. Bu küçücük moleküllerden birine güç-

lükle bir kayış takıp ne kadar çektiğini ölçebilirsiniz... Yoksa ölçemez misiniz?

1993'te Harvard Üniversitesi'nden Steven Block ve onun araştırma ekibi küçük moleküler kayışlar kullanarak kinezin moleküler motorlarını küçük silis boncuklara tutturmuşlardı. Sonra boncuklar, ışıktan yapılmış bir tuzakla, bir lazer kapanıyla yakalandı. Işık parçacıklardan, fotonlardan oluşur ve bu fotonların kütle itkisi (momentumu) vardır ve bir parçacığa itme uygulayabilirler. Birçok foton birlikte basınç yaratabilir. Bir lazer kapanında, yüksek şiddetli lazer ışığı fotonların basıncının içeri yönlü çok küçük bir kuvvet yaratacağı biçimde odaklanmıştır; bu, küçük bir parçacığın lazer odağının merkezinden kaçmasını engelleyecek bir kuvvettir. Bu kuvvet yalnızca yaklaşık 1 ila 10 pN arasındadır ama Block'un çalışmalarında kullanılan gibi 600 nm çapında bir boncuğun ağırlığı yalnızca 0.002 pN'dur; bu yüzden ışık basıncı boncuğu askıya alıp tutmaya yeter de artar (Şekil 7.3). Lazer kapanları muhteşem aletlerdir: Mercekler ve aynalarla ışığı ve dolayısıyla odağı hareket ettirmek görece kolaydır ve kapandaki boncuk da bunlarla birlikte üç boyutta hareket ettirilebilir. Bu bakımdan, lazer kapanı çok hassas bir cımbız gibi davranır, bunlar nanometre büyüklüğünde boncukları ve boncuğa takılı tekil molekülleri tutabilen cımbızlardır.

Block'un deneyinde o ve öğrencileri çok sayıda boncuk içeren bir asıltıdan bir boncuğu çekmişlerdi. Her bir boncuk kinezin molekülleri ile donatılmıştı. Bir boncuk yakalandığında cama sabitlenmiş bir mikrotübüle (kinezin moleküler motorlarının üzerinde hareket ettiği yola) indirilmişti. Nesneyi aydınlatmak için iki ayrı ışık demeti kullanan Block'un ekibi lazer kapanlarını girişimölçer ile birleştirmişti. Boncuktan dağılan ışığın girişimini ölçerek boncuğun hareketini kesin olarak belirleyebiliyorlardı.



Şekil 7.3. Bir taşıma motor proteininin hareket ve kuvvetlerinin lazer cımbızı ile ölçülmesi.

Hareket iki kaynaktan geliyordu: ısıl gürültü (moleküler fırtına) ve motor proteinlerinin kasıtlı hareketleri. Kinezin molekülü yolunda giderken boncuğu da çekip götürüyordu. Boncuk ışık kapanının kıyısına geldiğinde kuvvet 0'dan 1,5 pN'a çıkıyordu. Hareketi izlerken bir yandan da kuvveti ölçen Block ve meslektaşları tek bir kinezin molekülünün hızını ve adım büyüklüğünü, çekmek zorunda olduğu yükün bir fonksiyonu olarak ölçmeyi başarmışlardı. Kuvvet çok fazla olmaya başladığında motor yoldan ayrılıyor; boncuk yeniden lazer odağının merkezine çekiliyor; kinezin motoru yola yeniden bağlanıyor ve ölçüm yineleniyordu.

Düşük ATP derişimlerinde Block, boncuğun motor tarafından saniyede 50 nm hızla çekildiğini buldu. Gürültülü veriye istatistik uygulayarak kinezinin 6 ila 8 nm'lik adımlar attığını ve bu yüzden saniyede altı ila sekiz adım atıyor göründüğünü buldular. Ayrıca kinezinin, ısıl hareketin ne-

redeyse kusursuz bir düzelticisi olduğunu, neredeyse hiçbir zaman geriye adım atmadığını buldular.

ATP derişimini artırdıklarında motor hızlanarak sonunda saniyede 500 nm azami hıza ulaştı. Bu hızda küçük molekül bütün bir hücreyi bir uçtan diğerine yaklaşık bir dakikada geçer. Şimdi, Block ve öğrencileri küçük motorun işini zorlaştırdılar: Lazer şiddetini artırarak daha yüksek bir kapan kuvveti yarattılar ve küçük motorun buna karşı gitmesini sağladılar. Kinezin motorun 5 pN kadar yüksek kuvvetlere karşı gidebildiğini buldular. Karşılaştırmak adına; 600 nm'lik bir boncuğu saniyede 500 nm hızla su içerisinde ilerletmek için gereken kuvvet yaklaşık 0,03 pN'dur. Bu yüzden bu küçük, 50 nm büyüklüğündeki motor kendisinin pek çok katı büyüklüğündeki bir nesneyi hücrenin bir yanından diğerine bir çırpıda taşıyabilir. O bir moleküler işçi karıncadır.

Block'un öncü çalışmasından bu yana moleküler makinelerin incelenmesinde lazer cımbızlarının kullanımı kayda değer biçimde ilerlemiştir. Gürültü çok daha azdır, kuvveti ya da konumu denetlemek için geri bildirim döngüleri kullanılır ve çok sayıda kapan tekil molekülleri sayısız yollarla yönlendirebilir. On altı yıl sonra Block ve meslektaşları boncuğu motor proteinin başlarından birine DNA ipliği ile tutturarak kinezinin tek bir bacağının hareketini izleyebilmişlerdi. Mikrotübüle bağlı mı yoksa özgürce salınıyor mu görmek için bacağı, DNA ipliğini kullanarak, hafifçe çektiler. Bir DNA molekülünü 50 nm'lik bir molekülün 10 nm'lik belli bir kısmına tutturma ve sonra da DNA'yı lazer ışığında kapana düşürülmüş bir boncuğa tutturmakla ilgili parmak ısırtan yeteneğe ek olarak elde edilen veriler, Block'un 1993 verilerini epey gölgede bırakmıştı. O zamanlar Block ve öğrencileri boncuğun hareketinin gürültülü izlerinden anlamlı bilgi çıkarmak için istatistiki çözümleme kullanmak zorunda kalmışlardı.

2009'da molekülün başının her adımı nanometrelik bir çözünürlükle açıkça görülüyordu.

FLORESAN BÜYÜ

Lazer cımbızlarının geliştirilmesinden çok önceleri moleküler motorların şaşırtıcı marifetleri keşfedilmekteydi. İlk gerçek tekil-molekül yöntemleri 1980'lerde geliştirilmişti. Bu yöntemler, motor proteinlere floresan moleküller eklenmesine dayanıyordu. Floresanlık, bir malzemenin daha yüksek enerjili ışık tarafından uyarılmasına tepki olarak belirli bir renkte ışık saçmasıdır. Yüksek enerjili fotonlar floresan bir moleküle çarptıklarında moleküldeki elektronların daha yüksek bir yörüngeye (ya da enerji durumuna) sıçramalarına neden olur. Molekül şimdi uyarılmış haldedir; fakat bir süre sonra elektronlar rahatlayıp daha düşük bir enerji durumuna döneceklerdir. Uyarılmış ve düşük enerji halleri arasındaki enerji farkı belirli bir enerjide ışık olarak salınır ve böylece belirli bir renk ortaya çıkar. Floresanlığın çok bilinen bir örneği siyah ışıklı bir dans kulübüne girdiğinizde kıyafetinizin tedirgin edici şekilde parıldamasıdır. Siyah ışıkların ürettiği mor ötesi ışık yüksek enerjilidir ve kıyafetinizdeki molekülleri uyarabilir. Elektronlar gerilerken mavimtırak tonda görünen bir ışık üretirler; bu, floresanlıktır.

Araştırmacılar, hassas almaçlar kullanarak, tek bir floresan molekülden çıkan ışığı saptamayı başardılar. Bu yolla, motorların kendilerinin görülemeyecek kadar küçük olduğu durumda dahi tek moleküllük motorların hareketlerini bir ışık mikroskopu ile izleyebiliyorlardı. Bilim insanlarının yapması gereken tek şey motora iliştirilmiş floresan kaynağının saçtığı ışığı izlemekti.

Tekil fotonlar kadar düşük miktarlardaki ışığı saptayabilme yeteneği, floresan temelli tekil-molekül yöntemle-

rinden oluşan küçük boy bir sanayi ortaya çıkardı. Bilimde âdet olduğu üzere bu yöntemlerin her birinin havalı kısaltmaları vardır; *TIRF, FRET, FCS* ve *SHRIMP* gibi. Moleküler motorları incelemede floresan yöntemlerin kullanılmasında başı çeken isimlerden birisi Stanford Üniversitesi'nden Jim Spudich'tir. 1983'te günümüzde boncuk tahlili diye bilinen yöntemi geliştirmişti. Spudich ve öğrencileri miyozin moleküllerini (Block'un on yıl sonra lazer tuzağı için kinezini boncuklara tutturmasına oldukça benzer şekilde) floresanla işaretlenmiş boncuklara tutturdular. Ardından boncukları aktin iplikçiklerinden oluşan bir yatak üzerine saçtılar. Miyozin molekülleri yeterince ATP ile beslendikleri ve aktin ile temas ettikleri gibi floresan boncuklar mikroskopik ateş böcekleri gibi etrafta gezinmeye başladılar. 1986'da Spudich, bunun tam tersini gerçekleştirdi. Bu sefer miyozini bir yüzeye tutturup floresanla işaretlenmiş aktin iplikçiklerini motorların üzerine saçtı. Yine uygun beslemenin ardından miyozin molekülü, aktin iplikçiklerini itmeye başladı ve kayan iplikçiklerin görsel şölenini ortaya çıkardı. Bu kayan-iplikçik tahlilini yirmi beş yıl sonra biyofizik toplantısında görmüştüm; ve halen ilk ortaya çıktığı zamanki kadar büyüleyiciydi. İplikçiklerin parıldayan kurtçuklar gibi ortada gezinişini izlemek bana yaşamın özünde bulunan hareketi hatırlattı. Bu hareket yirminci yüzyılın başlarındaki araştırmacılar için de Yunanlar için olduğu kadar gizemliydi ve şimdi kuşkuya yer bırakmayacak biçimde basit moleküllerin büyüleyici hareketleri ile açıklanmıştı.

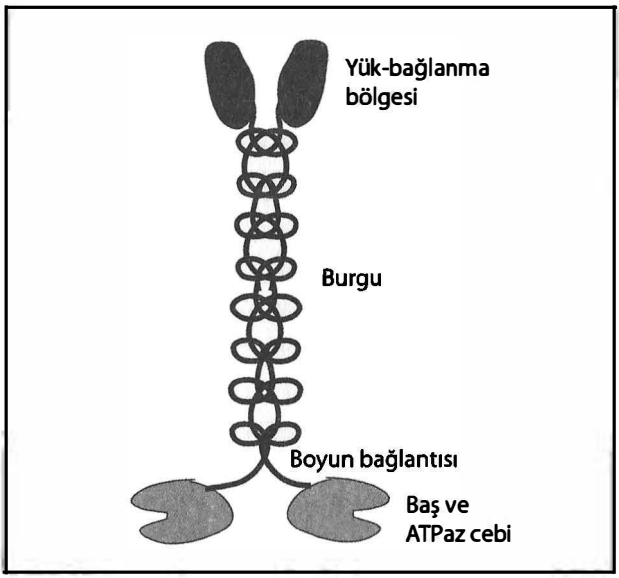
MOTORLAR NASIL ADIM ATAR: KİNEZİN VE MİYOZİN V

Kinezin-1 ve miyozin V (her nedense kinezin araştırmacıları Arap, miyozin araştırmacıları ise Roma rakamlarını kullanmayı seviyorlar) ana yürüyen motorlardır. Bu proteinlerin

ikisi de ilerleyicidir; yani yoldan çıkmadan uzun mesafeler kat edebilirler. Kinezin, mikrotübüller üzerinde yürürken miyozin, aktin iplikçikleri boyunca gezinir. Floresan, AKM, lazer cımbızları, X-ışını, elektron mikroskobu ve mutasyona uğratılmış motor proteinlerinin kullanımını içeren çok sayıda ayrıntılı araştırma, bizi bu büyüleyici yürüyen moleküllerin nasıl hareket ettiklerine dair ayrıntılı bir resim ortaya koymaya oldukça yaklaştırmıştır. Yapısal araştırmalar, ATP bağlanma bölgesinin, diğer adıyla *motor bölgenin* (motorun yola ve ATP'ye bağlanan kısmı) her iki proteinde oldukça benzer olduğunu göstermiştir. Bu, ikisinin ortak bir atadan geldiğinin göstergesidir. Ne var ki, biraz şaşırtıcı biçimde, bu iki molekülün hareket etme şekilleri tamamen farklıdır. Miyozin V uzun adımlar atarken kinezin-1 paytak paytak ilerler. Dahası, göreceğimiz üzere iki motor protein, ATP'lerini tamamıyla farklı amaçlar için kullanırlar.

Motorların nasıl yürüdüğüne dair ayrıntılar hâlâ tartışmalıdır. Gelin kinezine, daha doğrusu bir kinezin çeşidi olan kinezin-1'e daha yakından bakalım. Karmaşık konuları bir parça anlayabilmek için Bölüm 6'da kinezini kısaca ele almıştık. Kinezin-1, mikrotübüle bağlanıp ayrılabilen iki motor bölge (ya da baş) içerir. Başlar büyük miktarda esnekliğe izin vermeyen, kısa boyunlu bir bağlantı ile birbirlerine tutunurlar. Bu yüzden kinezin (pantolonunuz ayak bileklerinize kadar sıyrılmışken yürürseniz olacağı gibi) paytak paytak ilerlemeye mahkûmdur. Boyun bağlantısının aşağısında molekülün en uzun kısmı olan *sarılı sarım* (burada yazım hatası yok, iki sarmalın birbirine sarılması söz konusu) bulunur. Sarılı sarım, işlevi aşikâr olan yük-bağlanma kısmı ile taçlandırılmıştır (Şekil 7.4).

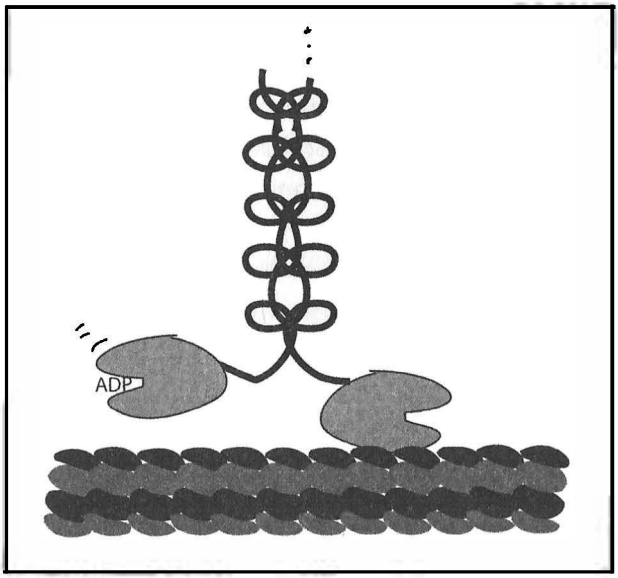
Kinezin molekülünün hareketini takip etmek için döngüsünün bir yerinden başlamamız gerekir. Gelin öndeki başın



Şekil 7.4. Bir kinezin-1 molekülünün yapısı. Altta molekülün bir mikrotübül iplikçiği boyunca paytak paytak yürümekte kullandığı iki baş görülüyor. Her başta ATP'ye bağlanıp onu su kullanarak ayrıştırmaya yarayan bir cep vardır. Kısa boyunlu bir bağlayıcı iki başı bir arada tutar. Bunun üstünde yük bağlanma alanına uzanan çift kıvrımlı bir gövde bulunur.

boş olduğu, ATP ya da ADP'ye bağlı olmadığı ama mikrotübüle tutunduğu andan başlayalım. Aynı anda, takip eden başın ATPaz cebine bir ADP bağlıdır. Block'un 2009'daki deneyleri (şimdilik) ADP bağlı başın mikrotübüle olan ilgisinin çok düşük olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle, öndeki boş baş mikrotübüle sıkı sıkıya tutunurken takip eden baş serbestçe salınmaktadır. Block, bu duruma bekleme hali diyor (Şekil 7.5).

Şimdi, bir ATP molekülü süzülüp geliyor. Takip eden, boşta salınan başa bağlanamaz (bağlanma cebi hali hazırda



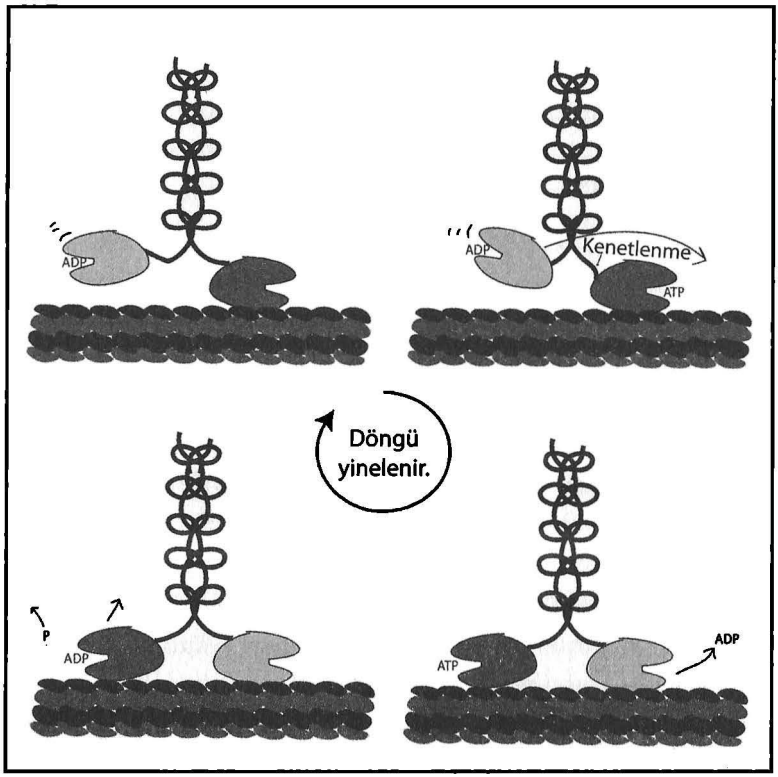
Şekil 7.5. Bir mikrotübülün üstündeki bir kinezin motor proteininin bekleme hali. Yük bağlanma alanı basitlik adına dışarıda bırakılmıştır.

ADP tarafından doldurulmuştur) ama öndeki boş baş yapayalnız ATP molekülünü seve seve içeri buyur eder. ATP ile bağlanma sonucu enerji salınır ve bu durumda enerji boyun bağlantısı ile öndeki başı birbirine kenetlemek için kullanılır. Bu, molekülü ileriye eğer ve epey kısa bir boyunla birbirine bağlı olan iki başın arasında bir gerinim oluşturur. Gerinim ve muhtemelen mikrotübül tarafından sağlanan eğik enerji yüzeyinin birlikte etkisi sonucu salınan baş *yanlı yayınım* denen eylemi gerçekleştirir. Yani baş, moleküler fırtına tarafından itilip kakılır ve enerji yüzeyi ileri yöne eğik olduğundan baş çoğu zaman ileri hareket eder (ama her zaman değil; bazen geri adım atacaktır!).

Düşük enerjili bir konma noktası için yapılan bu yayınımsal arayış hâlâ bir miktar gizemlidir. Bazı araştırmacılar boyun bağlantısının kenetlenmesinin moleküler fırtınanın barındırdığına benzer enerji ile ilgisi olduğunu belirlediler. Bu, çapulcu su moleküllerinin akınına direnmeye yetmeyecektir. Ne var ki, başka araştırmacılar ATP bağlanmasının çok daha büyük miktarda enerji sağlayabileceğini buldular; bu enerji moleküler fırtınanın ısıl enerjisinin yaklaşık on üç katı büyüklüktedir. Başın konabileceği rahat alanlar birbirlerinden 8 nm uzaktadır. Hemen öndeki alan halihazırda öndeki baş tarafından tutulmuştur; bu yüzden salınan baş, yeni ve rahat bir dinlenme yeri bulmak için 16 nm yayınmak zorundadır; bu, moleküler bir motor için ciddi bir mesafedir. Salınan baş, dinlenme yerine varmak için adımını tutunmuş başın etrafından dolaştırmak zorundadır; bu mesafeyi tıpkı bacak koruması giyen bir kovboy gibi yürür. Kenetlenmeden kaynaklanan öne doğru belki 1-2 nm'lik bir eğikliğin başı nasıl olup da 16 nm itebileceğini anlamak zordur. Miyozin II çekişmesi ile ünlü Yanagida grubu, kinezinin değişik sıcaklıklarda nasıl adım attığını ölçtüler ve moleküler fırtınanın enerjisinin dört katı bir etnropi katkısı keşfettiler. Yani kayıp bileşen entropi olabilir; diğer bir deyişle, ileri hareket geriye göre entropik olarak kayırılmaktadır.

Arayış halindeki baş, başladığı yerden 16 nm uzaktaki yeni dinlenme yerini bulunca ADP'sini serbest bırakır ve mikrotübüle sıkıca bağlanır. Şimdi, bu başın boş bağlanma cebi bir ATP ile bağlanmaya hazırdır. Molekül bir adım atmış, öndeki baş şimdi takipçi olmuş ve daha önce salınan baş şimdi öne geçmiştir. Ama henüz başladığımız yere dönmedik: Şimdi takip eden baş halen ATP'ye bağlıdır. Takipçi başta bulunan ATP, alosterik bir etkileşimle öndeki yeni başın ATP ile bağlanmasını engeller. Bu, iyi bir şeydir. Eğer arkadaki baş hâlâ

yola tutunuyorken öndeki baş ATP ile bağlanacak olsaydı boyun bağlantısına kenetlenip moleküle kaldırabileceğinden fazla bir gerinim yüklerdi. Bunun yerine, takip eden baş önce ATP'sini su yardımıyla yıkarak (hidrolize ederek) bir fosfat iyonu koparıp ATP'yi ADP'ye dönüştürür. Bu gerçekleştiğinde takipçi baş ayrılır, öndeki baş ATP'ye bağlanmakta özgür kalır ve döngü tekrarlanır (Şekil 7.6). Bu sıralamaya bakarak



Şekil 7.6. Soldan sağa: Kinezin-1'in adım adım hareketi. Hareket dizisinin sonunda iki baş yer değiştirmiş ve moleküler motor bir adım ilerlemişken döngü tekrarlanır.

adımlamanın nasıl düzenlendiğini anlayabiliriz: Hareket kimyasal dönüşümleri denetlerken kimyasal dönüşümler de alosteri aracılığıyla hareketi denetler. Bu kemomekanik eşleşme, motorun hiçbir zaman yolunu kaybetmemesini sağlama alır. Kinezini hayli ilerleyici bir motor kılan, hareketin bu şekilde sıkıca denetlenmesidir.

Gelin bu ayrıntılı taslağı önceki bölümlerde geçen daha genel fikirlerle bağdaştıralım. Eğimli bir enerji yüzeyine ve düzeneği yeniden başlatmak için bir serbest enerji kaynağına gereksinim duyduğumuzu görmüştük. Kinezin örneğinde eğik enerji yüzeyi; kısa boyunlu bağlantı tarafından iki kafa arasında oluşturulan gerinim, mikrotübülün bağlanma enerjisi ve muhtemelen entropinin katkısından kaynaklanır. Serbest enerji; ATP'nin bağlanması, başın mikrotübüle bağlanması ve ATP'nin su yardımıyla yıkımı sırasında sağlanır. Bu enerjinin bir kısmı boyun bağlantısına kenetlenip gerinim yaratmada kullanılır; bu da salınan başa hareket enerjisi aktarır. Mikrotübülden ayrılmak ve harcanmış ADP'yi serbest bırakmak için de bir miktar enerji kullanılması gerekir. Nihayetinde, enerjinin tamamı kinezin ve mikrotübülde bir titreşime yol açıp atık ısı olarak son bulacaktır. Sonuçta ATP halindeki serbest enerji, bir miktar iş yapmakta kullanılmış ve geri kalan enerji, ısı olarak yayılmıştır. Burada ikinci yasa çiğnenmemiştir.

Çarpıcı olan ise ana enerji kaynağı olan ATP'nin su yardımıyla yıkımının doğrudan yer değiştirme için kullanılıyor gibi görünmemesidir. Bunun yerine, Maxwell'in iblisinde ya da nano-Sisifos'ta olduğu gibi, bir yeniden başlatma adımı olarak iş görür. ATP'deki enerji, takipçi başı mikrotübülden ayırmakta ve böylece, bir anlamda, takipçi başın önceden bağlı olduğu konuma dair bilginin silinmesinde kullanılır. Kinezin, sıkı eşlenmiş bir motordur; bir adım atmak için bir

ATP gerekir. Gerektiğinde sıkıca tutunur ama adım atarken yalnızca çevre tarafından değil de molekülün kendi içinden kaynaklanan mekanik gerinimlerce de yontulmuş bir enerji yüzeyinde yayınarak bir Brown cırcırı gibi davranır. Ne de dahiyane bir küçük makine!

KİNEZİN AİLESİ

Şimdiye kadar yalnızca bir çeşit kinezinden söz ettik: kinezin-1. Belirtildiği üzere kinezinlerin on farklı sınıfı ve her sınıfın pek çok üyesi vardır. İnsanlar olarak DNA'mızda kayıtlı kırk beş değişik kinezin vardır. Pek çok çeşit kinezin vardır; çünkü her birinin farklı görevleri vardır ve birbirlerinden biraz farklı çalışırlar. Fakat hepsi de kinezindir; çünkü özdeş bir motor bölgeye sahiptirler ve hepsi de birer moleküler motordur.

Motor bölgenin, molekülün geri kalanına göre konumu değişik kinezinler arasında çokça farklılık gösterir. Proteinler genel olarak iki uçludur. Proteinler, katlanmış aminoasit zincirleridir ve moleküler motorlar da bu genellemeye uyarlar. Her aminoasidin bir ucunda bir karboksil kökü ve diğer ucunda bir amino kökü bulunur. Aminoasitler birbirlerine bağlanırken bir aminoasidin karboksil ucu diğerinin amino ucuna takılarak peptit bağı denen yapıyı oluşturur. Gitgide daha fazla amino asit eklendikçe her zaman bir karboksil ucu ("C ucu" denir) ve bir amino ucu ("N ucu" denir çünkü amino kökleri azot barındırır) bulunur. Kinezinleri, motor bölgelerinin konumuna göre üç gruba ayırabiiriz: C ucu yakınlarında, N ucu yakınlarında ya da arada bir yerlerde. Kinezin moleküllerinin çoğu N-uçlu olmakla birlikte insanlarda üç adet C-uçlu ve üç adet O (orta) kinezin bulunur. İlginçtir ki, N-uçlu kinezinler mikrotübüller boyunca artı uç denen yönde (hücre duvarına doğru, hücre içinden uzağa)

yürürken, C-uçlu kinezinler eksi uca doğru (hücrenin içine doğru) yürürler.

Kinezinler, çeşitli molekülleri barındıran kesecikleri (yağ molekülleri ile çevrelenmiş torbalar) taşırlar ya da mikrotübül ağları içerisinde gerinim yaratırlar; özellikle hücre bölünmesi sırasında. Bazı kinezinler yalnızca sinir sistemimizdeki hücrelerde etkindirler ve bu kinezinlerin amino asit dizilerini etkileyen mutasyonlar sinir sistemi hastalıkları ile ilişkilidir. Bazı kinezinler bütün halde organelleri (hücrenin temel altbirimleri) hareket ettirirler. Örneğin, KIF1B adlı kinezin sinir hücreleri içerisinde mitokondrileri hareket ettirir. Önceden de söz edildiği üzere, mitokondriler hücrelerin güç tesisleridir ve ADPleri yeniden enerji doldurup ATP'ye dönüştürürler. Diğer kinezinlerin (ör. kinezin-2), özdeş olmayan motor bölgeleri vardır ve dölüt gelişiminde önemli paya sahiptirler. Kromokinezin, hücre bölünmesi sırasında DNA'yı hareket ettirmekte görev alır. Hücreler bölünürken, DNA bilgisinin iki yavru hücre arasında eşit bölüştürülmesi gerekir. Bu, mitoz bölünme denen karmaşık bir süreçte kromozomların (yumak halinde DNA) ayrılması ile gerçekleştirilir. Bu ayrılma, aralarında kinezinlerin de bulunduğu çok sayıda moleküler makinenin ortak çalışmasıyla başarılır.

Daha tuhaf kinezinlerden ikisi kinezin-3 ve kinezin-5'tir. Kinezin-3 mikrotübüle tutunmak için yalnızca bir baş ve bir halkaya sahip gibi görünmektedir. Tek bir baş ile, kinezin-1'in hareket ettiği gibi hareket edemeyeceğinden kinezin-3, Brown cırcırı temelli motorlara bir örnek olarak düşünülmüştür; molekülün hiçbir yeri mikrotübüle bağlı değilken nasıl olup da gerinim yaratılabilir ki? Bu modelde baş, (yönlü) yayınım için mikrotübülden ayrılırken halka, mikrotübüle tutunmuş kalmaya yardım ediyor olabilir. Ne var ki, yakın zamanda yapılan araştırmalar, kinezin-3 moleküllerinin çift-

ler halinde çalıştığını gösterdi; tıpkı kinezin-1 molekülünde birbirine kalıcı bir biçimde bağlı başlar gibi.

Kinezin-5 ise diğer ucu temsil eder: Art arda dizili iki çift halinde toplam dört başı vardır. Kinezin-5 mitoz bölünme ile ilişkilidir. Aynı anda iki mikrotübüle bağlanarak onları bir arada tutar. Mitoz bölünme sırasında kromozomlar, mikrotübüllerden oluşmuş bir yapı olan *iğ*'e bağlıdır. İği gerili halde tutan motor Kinezin-5'tir.

MİYOZİN V: HAREKET İLE KİMYAYI İLİŞKİLENDİRMEK

2009'da, Wayne Eyalet Üniversitesi'nde yeni açılmış biyomedikal fizik lisans programının ilk yılının sonlarına doğru, bölümümüz bir biyofizikçiyi işe aldı. Şansa bakın, bu kişi benim çalışma arkadaşım Takeshi Sakamoto idi. Takeshi, adının geçtiği çok sayıda çığır açan çalışma ile moleküler motorlar alanında uzmanlaşmıştır. Ve onun göz bebeği miyozin V'tir.

Kinezin gibi miyozin V de yürüyen bir taşıyıcı motordur. Ne var ki aralarında bazı farklar bulunur: Miyozin, mikrotübüller yerine aktin iplikçikleri üzerinde hareket eder ve kısa bir boyun yerine uzun bacaklara sahiptir. Bu nedenle paytaklamak yerine arşınlar. Kinezin ve dinein, hücrenin uzun yol trenleriyken miyozin V daha çok bir tür yerel taşıma gibidir. Yükü kinezinden alıp kısa bir mesafe hareket ettirerek hücre zarına götürür; yük burada başka moleküler makinelere devredilir ve onlar da yükü hücrenin dışına aktarırlar.

2011'deki Biyofizik Derneği Toplantısı'nda Takeshi'nin doktora danışmanı ile tanıştım; kendisi Kanazawa Üniversitesi'ndendir. Toshio Ando, kendisini miyozin V'e kaptırmasından Takeshi'yi sorumlu tutuyordu. Ando, bu bağımlılıktan çok da rahatsız değildi. Moleküler motorlara olan hayranlığı onu, dünyanın en gelişmiş atomik kuvvet mik-

roskoplarından birisini yaratmaya itti. Ando'nun AKM'sinin tarama hızı o kadar yüksektir ki tek bir görüntü yirmi milisaniyede tamamlanır. Bu, alandan olmayanlara pek bir şey ifade etmeyebilir; ama genelde AKM'lerin bir görüntü oluşturması onlarca saniye hatta dakikalar sürebilir. Önceden açıklandığı üzere, AKM'ler sivri bir cismi bir yüzey üzerinde hareket ettirerek görüntü oluştururlar ve eğer ucu aşırı hızlı hareket ettirirseniz örneğinizi lime lime edersiniz. Ucu, Ando'nun yaptığı kadar hızlı hareket ettirmek için yüksek hızlı elektronik ve donanıma gerek duyarsınız. Ando ve öğrencilerinin, yöntemlerini kusursuzlaştırmaları neredeyse on senelerini aldı.

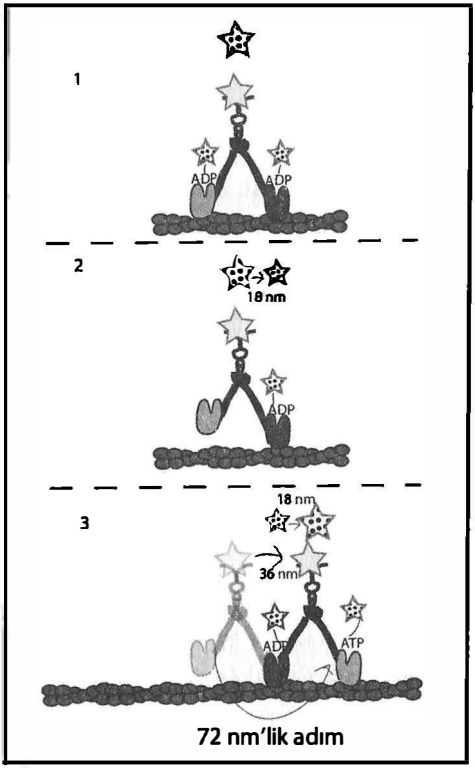
Ando, şimdilerde zihinlerde yer etmiş olan miyozin V molekülü yürüyüşü filmini biyofizik toplantısında göstermişti. Yüksek-hızlı AKM'sini kullanan Ando ve öğrencileri aktin iplikçikleri üzerinde yürüyen tekil miyozin moleküllerini filme almayı başardılar. Bunlar, büyüleyici kısa filmlerdir: Görüntüler bulanık ve titrek; ama nanometrik makinenin iki bacaklı küçük bir yaratık gibi durup aniden çabuk bir adım attığını, sonra yine durup bir daha adım attığını ve böyle sürüp gittiğini kolayca görebilirsiniz. Bu molekül canlı mıdır? Hayır, sözcüğün tam anlamıyla değil. Ama onun arşınlayışını izlerken birbirleriyle düzenli bir biçimde etkileşen bunun gibi kaç tane makinenin bir canlı meydana getirebileceğini görebilirsiniz. Bu, kesinlikle yaşamın başladığı yerdir.

Takeshi, bu film üretilmeden önce Ando'nun ekibinden ayrıldı; ama miyozin V'i inceleyen çok bilindik başka bir ekibe katıldı: Maryland eyaletindeki Bethesda kentinde bulunan Ulusal Sağlık Enstitüsü'ndeki Jim Seller'ın ekibi. Seller, 1980'de doktorasını tamamladığından beri miyozinleri (özellikle kas miyozini miyozin II'yi) incelemektedir. Takeshi, Wayne Üniversitesi'ne katılmadan önce sekiz yıl Seller'ın

ekibinde çalıştı. En öne çıkan başarısı yürüyen bir miyozin V molekülünün hareketi ile ATP alışının eş zamanlı görüntülenmesi oldu. Bu çalışma kutsal kâseydi: Biyokimyasal döngü (ATP'nin bağlanması, su yardımı ile yıkımı ve ADP'nin salınması) ile mekanik döngünün (ayrılma, yayınım, adımlama, yeniden tutunma) ilişkilendirilmesi. Bu ikisini tek bir molekül üzerinde mekân ve zamanda bağdaştırmak bu moleküllerin kimyasal enerjiyi mekanik enerjiye nasıl dönüştürdüğünün anlaşılmasına yönelik önemli bir yol kat etmektir. Bu, daha önce hiç yapılmamıştı; ne kinezin ne de diğer moleküler motorlarla.

Takeshi, kimyasal ve mekanik döngüleri ilişkilendirmek için floresan işaret takılmış bir ATP molekülü kullandı. Bu işaret, etiketlenmiş ATP miyozine bağlandığı zaman yirmi beş kat daha parlak ışıldıyordu. Böylece, Takeshi ve çalışma arkadaşları nükleotidin (ATP ya da ADP) bir miyozin başına bağlı olup olmadığını kolaylıkla belirleyebiliyorlardı. Miyozinin hareketlerini izlemek için doğrudan gövdesine bağlı başka bir işaret kullandılar. Takeshi, miyozin V'in sıkı eşlenmiş bir motor olduğunu buldu; ATP başına bir adım atıyordu. Kinezinin de sıkı eşlenmiş bir motor olduğuna inanılıyor; fakat bu halen tam olarak kanıtlanmış değil. Bu bakımdan, Takeshi'nin deneyleri herhangi bir moleküler makine için ATP'nin su yardımıyla yıkımı ile hareket arasında bire-bir bir ilişkiyi ilk kez açıkça gösterebilmiştir. Bu önemli bir bulgudur; zira Yanagida'nın çalışmasından sonra miyozin V'in kuzeni miyozin II'nin tüketilen her bir ATP karşılığında değişken mesafeler kat eden, zayıf eşlenmiş bir motor olması mümkün görünüyordu.

Takeshi, deneylerini kurduğu sırada miyozin V'in (kinezinin aksine) geniş, 36 nm'lik adımlar attığı zaten biliniyordu. Ama hâlâ hareketin, kimyasal enerji kullanımı ile nasıl



Şekil 7.7. Takeshi Sakamoto'nun deneyinde miyozin V'in hareketi ve ilgili floresan işaretler. Floresan işaretler yıldızlarla gösterilmiştir. Beneksiz yıldızlar nükleotitlere bağlanmış olan floresan işaretleri ya da bu işaretlerden kaynaklanan görünür floresan nokta (her molekülün üstünde asılı) gösterir. Yıldızın büyüklüğü floresan ışımanın parlaklığını belirtir. Başların her ikisine nükleotit bağlandığında miyozinin merkezinde tek bir parlak floresan nokta görülüyordu; miyozine sadece bir nükleotit bağlandığında ise nükleotit bağlı olan başın olduğu yerde daha loş bir nokta görülüyordu. Beneksiz yıldız, doğrudan miyozin molekülüne bağlanmış floresan imi göstermektedir. Oklar hareket belirtmektedir. Daha fazla açıklama için metne bakınız.

bir ilişkisi olduğu gibi yanıtlanmamış sorular bulunmaktaydı. Bu bağlantıyı kurmak için Takeshi ve çalışma arkadaşları önce miyozin V'e floresan bir işaret takıp ona floresan işaretli ATP verdiler. Mikroskoplarını odakladıktan sonra aktin iplikçikleri üzerinde ahenkle dans eden değişik renlerde parlak noktalar gözlemlediler (molekülleri doğrudan göremiyor ama yalnızca floresan işaretleri gözlemleyebiliyorlardı). İlkin ATP noktası 18 nm hareket etti, sonra miyozin noktası 36 nm hareket etti ve ardından ATP noktası bir 18 nm daha hareket etti ve sonra bu döngü yinelendi (Şekil 7.7). Bu ne demekti? Takeshi ve çalışma arkadaşları ATP, ADP-P (su yardımıyla yıkım sürecinde bir ATP molekülü; temelde yakınında fosfat kökü bulunan bir ADP) ya da ADP'yi birbirinden ayıramıyorlardı. Nükleotidin bütün halleri aynı renk ve parlaklıkta ışıyordu. Bir başka sıkıntı da her iki baş birer nükleotide bağlı iken yaşandı. Bu durumda, araştırmacılar iki ayrı floresan nokta yerine iki kat parlak tek bir nokta görüyorlardı. Bunun nedeni, mikroskoplarının çözünürlüğünün birbirine bu denli yakın iki floresan noktayı ayırt etmeye yetmemesiydi.

Bu ve önceki deneylerden gelen bilgiden hareket eden Takeshi ve çalışma arkadaşları döngünün ilk adımının ADP'nin takipçi baştan ayrılması olduğu kanısına vardı. Başta, her iki başa ADP bağlı iken floresan ışığın en parlak olduğu yer iki başın arasıydı. Ama ADP'lerden birisi ayrılıp soluklaşırken yalnızca öndeki baş, işareti tarafından aydınlatılmayı sürdürdü. Bu yüzden, gördükleri noktanın parlaklığı yarılanırken molekülün merkezinden öndeki başa kaydı. Başlar birbirinden 36 nm uzak olduğundan, nokta bu uzaklığın yarısı kadar hareket etmiş demekti; yani 18 nm.

Sonra, miyozine bağlı floresan işaret 36 nm hareket etti. Bu, ADP'nin takipçi baştan ayrılışının ardından bu baş, bütün

molekülü 36 nm itmek için, diğer başın üstünden geçerek 72 nm'lik bir adım atmış demekti (diğer başın hâlâ bağlı olduğu ve hareket etmediğini unutmayın). ATP işareti neredeyse 36 nm'lik bu hareket ile eş zamanlı olarak 18 nm hareket etmişti. Neden 36 değil de 18 nm? Çünkü bir yandan ATP kendisini ileri giden başa tutturarak nükleotidin floresanlığının merkezini molekülün merkezine geri çekmişti.

Miyozin ortamda ADP varken ya da baş kısmı tamamen boşken aktine sıkıca bağlansa da ATP veya ADP-P ile bağlı iken aktin iplikçiklerine çok zayıfça bağlandığı daha önceden keşfedilmişti. Bu, ileri giden baş iplikçiğe bağlanmadan önce ATP'sini çabucak ADP-P'ye dönüştürüyor demektir. Sonra P'yi salmış ve cebinde yalnızca ADP ile aktin iplikçiğine tutunmuştur. Çok hızlı bir biçimde gerçekleşen bu adımların zamanlaması hâlâ tamamen anlaşılamamıştır. Fosfat, aktine bağlanmadan önce mi yoksa sonra mı salınmıştır? Başın üç boyutlu yapısında ileriye doğru eğim yaratacak yönde gerçekleşen değişimden önce mi yoksa sonra mı salınmıştır? Bu sorular hâlâ yanıtlanmayı beklemektedir.

Miyozin V'te ATP'nin su yardımıyla yıkımının kullanımını sarmalayan gizem daha da büyüktür. Bir defa, miyozin V'teki durum ATP yıkımının baş ile iplikçiği ayırmakta kullanıldığı kinezinden tamamen farklıdır. Miyozin örneğinde ATP yıkımı başın, ipliğe *tutunması*na ön ayak oluyor görünmektedir. Ama bir başın iplikçiğe tutunması enerji harcatmaz; enerji sağlaması gerekir. O halde neden bu basamakta ATP yıkarak daha da fazla enerji sağlanıyor? Bu benim aklıma yatmıyor. Eğer miyozin, ATP yıkımından gelen enerjiyi bağlanmak için kullanmıyorsa ne yapıyor? Bu kitabın yazıldığı sırada bu, hâlâ gizemini korumaktadır.

Bununla ilgili sorular sorulduğunda Takeshi, önsezisinin ATP yıkımından gelen enerjinin doğrudan hareket oluş-

turmak için kullanılmadığı yönünde olduğunu söyledi. Bu doğruysa, hareket sağlamak için gereken enerji, yola bağlanmaktan, molekülün iç geriniminin boşalmasından ve moleküler fırtınanın ısıl enerjisinden geliyor demektir. Ama o halde miyozin ikinci yaşayı çiğnemiş olurdu. Bu yüzden, ATP yıkımının yeniden başlatma adımında görev alması gerekir. Örneğin ATP yıkımı, güç zamanını, takipçi başın ileri yönde hareketine ön ayak olacak biçimde molekülü ileri eğen bir biçim değişikliğini başlatabilir. Hareket eden baş ileri doğru salınırken uzun boynu dikey yönelimlidir. ATP, görünüşe göre aktine bağlanmadan hemen önce yıkılınca boyun bağlantısı geriye doğru salınarak moleküldeki gerinimi serbest bırakır. Bağlanmayı takiben boyun bağlantısı (muhtemelen başın aktine bağlanmasından doğan bağlanma enerjisinden beslenerek) yeniden ileriye doğru salınarak molekülün bir adım daha atabilmesi için onu ileri yönde eğen gerinimi sağlar. Yani, ATP yıkımından gelen serbest enerji yine düzeneği yeniden başlatmakta kullanılır. Miyozin örneğinde ise molekülün hareketinin düzeltilmesinde yararlı olacağı bir konuma gelir gelmez yeniden uygulanmasına izin vermek üzere gerinimin geçici olarak serbest bırakılmasında kullanılabilir.

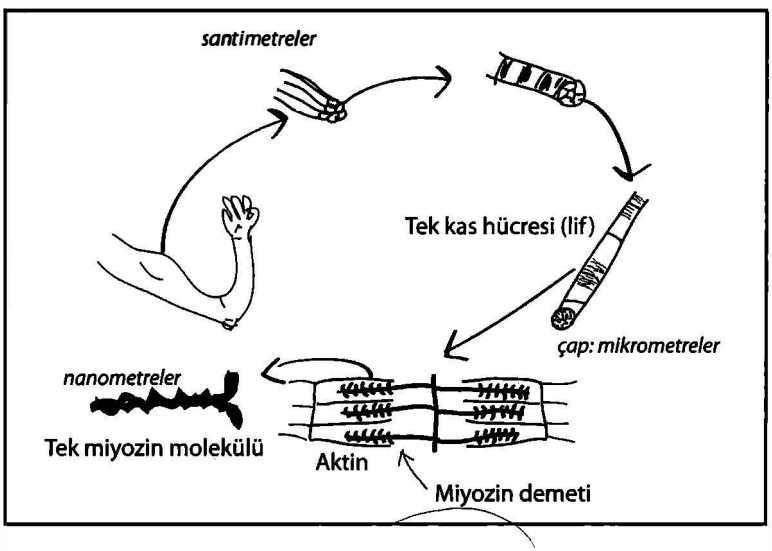
MİYOZİN II: KAS HAREKETİ

Miyozin V, ünlü uzun-bacaklı yürüyüşü ile kuşkusuz etkileyicidir. Fakat asıl miyozin, Aristoteles'ten beri biyologları büyülemiş olan hayvan hareketi ile en yakından ilgili olan miyozin II'dir. Kasların çalışmasını sağlayan moleküler makine olan miyozin II, keşfedilen ilk moleküler motordur; Andrew Huxley tarafından 1969'da keşfedilmiştir. İşin aslı, evrim tarihi içerisinde miyozin II, kaslardan önce var olmuştur. "Kas dışı" miyozin II, hücrelerin iskeletlerinin parçaları olan ak-

tin iplikçiklerini çekerek onların biçimlerini değiştirmelerine yardımcı olur. Evrimde sıklıkla olduğu üzere çok hücreli canlılar evrimleşirken aktin-çeken makineler canlının bütününü (kasları kullanarak) hareket ettirmeye atanmıştı.

Kas dışı miyozinin, kas miyozinine nasıl dönüştmüş olabileceğini anlamak kolaydır: Kaslar, demetler halinde kas ipliklerinden oluşurlar; her bir iplik tek bir hücredir. Her hücrede kas lifleri bulunur; bunlar, ipliksi miyozin II demetleri ile girişik aktin iplikçiklerinden oluşan yapılardır (Şekil 7.8). Kas hücreleri, abartılı bir aktin ve miyozin ağına sahip hücrelerdir; yoksa miyozin her zaman, kaslar ortaya çıkmamışken bile, ne yaptıysa yine onu yapar: aktini çeker.

Huxley'in çok sayıda moleküler motorun büyük ölçekli hareketi nasıl üretebileceğini açıklayan ilk modeli 1969'da ileri sürmesinden çok önce kasın yapısı ve miyozin adlı mo-



Şekil 7.8. Kasın yapısı.

lekülün varlığı biliniyordu. O dönemde kas kasılmasının, iki değişik iplikçiğin birbirine karşı kaymasının sonucunda gerçekleştiği zaten biliniyordu: aktin iplikçikleri ve miyozin iplikçikleri. Fakat bu iki iplikçiğin birbiri üzerinde kaymasını sağlayan kuvvet nereden geliyordu? Kas liflerini elektron mikroskopisi ile inceleyen Huxley, bu iki iplikçik arasında belirgin köprüler bulunduğunu ve bu köprülerin eğilerek kuvvet ve hareket ürettiğini öne sürmüştü. Bu köprülerin miyozin başları olduğu ortaya çıktı ve böylece kas hareketi artık, miyozin moleküllerinden oluşan taburların eşgüdümlü olarak aktin iplikçiklerini çekmelerine atfediliyordu.

Kas hareketinin çeşitli parçaları ile ilgili olan ölçekleri ele almakta yarar var. Kaslar, genelde santimetrelerle ölçülen boyutlara sahip, büyük ölçekli nesnelerdir. Yakından baktıkça, ilkin kasların büyük liflerden oluştuklarını görürüz; bunların da her biri daha küçük ipliklerden (kas lifleri) oluşan birer demettir. Tek bir kas lifinin uzunluğu santimetreleri bulabilir; ama çapı yalnızca yaklaşık 50 mikrometredir (metrenin milyonda biri). Kas lifi çok uzun bir hücredir. Hücrelerin içinde aktin ve miyozin demetleri vardır. Her bir miyozin başı, bütün yapının kuvvet üreten etkin kısmı, yalnızca 30-40 nanometre büyüklüktedir. Her bir gram kas içerisinde yaklaşık 10^{17} (100 milyon milyar) miyozin molekülü bulunur.

Miyozin II'nin hareket üretme süreci hâlâ tamamıyla anlaşılmış değildir; ama yapısal (X-ışını, elektron mikroskopisi), biyokimyasal, floresan ve lazer cımbızı çalışmaları ile kayda değer bir ilerleme sağlanmıştır. Bağlanma ve ayrılma döngüleri yanında ATP'nin bağlanması, yıkımı ve salımı da miyozin II ve miyozin V için temelde aynıdır. Ne var ki miyozin II ilerleyici gibi görünmemektedir. Aktin iplikçikleri üzerinde miyozin V'in yaptığı gibi uzun mesafeler boyunca yürümez.

Diğer yandan miyozin II, miyozin V'in yapabildiğinden daha hızlı bir hareket ortaya çıkarır.

Bölüm 6'da geçtiği üzere, bazıları miyozin II'nin zayıf eşlenmiş bir motor olduğuna inanırken başkaları ayırt edici bir sabit-mesafeli güç atımına inanmaktadır. Miyozin II, keşfedilen ilk moleküler motor olsa da en gizemlilerinden biri olmayı sürdürmektedir. Örneğin, miyozin V'te olduğu gibi, ATP yıkımının görevi üerinde bir anlaşmaya varılabilmiş değil: Onlarca makalenin yazarlarının çoğu ATP yıkımının işlevini "aktine olan ilginin artması" ile sınırlamış gibi görünürken birkaç araştırmacı ATP yıkımının bir tür güç atımı ile ilgili olduğunu var sayıyor. Dahası, miyozin V'te olduğu gibi ATP yıkımı birkaç adımda ilerler: ADP-P oluşturmak için fosfatın ayrılması ve ancak ondan sonra fosfatın salınması sonucunda bağlı bir ADP oluşması. Bu adımlar, bilim insanlarının onları miyozinin mekanik hareketleri ile açıkça ilişkilendiremeyeceği kadar hızlı gerçekleşir. Bu sorunu çözmek, daha hızlı floresan yöntemlerin geliştirilmesini gerektirecek. ATP'nin yıkımı hatırı sayılır bir miktar enerji açığa çıkarır; bu yüzden basitçe miyozin başının aktine olan ilgisini artırmaya yaradığını hayal etmek zordur. Belki yayınımı yanlı hale getirmekte bir görev alıyordur; örneğin, moleküldeki gerinimi içeriden değiştiriyordur.

O halde, kas hareketi nasıl denetlenmektedir? Bir açıklama, birtakım düzeneklerin kasa giden ATP miktarını ayarladığı yönündedir. Hareket etmek istediğimizde, bedenlerimiz ATP sağlar; değilse ATP girdisini kapatırlar. Fakat böyle olmamaktadır. İşin aslı, miyozin II'de ATP'nin bağlanması miyozin başının aktinden ayrılmasına izin verir. Bu yüzden, ATP'nin yokluğu ölüm katılığına neden olur: miyozin, aktin üzerinde takılı kalır ve kaslar sertleşir. Bunun yerine, kasın hareketi tropomiyozin denen bir moleküler anahtar tarafın-

dan denetlenir. Tropomiyozin, aktine bağlanarak miyozinin aktine tutunduğu alanları kapatır. Kolumuzu kaldırmayı düşündüğümüzde, sinirler kas hücrelerine kalsiyum iyonlarının serbest bırakılmasını sağlayan bir işaret gönderirler. Kalsiyum iyonları tropomiyozine bağlanıp aktini serbest bırakarak miyozin II'nin bağlanabileceği bir alanı ortaya çıkarır.

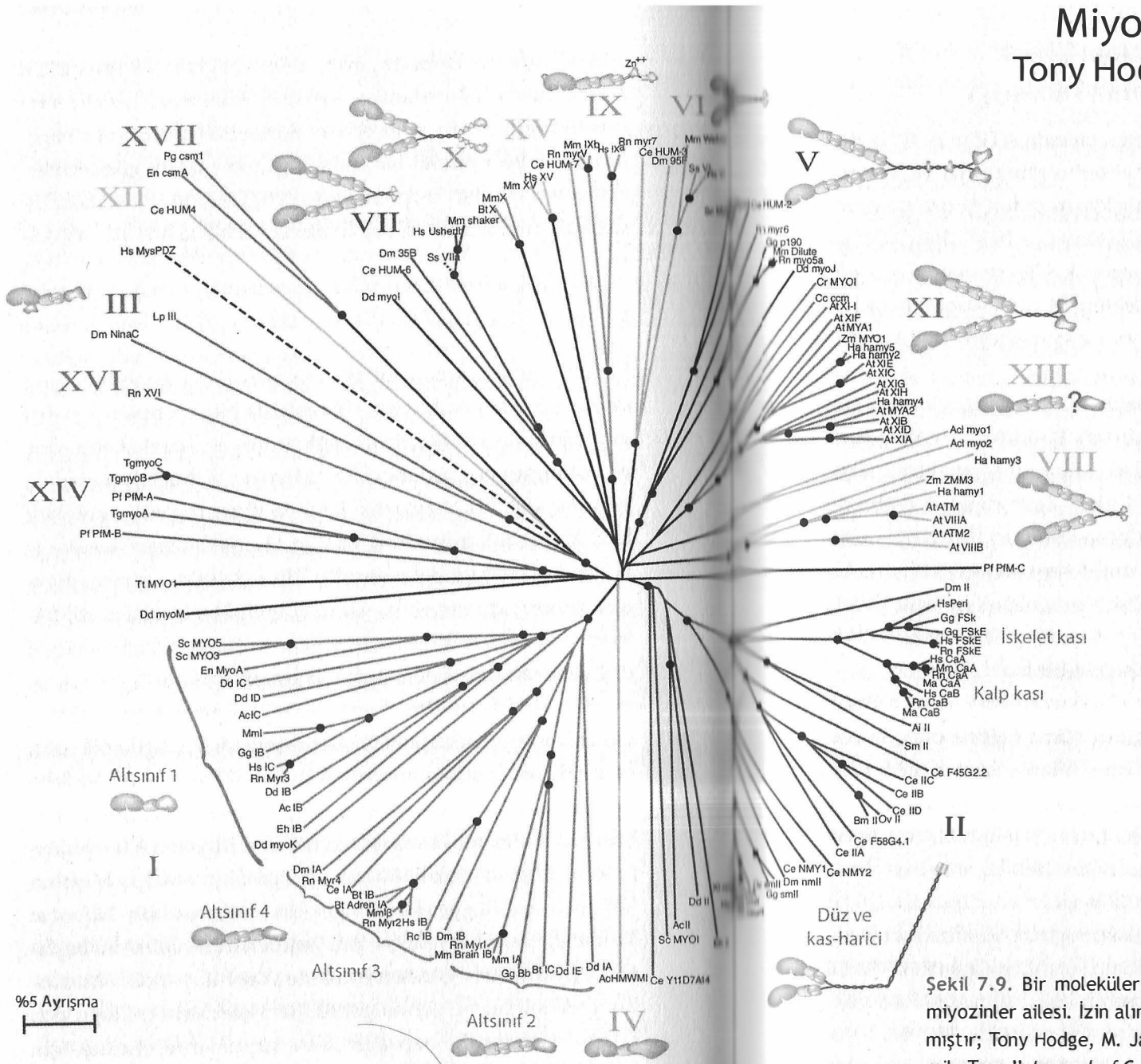
MİYOZİN ÜSTAİLESİ

Miyozin, aynı kinezin gibi, pek çok işlev gören geniş bir aileye sahiptir (Şekil 7.9). Miyozin II kaslarda güç üretirken kas dışı miyozin II hücrelerin biçim değiştirmesine, hareket etmesine ve bölünmesine yardımcı olur. Miyozin V, hücrelerimizdeki kısa-mesafeli bir taşıyıcıdır. Peki ya diğer miyozin molekülleri? Miyozin I, miyozin II ve V'in aksine, hücresel harekette kullanılan *tek-başlı* bir motordur. Bir uçta hücre zarına, diğer uçta aktine tutunur. Daha sonra aktin iplikçiklerini üretildikleri sırada itekler. Bu yolla, hücrenin iç iskeletini biçimlendirir ve hücre zarı ile iskeleti arasında gerinim yaratır.

Miyozin VI, miyozin V gibi bir motor proteindir, ama miyozin V'e zıt yönde hareket eder. Miyozin V, yağ-kaplı yükü hücre dışına taşırken miyozin VI yükleri içeri taşır. Hücrelerin zar dışındaki molekülleri içlerine çekme süreci olan *hücre yutumu* (endositoz) sırasında görev alır. Miyozin VII işitmeyle ilgili hücrelerimizle ilişkili gibi görünmektedir: Miyozin VII genindeki değişinimler sağırlığa neden olabilir. Miyozin IX hücreye, aktin iplikçiği ağını yeniden düzenlemesini başlatacak uyarımların gönderilmesinde görev alıyor olabilir. Motor proteinlerin ve yerine getirdikleri işlevlerin çokluğu göz önüne alındığında, hepsinin neler yaptıklarını çözmek için daha fazla araştırmaya gerek olduğu açıktır.

Miyozin Aile Ağacı

Tony Hodge ve Jamie Cope



Abbeviations

Ac	*Acanthamoeba castellanii*
Acl	*Acetabularia cliftonii*
Ai	*Aequipecten irradians* (deniztarağı)
At	*Arabidopsis thaliana*
Bm	*Brugia malayi*
Bt	*Bos taurus* (inek)
Cc	*Chara corallina*
Ce	*Caenorhabditis elegans*
Cr	*Chlamydomonas reinhardtii*
Dd	*Dictyostelium discoidium*
Dm	*Drosophila melanogaster*
En	*Emiricella nidulans*
Eh	*Entamoeba histolytica*
Gg	*Gallus gallus* (tavuk)
Ha	*Helianthus annus* (günebakan)
Hs	*Homo sapiens* (insan)
Lp	*Limulus polyphemus* (atnalı yengeci)
Ma	*Mesocricetus auratus* (cırlaksıçan)
Mm	*Mus musculus* (fare)
Oc	*Oryctolagus cuniculus* (tavşan)
Ov	*Onchocerca volvulus* (bir iplikkurdu)
Pf	*Plasmodium falciparum*
Pg	*Pyricularia grisea* (pirinç mantarı)
Rc	*Rana catesbeiana* (boğa kurbağası)
Rn	*Rattus norvegicus* (sıçan)
Sc	*Saccharomyces cerevisiae* (maya)
Sm	*Schistosoma mansoni*
Ss	*Sus scrofa domestica* (evcil domuz)
Tg	*Toxoplasma gondii*
Tt	*Tetrahymena thermophila*
Xl	*Xenopus laevis*
Zm	*Zea mays*

Adren	Sığır Böbreküstü (miyozin I)
Bb	Fırça Kenar (miyozin I)
CaA	Kalp Kası alfa (miyozin II)
CaB	Kalp Kası beta (miyozin II)
csm	Kitin sentaz-miyozin
FSk	Hızlı İskelet Kası (miyozin II) = çizgili
FSkE	Dölüt Hızlı İskelet Kası (miyozin II)
HMWMI	Yüksek Moleküler Ağırlıklı Miyozin I
neur	Sinirsel (miyozin II)
nm	Kas-harici (miyozin II)
PDZ	PDZ bölgesine sahip insan miyozini
Peri	Perinatal (miyozin II)
sm	Düz kas (miyozin II)

Şekil 7.9. Bir moleküler motorun aile ağacına bir örnek: miyozinler ailesi. İzin alınarak yeniden üretilmiş / uyarlanmıştır; Tony Hodge, M. Jamie ve T. V. Cope, "A Myosin Family Tree," *Journal of Cell Science* 113 (2000): 3353-3354.

Yeniden Dolum Tesisi: Enerji İletiminin Düzeneği

Moleküler motorlar suyla yıkım sırasında ATP'yi ADP'ye dönüştürürler. Daha sonra ADP'yi serbest bırakırlar ve harcanmış moleküler yakıt koçanı uzaklaşıp gider. Sonra ne olur? Hücreler her fırsatta geri dönüştürmeye bayılırlar. ADP'ye bir fosfat ekleyip dolumunu yaparak ATP'ye neden geri dönüştürülmesin? Hücreler gerçekten de böyle yaparlar ve bu, hücrenin en önemli organellerinde gerçekleşir: mitokondrilerde.

Mitokondriler hücrelerin yakıt istasyonlarıdır (bazen hücrenin enerji santralı olarak anılırlar). Besinden türetilen enerjiyi kullanarak ADP'nin yeniden dolumunu gerçekleştirirler. Ayrıntıları çözmek onlarca yıl aldı; süreç şaşırtıcı derecede karışık ve çok sayıda adımda gerçekleşiyor. Bizim öykümüzün şansına, sürecin sonunda muhteşem bir moleküler makine vardır; bu, tüm diğerlerinden farklı olarak değişik türlerden enerjilerin nanoölçekte birbirine çok yüksek verimlilikle nasıl dönüştürülebileceğini gösteren bir makinedir.

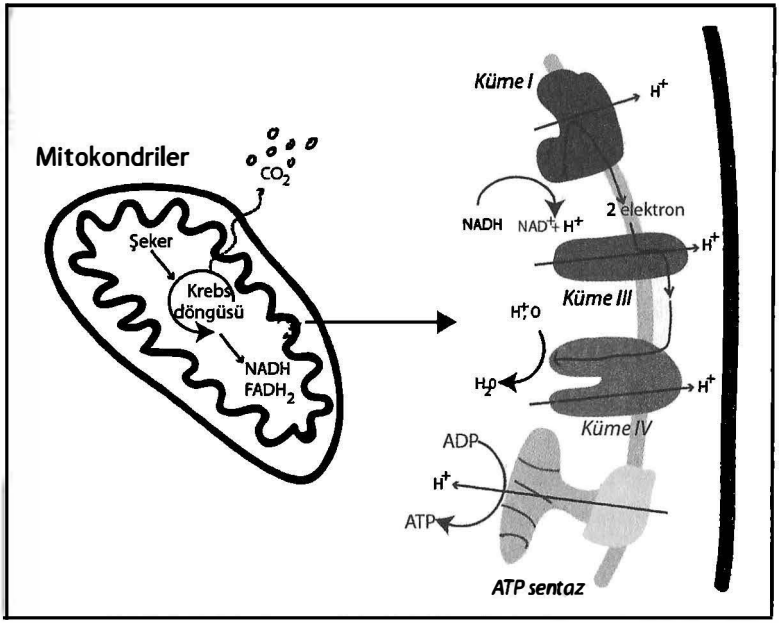
Fakat bu büyüleyici makine hakkında konuşmadan önce, gelin besinin ATP-enerjisine nasıl dönüştüğüne bir göz atalım. Bölüm 1'de anlatıldığı üzere, bilim insanları beden sıcaklığının bir yavaş yanma süreciyle üretildiğini uzun bir süreçte anlamışlardı. Lavoisier, Liebig, Helmholtz ve diğerlerinin yürüttüğü deneyler besinden üretilen enerjinin, besinin hava içerisindeki yanmasından çıkan enerjiye kabaca eşit olduğunu gösterdi. Hücrelerimizin içinde bir dizi karmaşık, çok-adımlı biyokimyasal tepkime, çeşitli gıda moleküllerini (şekerler, proteinler, yağ) hücrenin kullandığı standart, yüksek-enerjili moleküllere dönüştürebilmektedir. Her bir biyokimyasal adımda bir miktar enerji, ATP ya da başka enerji-ta-

şıyan moleküller halinde ayrılır ve son ürün, baştaki besin moleküllerinden buna karşılık gelecek kadar daha düşük enerjiye sahiptir. Bu yüzden, yanma sürecini pek çok adıma bölmek yanmayı çok yavaş ve bunun sonucunda çok verimli bir süreç haline getirir.

Böyle bir yanma sürecinde iki ATP molekülü üretilirken glukoz (bir şeker çeşidi) iki piruvat molekülüne (küçük, organik bir molekül) dönüştürülür. Gezegenimizde serbest oksijenin var olmasından önce (fotosentez sayesinde), bu tepkime yolun sonuydu. Bir glukoz molekülünden iki ATP molekülü elde edebilirdiniz; hepsi buydu. Oksijensiz solunum yapan bakterilerde piruvat, bir atıktır. Fakat piruvatın hâlâ sunacak enerjisi bulunmaktadır. Oksijenli solunum yapan hücrelerde (bizim hücrelerimiz gibi) piruvat, bir sonraki biyokimyasal tepkime dizisinin hammaddesini oluşturur. Sonuçta bir glukoz molekülünün yıkımından doğan iki piruvat molekülü otuz ATP daha üretmiş olur. Verimlilik dediğin böyle olur!

Piruvatı parçalamaktaki ilk adım CO_2 salmak (biz bunu nefesle atarız) ve başka bir ara ürün olan asetil üretmektir; asetil, koenzim A denen bir taşıyıcıya tutunur. Daha sonra bu ürün, asetil koenzim A, bir sonraki döngü olan ve bulucusunun adı verilmiş Krebs döngüsüne girer ve daha çok CO_2 salındıktan sonra elimizde çok sayıda NADH ve $FADH_2$ denen enerji-taşıyıcı molekül kalır. Sizi, bu kısaltmaların ne anlama geldikleriyle uğraştırmayacağım; önemli olan, NADH ve $FADH_2$ moleküllerinin elektron-zengini oldukları, yani kolayca elektron verebilecekleridir.

NADH, elektronlarını mitokondrinin zarına gömülü bir enzime verdiğinde NAD^+ halini alır (Şekil 7.10). Ayrılmış hidrojen iyonu (H^+, bir hidrojen çekirdeği ile aynı şeydir, yani hidrojen örneğinde tek bir protondur) zarı aşan enzimin içinden zarın diğer tarafına geçer. Elektron, pek çok ta-



Şekil 7.10. Şeker halindeki kimyasal enerji mitokondride ATP halindeki enerjiye çevrilir. Bu, çok adımlı bir süreçtir. İlkin, enerji NADH ve $FADH_2$ adlı moleküllere sabitlenir. Daha sonra bu moleküller, mitokondri zarındaki türlü makinelerce işlenir; bu makineler enerjiyi kullanarak hidrojen iyonlarını (H+) zarın bir yanından diğerine taşırlar. NADH küme I tarafından işlenirken $FADH_2$ küme II tarafından işlenir (gösterilmemiştir). Zarın bir tarafındaki hidrojen iyonu fazlalığı, ADP'yi yeniden doldurup ATP yapan ATP sentazı işletmek için kullanılır.

şıyıcıdan geçerek başka enzimlerden oluşan zincirler (öbek I, III ve IV) boyunca ilerler. Bunlar da elektron enerjisini daha çok protonu zarın bir yanından diğerine itmekte kullanırlar. Sonuçta, bu *elektron taşıma zinciri* çok sayıda artı yüklü protonu zarın bir yanından diğerine geçirmeyi başarır. Yüklerin (protonlar) bu hareketi zar üzerinde bir *gerilim* oluşmasına ön ayak olur. Bu bakımdan, elektron taşıma zincirinin amacı,

biyolojik bir pili yeniden doldurmaktır. İlk enerji dönüşümü tamamlandı; hücre, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdü.

Enerjinin, zarın bir yanında bir proton fazlalığı olarak saklandığı düşüncesi, 1961'de bu "kimya-geçişimsel" süreci mitokondrilerin anlaşılmasının anahtarı olarak öne süren İskoçyalı biyokimyacı Peter Mitchell'e kadar uzanır. Düşünceleri çokça eleştiriye hedef olmuştu. Biyokimyacıların çoğu, ADP'yi yeniden doldurmanın tamamen kimyasal bir süreç olduğuna inanıyordu. Uzun yıllar, ADP'yi kimyasal yollardan yeniden dolduracak bir enzim arayarak harcandıysa da böyle bir enzim bulunamadı. En sonunda, Mitchell'in düşünceleri kabul gördü ve 1978'de kendisine Nobel Kimya Ödülü verildi. Ne var ki 1970'lerin sonlarında bunun nasıl çalıştığının ayrıntıları hâlâ epey kabataslaktı. Depolanan elektriksel enerji ADP moleküllerinin yeniden dolumuna nasıl ön ayak oluyordu?

ATP SENTAZ VE BÜYÜLEYİCİ DÖNEN DEĞNEK

Ahmed Zewail Altın Madalya Ödül (kimyasal tepkimelerin yüksek hızlı ölçümlerine önderlik etmiş, Nobel Ödülü sahibi Mısırlı bilim insanına adanmıştır) töreni ve konuşması Wayne Eyalet Üniversitesi'nde yapılmaktadır. 2010'da bu ödül, bedenlerimizdeki yavaş yanma sürecinin son basamağını oluşturan moleküler makine olan ATP sentazın yapısını çözen ve Nobel'e layık görülmüş Sir John E. Walker'a verilmiştir. Walker'ın konuşmasından büyük keyif aldım ve soru-yanıt kısmında bu büyüleyici makinelerin evrimi hakkında neler bilindiğiyle ilgili sorular sordum. Bir kaşını kaldırıp, İngiliz düşünürlerine has o sözcükleri idareli kullanma üslubuyla, "Bu gibi sorularla genellikle sadece Texas'ta karşılaşırım," diye yanıtlayarak, yaratılışçıların, hücrelerimizin inceliklerini

özel yaratılışa kanıt olarak kullanmasına dokundurdu. Güldüm ve kendisine, evrimle samimi bir biçimde ilgilendiğime ve Texaslı olmadığıma dair güvence verdim (Alman aksanımın bunu ele veriyor olması gerekirdi).

Walker, Nobel Ödülü'nü biyokimyacı Paul Boyer ile paylaşmıştı. Walker, ATP sentazın yapısını keşfederken Boyer de nasıl çalıştığını bulmuştu. ATP sentaz, ATP üreten bir makinedir. Enzim bunu sıfırdan yapmaz; bunun yerine taze fosfat kökleri ekleyerek ADP'yi geri dönüştürür. ADP'yi fosfat ekleyerek ATP'ye dönüştürmek enerji gerektirir ve ATP sentaz bu enerjiyi, elektron taşıma zincirinin ürettiği depolanmış elektrik enerjisinden alır: Elektron taşıma zinciri tarafından bin bir zahmetle mitokondri zarının dışına taşınmış protonlar şimdi içeriye geri çekilir, ama önce elektriksel enerjilerini sentaz makinesine vermelidirler.

1977'de Boyer, protonların zardan geçerek geriye akışının küçük bir dönen motoru çalıştıracağını öne sürmüştü. Sakız makinesinin çevrilen kısmı gibi, motorun her bir dönüşü ATP üretiminin farklı bir adımını gerçekleştiriyordu: ADP ile fosfatın birbirine bağlanması, fosfatın eklenmesi, ATP'nin salınması. Bu adımların tamamı tek bir enzim cebinde gerçekleşiyordu. Dönme hareketi, bu cebi her devirde desteklediği tepkime adımına en elverişli olacağı biçimde değiştiriyordu. Bu biçimde üç adet çokişlevli cebe sahip olmak, makinenin her bir tam devrine karşılık üç ATP üretimine olanak tanırdı.

Boyer ayrıca protonların zardan geçişiyle sağlanan enerjinin (buna proton-motor kuvvet deniyordu) ADP'ye fosfat eklemekte kullanılmadığını ileri sürmüştü. Görünen o ki bu, enzimin cebinde zaten gerçekleşiyordu. Bunun yerine yeni oluşmuş ATP'yi cepten *salmak* için enerji gerekiyordu. Boyer ve ekibi moleküllerin hareketlerini izlemek için özel bir oksijen izotopu, ^{18}O kullanarak araştırmalarını sürdürürken

ilginç bir durum keşfettiler: Süreci tersten yürütüp sentazın ATP yapmak yerine yıkmasına izin verdiklerinde oluşan ADP'yi çözeltiden uzaklaştırmanın tepkimeyi durdurduğunu buldular. Bu çok anlamsızdı. Kimyasal tepkimelerde ürünün uzaklaştırılması, girenler ve çıkanlar arasında büyük bir dengesizlik yaratarak tepkimeyi ancak hızlandıracaktır. Nasıl olup da ürünün, ADP'nin, uzaklaştırılması tepkimeyi durdurabilirdi? Boyer'in öğrencilerinden biri ATP yapımından (ya da tersten işletildiğinde yıkımından) sorumlu, halen keşfedilmemiş olan enzimin yalnızca enzimin içinde bir yerlere ADP bağlı iken çalıştığını ileri sürdü. Bu düşünce, enzimde bir çeşit ortaklaşa, alosterik etkileşimin varlığına işaret ediyordu. Enzimin ADP'yi sıralı, düzenli bir biçimde işleyen üç etkin bölgesi olduğu yavaşça açıklık kazanmıştı. Bu buluş, Boyer'i ATP sentazın, fosfatları ADP'ye eklerken devirli bir döngüden geçtiğini ileri sürmeye yöneltti.

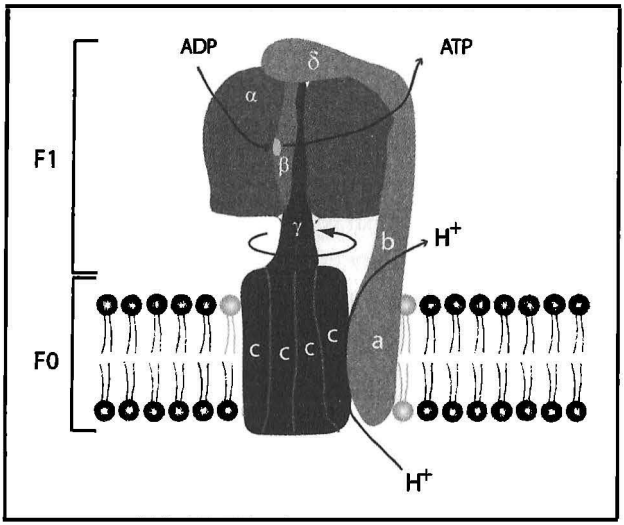
İlginç bir düşünce, ama bu kuram ancak Walker, sentazın F_1 kısmının yapısını çözdükten sonra geniş kabul gördü. F_1 Boyer'in sakız makinesindeki dönen parçaya benzettiği kısımdır; asıl ATP yapımını gerçekleştirir. F_1 bir çiçeğin taç yaprakları gibi dairesel şekilde düzenlenmiş üç özdeş birimden oluşuyordu (bu birimlerin her birinin de iki altbirimi vardı: a ve b). Dahası, özdeş b altbirimlerinin her birinin bir ADP/ATP bağlanma cebi vardı. Bu dairesel düzenlenme devirli hareketi şiddetle çağrıştırıyordu. Fakat bu hareket, 1997'de harika bir deney ATP sentazın dönüşünü floresan yöntemler kullanarak doğrudan gözleyene kadar kanıtlanmamıştı. O dönemde Tokyo Teknoloji Enstitüsü'ndeki Biyokimyacı Hiroyuki Noji ve çalışma arkadaşları tek bir ATP sentazın F_1 biriminin üzerine floresan işaretli kısa bir aktin iplikçiği taktılar. Araştırmacılar, sentaza ATP verdiklerinde makine geriye doğru çalışarak ATP yıkımından gelen enerjiyi kul-

lanıp ATP'yi ADP'ye çevirdi. Bu devinim de ekli olan aktin iplikçiğini, bando başının değnek çevirdiği gibi çevirdi. Mikroskoplarında aktin iplikçiğini gözlemleyen Noji ve çalışma arkadaşları F_1 biriminin saniyede dört devre kadar çıkan epey yüksek bir hızla saat yönünde döndüğünü gördüler. Dahası, üretilen kuvvet takdire şayandı; kendi kestirimlerine göre 45 pN kadardı.

Makinenin ATP yıkımından gelen enerjiyi devinime çevirmekteki verimliliği hayret vericiydi. 2000'de Noji'nin ekibi, makinenin en azından yüzde 88 verimli olduğunu buldu. Bu denli yüksek bir verimlilik büyük ölçekli makinelerde hiç görülmemiştir ama bize insan bedeninin toplamda nasıl bu kadar verimli olduğuna dair bir fikir verir. Küçücük nano makineler üzerine kuruluyuz ve ancak bir nano makine bu kadar verimli olabilir!

Noji'nin deneyi, ATP sentazın devinimli bir makine olduğunu kanıtladı ama araştırmacılar makineyi mitokondrilerde kullanılacağının tersi yönde çalıştırmışlardı. Saat yönündeki dönüşün ATP'yi yıktığını görmüşlerdi. Saatin aksi yönde dönüşünün bunun zıddını başaracağı aşikârdı: fosfatları ADP'ye geri eklemek. Fakat bu, deneysel olarak kanıtlanana kadar yalnızca varsayımdı. Ne yazık ki, ATP sentazı canlı bir hücrenin mitokondrisindeki olağan ortamında gözlemlemenin güç olduğu ortaya çıktı. Sentazı hücreden çıkardığınızda dönüştürücü düzeneğin geri kalanından da ayrılmış olur. Bu yüzden motoru çalıştıracak olan proton-motor kuvvet sağlanamaz ve motor, elektriksel enerjiyi kimyasal enerjiye dönüştüren yönde çalıştırılamaz.

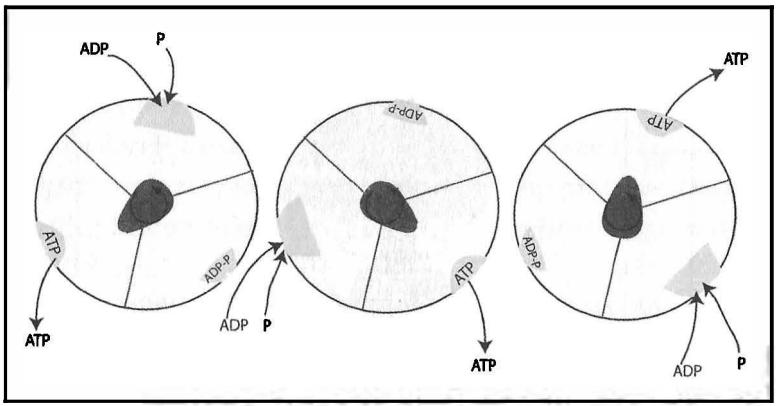
En sonunda 2004'te Noji'nin ekibi bir yolunu buldu. İşi protonların yapmasına izin vermek yerine sentazın F_1 biriminin merkezine manyetik bir boncuk eklediler. Sonra, dönen bir manyetik alan kullanarak manyetik kulbu ya saat yönün-



Şekil 7.11. ATP sentaz moleküler elektromotoru ve yeniden dolum tesisi mitokondri zarına gömülü F_0 elektromotoru ve devirli ADP dolum enzimi F_1'den oluşur. F_0 on ila on beş arası c-altbirimi (canlıya bağlı olarak) ve bir a-altbirimi ile duraç olarak iş gören bir b-altbiriminden oluşur. F_1, üç a-altbirimi ve üç b-altbiriminden oluşur. Etkin bölgeler b-altbirimlerinde bulunurlar ve ATP üretiminin farklı adımlarını gerçekleştirmek üzere dönen dingil (γ-altbirimi) tarafından değiştirilirler.

de ya da saatin aksi yönde zorladılar. Diğer bir deyişle motoru döndürme koluyla başlattılar. Saat yönüne çevirdiklerinde çevreleyen çözeltideki ATP miktarı azaldı. F_0 birimi bir ATPaz gibi davranarak ATP'den fosfatlar koparıyor ve ADP salıyordu. Bu, önceki deneylerini onaylıyordu. Ne var ki, birimi saatin aksi yönde çevirdiklerinde ATP arttı. Şimdi motor, ADP'den ATP yapıyordu.

F_1 birimi, mitokondri zarına gömülü olan bir F_0 birimi ile eşleşmiştir. Bir başka motor tarafından zorlanmadıkça F_1 birimi asla ATP üretemez; ancak yıkabilir. Onu saatin aksi yö-



Şekil 7.12. ATP sentazın F1 biriminin yukarıdan görünümü. γ altbirimi ya da dingil, saatin aksi yönünde döner. Dingil, birbirinin aynı olan üç b-altbiriminin şeklini değişik zamanlarda ADP ve P bağlanacak, ADP ve P birleşerek ATP oluşturacak ya da ATP salınacak şekilde bozar. Bu makine, her 360 derece dönüşte üç ATP molekülü üretir.

nünde (ATP yıkımındaki dönüşün tersi yönünde) zorlayacak bir motorla eşleşmesi gerekir. Hücrelerimizde bu motor F_0 biriminde bulunur. F_0 birimi birçok altbirimden oluşur; fakat genel anlamda özdeş c altbirimlerinden oluşan bir halka, büyük bir a altbirimi ve F_1 birimini F_0 üzerindeki yerinde tutmak için yukarı uzanan iki adet b altbirimi vardır. C altbirimlerinin halkasına F_0 biriminin devrini F_1 birimine aktaran esnek bir dingil (altbirim γ) takılıdır (Şekil 7.11). γ altbirimi asimetriktir. Devri sırasında, b altbiriminin etkin bölgelerine değişken bir biçimde bastırır ve etkin cebin biçimini ADP'den ATP yapan sürecin farklı aşamalarını başlatmak üzere değiştirir. Diğer bir deyişle, etkin bölge ATP bağlanması, ATP yıkımı ya da ADP salımına uymak üzere ayarlanabilir. Devinen dingil bu adımları sıralı olarak gerçekleştirmek için her bir birimin biçimini sırayla değiştirir (Şekil 7.12).

F_0 motoru biyolojik bir elektrik motorudur. Elektron taşıma zincirinin ürettiği gerilim, protonları zardan geri akmaya zorlar. Ne var ki, önce F_0 motorunun içinden akmaları gerekir. Motorun c-altbirimlerinde protonlar için alanlar vardır. Protonlar zara girerken bu alanlara çekilirler ve orada yapışıp kalırlar. Bu alan, zarda protonları iten, susevmez bir bölge ile etkileşir. Bu, eğik bir enerji yüzeyi yaratır ve motor, bir Brown cırcır düzeneğiyle döner. Bu, başka bir c-altbirimini proton yüklenebileceği bir konuma getirir ve döngü böyle sürer. F_0 birimi dönerken her bir proton salındığı yere dönüp zarın içindeki yolculuğunu sürdürmeden önce neredeyse tam bir çember çizer. Bu hareket, sentazın F_1 birimi ile eşleştiğinde F_1-ATPaz tersine çalışır ve bir ATP *sentaz* olarak fosfatları ADP'ye ekler.

AZLA YETİNMEK

F_0 altbiriminin yapısını çözmek F_1 altbiriminin yapısından bile daha zordu. İlk ölçümlerden itibaren sentazın F_1 etkin biriminde bir ATP molekülü üretmek üzere makineyi 120 derece döndürmek için dört proton gerektiğine inanılıyordu. Bunun için F_0 biriminin içlerinden protonlar geçtiğinde hareket yaratan 4 x 3 ya da 12 altbirimi (c-altbirimleri denen) olması gerekirdi. Ne var ki, değişik canlılarda yapılan ATP sentaz çalışmaları (ATP sentazlar bitkilerden amiplere ve insanlara kadar her canlıda bulunur) c-altbirimlerinin sayısının türler arasında farklı olduğunu gösterdi. Bitkilerde 14, siyanobakterilerde 13-15, bazı bakterilerde 11 ve son olarak mayalarla *E. coli* bakterisinde (ve tahminen insanlarda) 10 adet c-altbirimi bulunur. Her bir altbirimin dönüşü başlatmak için bir proton kullandığına inanıldığından c-altbirimlerinin sayısındaki bu çeşitlilik, bir ATP molekülü üretmek için değişken sayıda protona gerek olduğuna işaret eder. Örneğin bitkilerin 14

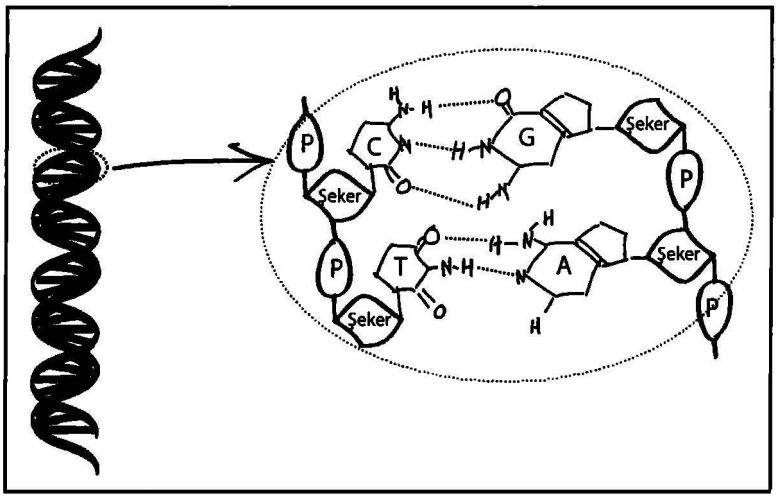
c-altbirimi varsa bir ATP yapmak için 14/3 ya da 4,7 proton gerekeceği anlamına gelir; ama deneylere göre durum böyle değildir. Bitkilerde yalnızca 4 proton gereklidir. Diğer uçta ise 10 adet c-altbirimi, her bir ATP molekülü 3,33 protona karşılık gelirdi; ki bu, verimlilikte bir artışa işaret eder. Fakat bu da henüz kanıtlanmamıştır. Pek çok gizem bakidir.

Burma: DNA Makineleri

DNA'yı okuyan, çevirisini yapan, tamir eden, eşleyen ve bakımını yapan bütün düzeneklerin etraflıca tartışılması bütün bir kitabı kolayca doldurabilir. Fakat moleküler makinelerin hücrelerimizin yaptığı hemen her şeyde nasıl kullanıldığını göstermek için kısa bir özet yeterli olacaktır. Hücrelerimizdeki DNA kromozom denen yoğun DNA-protein yapılarını oluşturmak üzere dürülüdür ve sonra bu dürümler de tekrar dürülürler. DNA'nın kromozomlara sıkıştırılması moleküler makinelerce gerçekleştirilir.

DNA hem proteinleri yapmak hem de proteinlerin yapımını düzenlemek için gereken bilgiyi içerir. Bir insan yapmak için gereken bilgiyi içermez; en azından doğrudan içermez. Doğrudan bir ayak parmağı ya da göz geni yoktur. Ayak parmakları ve gözlerin protein kısımlarını yapacak genler vardır. Gerçek insan gelişimi karmaşık bir süreçtir ve çok sayıda proteinin üretimi, etkileşimi, düzenlenmesi ve moleküllerin, moleküler motorlarca hareket ettirilmesinin doğru zamanlanmasını içerir. Yirmi yıl öncesine kıyasla çok daha iyi durumda olsak da bu aşırı karmaşık süreçlerin birçoğu hâlâ iyice anlaşılamamıştır. İyi anlaşılmış süreçlerden biri, DNA'daki yönergelere göre proteinlerin nasıl üretildiğidir.

DNA, şekerler (DNA'ya *D*'sini veren deoksiriboz) ve fosfatlardan oluşan bir omurgası olan ikili-sarmal bir moleküldür.



Şekil 7.13. DNA'nın yapısı. Solda genel olarak ikili sarmal yapısı görülmekte. Bu iki sarmal, art arda gelen şeker ve fosfat köklerinden oluşurken sağda görüldüğü üzere iki sarmalı bağlayan merdiven basamakları birbirine karşılık gelen nükleotit (A [adenin], C [sitozin], T [timin] ve G [guanin]) çiftleridir. Bu nükleotitlerin belirli dizilişleri DNA iletisini oluşturur.

Burulmuş bir merdivene benzer. Merdivenin basamakları, DNA'nın alfabesini oluşturan dört nükleotidin çeşitli düzenlerde bir araya gelmesinden oluşur. Bazlar adenin (A), guanin (G), timin (T) ve sitozindir (C). Adenin, adenozin trifosfat (ATP) içinde de yer alan moleküldür. İkili sarmalın iki yakası birbirini tamamlayıcıdır; yani bir yakadaki A, ötekindeki bir T ile eşleşir ve bir G her zaman C ile eşleşir. Özgün eşleşme, T'nin sadece A ile hidrojen bağı yapabileceği fakat G ya da C ile yapamayacağı bir biçimde konumlanmış hidrojen bağları sayesinde gerçekleşir (Şekil 7.13). Hidrojen bağları tek başlarınayken görece zayıflardır ama iki sarmalı bir arada tutan çok sayıda hidrojen bağı DNA'ya büyük bir sağlamlık verir.

DNA'nın tamamlayıcı baz eşleşmeli ikili-sarmal yapısının çok sayıda üstünlüğü vardır. Birincisi, baz eşleşmesinden kaynaklanan tekrarlılık hücrenin, hasar gördüğünde DNA'yı onarabilmesine izin verir. İkincisi, James Watson ile Francis Crick'in ünlü makalelerinde belirttikleri gibi molekülün kendini eşleyebilme yeteneğidir: "Öne sürdüğümüz eşleşmenin akla hemen kalıtımsal malzeme için bir eşleme düzeneğini getirdiği dikkatimizden kaçmadı." Diğer bir deyişle, DNA eşlemek istiyorsanız tüm yapmanız gereken sarmalı açıp etrafta bir miktar serbest baz yüzdürmektir ve bunlar kendiliğinden doğru karşılıklarıyla eşleşeceklerdir. Çok geçmeden bir sarmaldan, birbirinin tıpa tıp aynısı iki sarmal yapmış olursunuz. Göreceğimiz üzere, bu kadar da kolay değildir; ama temel fikir böyledir.

DNA dili, dört farklı harften (A, C, T ve G bazları) oluşan üç-harfli sözcükler kullanır. Örneğin üç harfli AAC sözcüğü, bir proteinin içindeki belli bir aminoaside karşılık gelir. AAC asparagine karşılık gelirken CUU, lösine karşılık gelir. Bu üç harfli sözcüklere kodonlar denir. Bütün üç harfli sözcüklerin toplamına *kalıtım dizgisi* denir. Gen, bir DNA cümlesidir; belirli bir protein için bütün bir amino asit dizisine karşılık gelen bir dizi kodondur. Örneğin kromozom 14 üzerindeki KLC1 geni kinezin-1'in protein dizisine karşılık gelir; bizim paytak motor proteinimiz.

Proteinin yapımı iki ayrı adımda ilerler: kalıtyazım ve çeviri. Kalıtyazım sırasında proteini yapmak için gerekli bilgi bir diğer bilgi taşıyıcısı ve DNA'nın yakın akrabası olan RNA'ya aktarılır. Bu ara adım neden gereklidir? Hücrelerimizdeki DNA, hücre çekirdeğinde güvende tutulur. Hücre her protein ürettiğinde DNA'yı kesip parçalamak istemeyiz. Bunun yerine hücre, çekirdekten çıkıp bilgiyi gitmesi gereken yere götürebilecek RNA'dan yapılmış geçici bir bilgi taşıyıcısı

üretir. Bu RNA bilgi taşıyıcısına kendine yakışır biçimde ulak RNA (mRNA) denir.

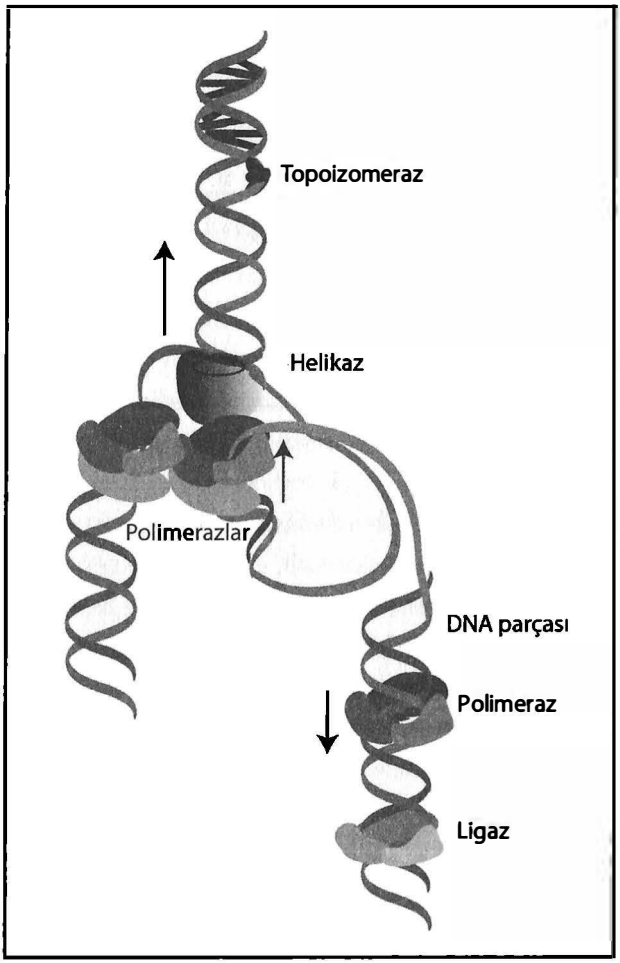
Yani hücrelerimizde DNA'yı ilgilendiren üç ana süreç gerçekleşir: hücre bölünürken DNA'nın çoğaltılması (eşlenme), proteinler üretileceğinde DNA'dan RNA üretmek (kalıtyazım) ve DNA'nın kromozomlara toplanması.

ÇOĞALTMA DÜZENEĞİ

DNA çok kararlı bir moleküldür. Bu, iyi bir şeydir; zira DNA'mızın başına bir şey gelmesini istemeyiz. DNA'mızdaki yanlışlıkların yıkıcı sonuçları olabilir; kanser oluşumu gibi. Ne var ki, eğer sürekli olarak katı bir yapıya dürülmüş olsa DNA'yı eşlemek ya da okumak imkânsız olurdu. Bu yüzden DNA'yı çözmeli, açmalı, okumalı, eşlemeli ve geri kapatmalıyız. DNA, hücreler bölünürken eşlenir (her bir hücre, kalıtımsal malzemenin eksiksiz bir örneğini alır) ve hücrenin her protein yapması gerektiğinde kalıtyazılır. Bu süreçler yüzeysel olarak benzer görünse de tamamen farklı yollardan işlerler.

Eşlenme sırasında DNA'nın hasar almamasını ve aslına uygun bir örnek üretilmesini garantilemek için çok sayıda moleküler makine ve enzim birlikte çalışır (Şekil 7.14). Ama bir dizi sıkıntı vardır. Öncelikle, DNA ipliğinin açılması gerekir. İkincisi, eğer dolaşmış bir telefon kordonunu düzeltmeyi denediyseniz, ikili-sarmalı açmanın bir karmaşaya neden olabileceğini bilirsiniz: Uygun önlemler olmaksızın, iplikler çabucak bir düğüme dönüşür. Dolaşık bir karmaşaya engel olmak için topoizomeraz denen moleküler makine arada sırada DNA ipliklerinden birini kesip diğerinin içinden geçirerek ipliklerin dolaşıklığının başka bir moleküler motor olan helikaz tarafından giderilmesini dengeler.

Başka bir sıkıntı daha vardır: DNA'nın tamamlayıcı iki ipliği zıt yönlerde konumlanmıştır. Proteinler gibi (N ve C uç-



Şekil 7.14. DNA eşleme düzeneği. Helikaz, sarmalı çözüp iki ipliği birbirinden ayırır. Topoizomeraz DNA'yı kesip yeniden birleştirerek dolaşmasına engel olur. Polimerazlar DNA'yı eşleyip her bir iplikten yeni bir ikili sarmal üretir. Polimerazlardan birisi helikazı izlerken diğer ikisi aksi yönde çalışırlar. Bu yüzden DNA'yı sonradan ligaz tarafından birleştirilecek olan parçalar halinde eşlemek zorundadırlar.

ları vardır) DNA'nın da farklı uçları vardır. 5′ denen uçta bir fosfat kökü ve 3′ ucunda bir şeker kökü bulunur. İpliklerden biri 3′–5′ yönünde ilerlerken diğeri 5′–3′ yönünde ilerler. Ne yazık ki, DNA'yı eşleyen düzenek yalnızca bir yönde ilerleyebilir: 5′–3′. Bu, iki iplikten biri için sorun değildir; çünkü DNA polimeraz denen eşleme düzeneği, DNA'yı açan makineyi (helikaz) izleyebilir. Fakat diğer iplik zıt yönde uzanır. Yani, bu iplikteki eşleme makinesi DNA'nın açıldığı noktadan uzağa gitmek zorundadır. Daha da fenası, bu olurken makinenin gerisinde daha fazla DNA açılmaktadır. Bu sorunu nasıl çözmeli? DNA'nın küçük bir kısmını eşleyin, eşleme makinesini geriye hareket ettirin, küçük bir kısım daha eşleyin, başka bir makine (ligaz) kullanarak kısımları birbirine kaynatın ve böyle devam edin.

SARMALI BURMAK

Yerimiz sınırlı olduğundan DNA eşlenmesindeki moleküler makinelerin her birine değinemesek de helikaza yoğunlaşacağız. Helikaz DNA sarmalını terse buran (ve açan) makinedir. Bu terse burma makinelerinin iki görevi vardır: birbirlerine karşılık gelen DNA ipliklerini ayırmak ve onları terse burarak eşlenmeye hazır hale getirmek. Ayrık DNA ipliklerini tersine burmak, DNA'nın henüz ayrılmamış olan kısımlarında daha da fazla burguya neden olur. Topoizomerazlar, helikaz motorlarının DNA'yı arapsaçına çevirmesine engel olurlar. Yapısal olarak helikaz, ortasında DNA geçecek bir delik bulunan altı köşeli bir yıldıza benzer. DNA, helikazın merkezine nasıl dolanır? Helikazın altıgen halkasını açıp DNA'yı içine alıp sonra da kapanarak kendisini DNA üstüne yerleştiriyor olması kuvvetle muhtemeldir. Bu altıgen yapı, DNA halkanın içinden geçip kıvrılırken helikazın işini yapmayı sürdürmesine yardım ediyor olabilir.

Daha önce değinildiği üzere DNA merdiveninin basamakları (tamamlayıcı bazlar) hidrojen bağları tarafından bir arada tutulur. Helikazın bu bağları kendi kendilerine kopacaklarından çok daha çabuk kopardığı, çalışmalarla gösterilmiştir. Helikazlar, her şeyden önce, DNA ikili sarmalının ayrılmasını hızlandıran enzimlerdir. Unutmayın, her bağ önünde sonunda kendiliğinden kopacaktır. Her molekül, moleküler fırtına tarafından durmaksızın bombardıman edilir; yani bir bağın rastlantısal olarak ısıl karmaşadan kendisini koparmaya yetecek kadar enerji alması her zaman olasılık dahilindedir. Bunun ortalama ne kadar süreceği etkinleşme enerjisinin ne kadar yüksek olduğuna bağlıdır. Helikazlar, DNA üzerindeki elektriksel yükte değişiklik yaratarak iki DNA ipliğinin ayrılması için gereken etkileşim enerjisini düşürür ve böylece açılış sürecini hızlandırırlar. Fakat helikazlar DNA'nın ikiye ayrılmasını kolaylaştırmakla kalmazlar; aynı zamanda DNA üzerinde bir makas gibi yol alırlar. ATP'den beslenen bir hareketle keserek ilerlemeyi sürdürürler. Bu bakımdan helikazlar aynı zamanda moleküler motorlardır. Bu hareketin nasıl gerçekleştiği hâlâ tartışma konusudur: Sıkı eşlenmiş bir güç atımı mıdır yoksa bir Brown cırcır düzeneği mi? Bu tartışma kulağa tanıdık gelebilir. Bazı araştırmalara göre ATP bağlanması, helikazın DNA'yla olan bağını zayıflatarak daha serbest bir biçimde hareket etmesine izin vermektedir. Bu, Brown cırcır düzeneğini desteklemektedir.

HABER SALMAK

Hücrelerimizdeki DNA, bedenlerimiz için gereken her bir proteini yapmaya yarayacak bilgiyi içerir. DNA yönergelerini gerçek proteinlere çevirmek için bu yönergelerin önce bir RNA ulağına aktarılması gerekir; ulak ise DNA yönergelerini, onları proteinlere çeviren makinelerin bulunduğu

atölyeye götürür. RNA, DNA'nın daha esnek ve daha kadim kuzenidir (çoğunlukla yaşamın RNA ile başladığına inanılır). RNA, omurgasında farklı bir şeker barındırır: riboz. Bu şeker DNA'daki deoksiribozun yerini tutar ve bu, RNA'yı DNA'dan daha esnek kılar. DNA gibi, RNA'nın da dört bazı vardır. Bunlardan üçü (A, C ve G) DNA'dakilerle aynıyken RNA'nın dördüncü bazı urasildir (U).

RNA da dört bazlı olduğundan DNA dili, RNA diline kolayca çevrilir (T yerine U koymanız yeter). Bu, hücre protein üretmek için DNA kütüphanesine her danıştığında RNA'nın ulak görevi üstlenmesine izin verir. DNA'nın mRNA'ya çevrilmesi RNA polimeraz denen bir moleküler makine tarafından gerçekleştirilir. Bu makine, *başlatıcı* denen belli bir DNA dizisi ile karşılaştığında çalışmaya başlar. Başlatıcı, RNA polimerazın çeviriye başlaması gereken noktayı belirtir. Başlatıcı her zaman çevrilecek diziden biri on ve diğeri otuz beş baz çifti önce bulunan iki kısımdan oluşur. Polimeraz, başlatıcısını bulduğu zaman DNA'ya bağlanarak bulduğu bilginin bir RNA eşini yapmaya başlar. RNA polimeraz, moleküler makinelerin İsviçre çakısıdır. DNA eşlenmesi bir dolu enzim ve moleküler makine gerektirirken RNA polimeraz tek başına iş görür; DNA'yı açar, çevirir, üzerinde ilerler, düzeltmeleri yapar ve sonunda eşleme sürecini bitirir.

Kalıtyazımda ilk adım başlatıcıyı bulmaktır. Ne yazık ki, DNA aşırı uzun ve sarılıdır. RNA polimeraz, DNA'daki milyonlarca dizi arasından belli bir tanesini nasıl bulabilir? Şaşırtıcı bir biçimde polimeraz, görünüşe göre DNA'ya zayıfça tutunup tekil ipliklerin üzerinde moleküler fırtınanın da yardımıyla hızlıca ve gelişigüzel kayarak hedefini çabucak bulmaktadır. Hiçbir şeyin gözden kaçmadığına emin olmak için polimeraz zaman zaman atlamalar yapar. Bu, büyük bir mağazada belli bir ürünü aramaya benzer: Önce rafları sıray-

la, doğrusal şekilde gezersiniz; ama aradığınızı bulamayınca mağazanın başka bir kısmına geçip yeniden denersiniz. Doğrusal arama ve atlamaların birlikte kullanımı ile verimli bir arama taktiği elde edilir.

Başlatıcı bulunduğunda polimeraz DNA'ya daha kuvvetli bağlanır. Hareket şimdi tek yönlü bir hal alır. Çöp RNA ortaya çıkaran birkaç hatalı çıkışın ardından polimeraz kalıtyazıma başlar. Kalıtyazım için DNA ipliklerinin açılıp düğümlerinin çözülmesi gerekir. RNA polimeraz, açık DNA'da bölgesel bir halka oluşturarak bunun üstesinden gelir. Bu, DNA ipliklerinin bütünüyle ayrılıp eşlendiği DNA eşlenmesinden farklıdır. Polimeraz, DNA'yı bölgesel olarak açıp çabucak geri kapatır. Kalıtyazılım, her bir DNA bazını bir RNA bazı ile eşleştirerek gerçekleştirilir. Uygun bazlar, trifosfatlar halinde etrafta yüzmektedir; ATP (A sağlamaktadır) ya da GTP, CTP ve UTP gibi. Bu yüklenmiş nükleotitleri kullanmanın büyük yararı vardır: Enerji yüklü nükleotitler büyümekte olan RNA zincirine eklenecek bazları sağlamakla kalmaz, aynı zamanda polimeraz makinesine DNA üzerindeki yolculuğu sırasında enerji sağlar.

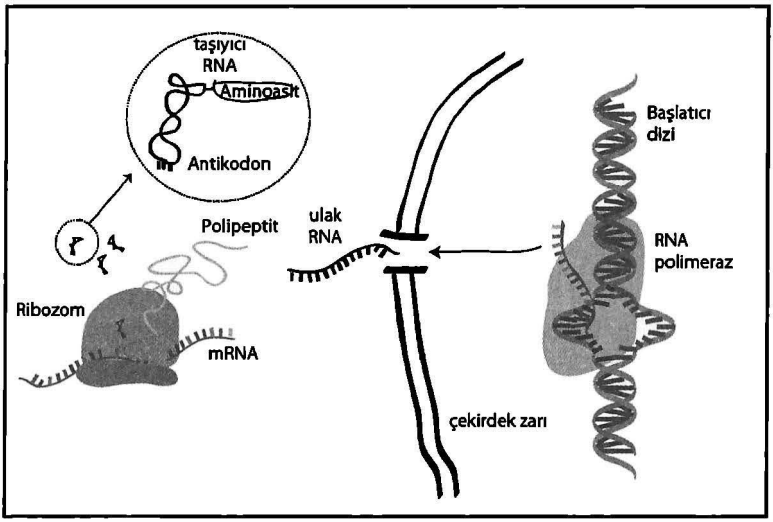
Kinezin hareketinden söz ederken kısaca tanıştığımız Block ve çalışma arkadaşları, optik tuzaklarını kullanarak RNA polimerazın hareketini de ölçmüşlerdi. Polimerazın her seferinde bir baz çiftlik adımlarla (0,34 nm) hareket ettiğini buldular. Polimeraz, DNA üzerinde ilerlerken peşi sıra giderek büyüyen bir RNA ipliği sürükler. Sarkan RNA parçasından kaynaklanan sürüklenme kuvvetine rağmen polimeraz makinesi hayli ilerleyicidir; DNA'nın üstünden düşmeden binlerce bazlık çeviri gerçekleştirir. Bir deneyde araştırmacılar, sürüklenen RNA ipliğine 30 pN kuvvet uyguladılar ama makine yılmadan yoluna neşeyle devam etti. Bu, DNA ile RNA'yı ayırmak için gereken kuvvetten çok daha büyük-

tür (kalıtyazımın gerçekleştiği yerde baz eşleşmesi ile geçici olarak bağlanmışlardır). Buna göre RNA polimeraz, RNA ve DNA'yı bir arada tutan kuvvetli bir mengene gibi iş görüyor olmalıdır.

PROTEİN YAPMAK

DNA yaşam döngüsündeki üçüncü basamak, DNA bilgisinin gerçek bir proteine çevrilmesidir. Bunu gerçekleştiren, bütün moleküler makinelerin anasıdır: *ribozom*. Bir insan ribozomu yetmiş beş kadar protein ile birçok uzun ve karmaşık RNA ipliğinin bir araya gelerek ürettiği iki temel birimin birleşiminden oluşur. Neden RNA iplikleri? Buraya kadar değindiğimiz makinelerin hepsi proteinlerden oluşuyordu. DNA'nın hücrelerimizde bu kadar önemli olmasının nedeni dayanıklılığıdır: RNA, tıpkı DNA gibi, bir bilgi taşıyıcısıdır; fakat RNA, daha esnek olduğundan karmaşık üç-boyutlu biçimlere bürünüp proteinlerin üretimi gibi tepkimelerde görev alabilir. Bu yüzden, DNA ve proteinlerden daha önce çoğunlukla ilk başta RNA'nın olduğuna inanılır. Bu, RNA-temelli bir makine olan ribozomu özel olarak ilgi çekici kılar. Dünyada yaşayan her şeyin ribozomları vardır ve hepsinin içinde RNA bulunur. Her bir insan hücresinde yaklaşık 100 milyon ribozom bulunur ve *E. coli* gibi küçücük bakteriler de bunlardan yaklaşık 10.000 adet barındırır.

Kalıtımsal malzemenin proteinlere çevrilmesi için bir tercüman gerekir. Çeviri, taşıyıcı RNA (tRNA) denen kısmen RNA, kısmen aminoasitten oluşan küçük moleküllerce yürütülür. Bir nevi sözlük gibi iş görürler: Bir kitabı İngilizceden Almancaya çevirmeye çalışıyorsanız, İngilizce sözcüğü sol sütunda, Almanca sözcüğü de sağ sütunda bulursunuz. Bu sözcükler, *flood* (İngilizce'de *sel*) ve Überschwemmung (Almanca'da *sel*) olduğunda, aralarında pek az ortak nokta



Şekil 7.15. Kalıtyazım ve çeviri: DNA'nın proteinlere dönüştürülmesi. Sağda: Hücre çekirdeği içerisindeki DNA iletisi RNA polimeraz denen bir makine tarafından ulak RNA'ya (mRNA) dönüştürülür. mRNA çekirdeği terk eder. Solda: Ribozom RNA'yı alıp taşıyıcı RNA'daki (tRNA) antikodon, mRNA'daki kodona eşlenecek biçimde uygun bir tRNA ile eşleştirir.

buluruz. Sözlük olmaksızın aynı anlama geldiklerini asla tahmin edemezdik (eşim bana Almanca sözcükler, İngilizce karşılıklarından her zaman üç kat uzun oluyor diye takılıyor). tRNA da aynı biçimde çalışır: tRNA molekülünün bir ucunda üç-harfli kodon dizisi ve öteki ucunda buna karşılık gelen aminoasit bulunur. AGU'nun serine ya da GGC'nin glisine karşılık geldiğini bilmenin hiçbir yolu yoktur. Bu moleküler sözlüğe gerek duyarız. Şekil 7.15, DNA'nın kalıtyazım ve çevirisini göstermektedir.

Sözlük aynı zamanda DNA'ya da işlenmiştir. DNA'mız, tRNA üreten tRNA sentaz enzimlerinin nasıl yapılacağına dair bilgi içerir. Bu enzimlerin, yalnızca doğru kodonla doğru

aminoasidin eşleşmesini sağlayan özel cepleri vardır. tRNA sentazlar, ribozom işini yapabilsin diye her çeşit tRNA'dan bolca bulunmasını her zaman sağlama alırlar. tRNAları kalıp olarak kullanan ribozom tıpkı bir dizgi makinesi gibi çalışır. Gelen iletiyi alır (mRNA halinde, RNA polimeraz tarafından üretilmiştir) ve mRNA üzerinde adım adım ilerleyip mRNA üzerindeki her kodonu uygun bir tRNA ile eşleştirir. Bir eşleşme yakaladığında, tRNA'ya bağlı olan aminoasidi ayırır ve uzamakta olan amino asit zincirine (yapımı süren proteine) ekler.

Ribozom, karşılaştığımız diğer moleküler makinelere göre daha karmaşık olsa da dikkat ederseniz hepsinin bir ortak yanı vardır: Bir yol üzerinde ilerlerler. Kinezin, mikrotübüller; miyozin, aktin iplikçikleri; helikaz ve RNA polimeraz, DNA üzerinde ilerliyordu ve ribozom da mRNA üzerinde ilerler. Bu örneklerin çoğunda yol, moleküler makine tarafından kalıcı olarak etkilenmez. Fakat bazı moleküler makineler üzerinde ilerledikleri yolu tam anlamıyla yerler.

Bir Yandan Yürü Bir Yandan Ye

Birkaç yıl önce ünlü biyokimyacı Gregory Goldberg'i Wayne Eyalet Üniversitesi'nde konuşmacı olarak ağırlamıştım. Greg harika, kuru bir mizah anlayışına sahiptir. Konuşmasının başında, "Goldberg'in biyofizik yasası"nı ilan etti: "Bir fizikçi, bir biyoloğa dönüştürülebilir, ama aksi yönde dönüşüm doğa tarafından yasaklanmıştır." Cömert davranıyordu: Bir fizikçinin biyolojiyi anlaması en az bir biyoloğun fiziği anlaması kadar zordur. Yeni bir alana girmeye çalışmak cidden zor iş. Aynı şeylerden söz ederken bile farklı diller konuşuruz.

Gregory Goldberg iri moleküllerin belli bir sınıfının incelenmesinde önde gelen bilim insanlarındandır; bunlara *matris*

metaloproteinazları ya da MMPler denir. MMPler, enzimlerdir. Goldberg'in MMPlerinin hammaddesi hücrelerarası ortamda bulunan şeylerdir. Bedenlerimize biçim veren kuvvetli lifleri oluşturan bir protein olan kolajen bunlara bir örnektir. Kolajen olmasaydı yaşamımızı "Kitle"* gibi yapışkan bir öbek olarak geçirirdik. Hücrelerimiz, kolajen ve diğer hücrelerarası ortam malzemelerinden oluşan dolaşık bir ağdaki örümcekler gibi kapana kısılmıştır. Bu ağın içinde hareket edebilmek için hücrelerin kendilerine yol açmaları gerekir. Bu, kolajeni yıkan bazı MMPler tarafından gerçekleştirilir. MMPler olmaksızın ölü hücrelerin yerlerine yenileri konamaz ya da eklemlerinizdeki kıkırdak yenilenemezdi. Ama MMPlerin bir de karanlık yüzü vardır. Kanser hücreleri yayılabilmek için MMPlerle işbirliği yapar ve metaztaza neden olurlar. Başka MMPlerinse kanserli urları besleyen yeni kan damarlarının oluşumuyla ilgileri vardır. Bu bakımdan MMPler, kanser araştırmalarının hedefleri arasındadır.

Dünyanın dört bir yanından başka araştırmacılar ("MMP çetesi" diye anılan bir ekip; bu çetenin önde gelen üyelerinden biri de beni, AKM kullanarak MMPleri ölçmeye yönelten Rafael Fridman'dır) ile birlikte Goldberg neredeyse yirmi yıldır MMPleri çalışmaktadır. 2004'te Goldberg ve Washington Üniversitesi'ndeki çalışma arkadaşları yeni, etkileyici bir buluş yaptılar. MMP-1 adındaki MMP'nin nasıl kolajeni yıktığı ve yayındığını anlamaya çalışıyorlardı. Yayınımın hızı, yayınım katsayısı ile ifade edilir; fakat tek bir molekülde yayınım katsayısı ölçmek sıkıntılıdır. Moleküller, sıradan bir mikroskopla görülmezler. Ama Goldberg'ün fizikçi çalışma arkadaşları tam da doğru yönteme sahipti.

---

* Yazar burada *The Blob* (Kitle) adlı 1958 tarihli ABD yapımı korku filmine gönderme yapıyor. (Çev. n.)

Hapsedilmiş polimerler, nanoparçacıklar ve sıvılarda yayınım ölçmek için floresan bağdaşım tayfölçürnü (FBT) kullanılır. Bu yöntemin anlaşılması oldukça kolaydır: Örneğin üzerine odaklanan bir lazer florofor özel moleküllerin lazerinkinden farklı bir dalgaboyunda ışık yaymasına neden olur. Lazerin odaklandığı yerde hiç florofor yokken, tamamen karanlık olur. Bir florofor gelişigüzel yayınımla lazer ışığına girdiğinde küçücük bir ışık parlaması gerçekleşir. Floroforlar gelişigüzel bir biçimde lazerin odağına girip çıkacağından ölçülen ışık artıp azalacaktır. Lazerin odaklandığı alanın büyüklüğünü bildiklerinden bilim insanları gezinen floroforlardan gelen gürültülü uyarımı çözümleyerek yayınım katsayısını belirleyebilirler. Bir floroforu daha büyük bir moleküle takarak MMP gibi moleküllerin yayınım katsayılarını belirlemek mümkündür.

Goldberg ve Washington Üniversitesi'ndeki çalışma arkadaşları, verilerinin basit yayınım modellerinin hiçbirine uymadığını gördüklerinde oldukça şaşırdılar. Bunun yerine moleküllerin, kolajen lifi üzerinde gezindikçe sabit bir yönde hareket ettikleri ortaya çıktı. Bu nasıl olabilirdi? Moleküller, yön tercihi olmayan gelişigüzel ısıl harekete tabidir.

Daha önce gördüğümüz üzere, yönlü hareket için serbest enerjinin ısıya bozunması gerekir. Ama MMPler enzimdir; etrafta gezinmek için ATP yıkmazlar. Termodinamiğin ikinci yasasını çiğnemeden nasıl tek bir yönde hareket edebilirlerdi? MMPlerin, üzerinde ilerledikleri yolu yiyerek enerji elde ettikleri ortaya çıktı. Bu, iyi bir taktik: MMP-1'in kolajeni yıkması gerekiyor. Enzim, eğer basitçe gelişigüzel yayınacak olsaydı, kolajen ipliğini gelişigüzel kısımlarından yıkardı. Bunun yerine MMP, kolajeni ilerlerken yıkarak düzenli bir biçimde kolajende hücrenin içinden geçebileceği büyük boşluklar yaratır.

Kolajendeki her kırılma, MMP'yi o yönde ilerlemekten alıkoyan bir yüksek etkinleşme enerjisi demektir. Bu yüzden kırılmadan uzaklaşmaktan başka bir seçeneği yoktur. Sonra bir kırılma daha üretir, ondan da uzaklaşır ve ilerlemeyi sürdürür. Goldberg ve çalışma arkadaşları buna, yanık-köprü düzeneği adını verdiler. Çok uzun bir köprüden arabayla geçtiğinizi düşünün. Sürdükçe, arabanın arkasından bir patlayıcı fırlatıyorsunuz. Geride, uzaktaki bölge şimdi köprüdeki büyük bir delik yüzünden geçilemez durumda. Arabayı, kendi yarattığınız deliklerden uzağa sürmekten başka bir seçeneğiniz yok. Bunu yapmaya devam ederseniz, sabit bir yönde ilerlemekten başka bir seçeneğiniz kalmaz. Bu düzenek, ikinci yasanın çiğnenmesine engel olur; zira yol-yiyici MMP'nin hareketini yönlendirmek için gereken enerji kolajenin yıkımından gelir.

Yönlendirme: Etkin Geçitler

Şimdiye kadar değindiğimiz örneklerden, neredeyse bütün moleküler makineler yollar üzerinde hareket ediyormuş gibi görünebilir (ATP sentaz hariç; o, dönüyor). Fakat hücrelerimizdeki diğer birçok moleküler makine neredeyse hiç hareket etmez. Tulumbalar buna örnektir. Hücrelerimiz su, proteinler, şekerler gibi küçük moleküller ve bolca iyon ile doludur. Hücrelerin, içlerindeki küçük moleküllerin ve iyonların miktarını denetim altında tutmaları gerekir; tutmazlarsa başları büyük belaya girebilir.

Çocukluğumda Almanya'dayken, evimizin ikinci katındaki balkona kadar yetişen büyük bir kiraz ağacımız vardı. Yazın olgun, kırmızı kirazları balkondan toplayabilirdiniz. Yağmur yağınca kirazlar genelde yarılıp açılırdı. Bunun nedeni geçişimdi. Kiraz kabukları su geçirir ama şekerin çıkışına izin vermezler. Kirazın içindeki fazladan şeker, denge-dışı

bir durum yaratır. Şeker molekülleri kendilerini kirazın dışındaki şeker yoğunluğuna eşit olacak biçimde suyla seyreltmek isterler. Yağmur yağdığında şeker moleküllerinin eline bir fırsat geçmiş olur. Kendileri kirazdan kaçamasa da kirazın içi ve dışındaki şeker dengesizliği suyu kirazın içine çeken bir basınç yaratır. Kiraz şişer ve sonunda patlar.

Eğer içlerindeki şeker, protein, su ve iyonları düzenleyemeselerdi hücrelerin başına aynısı gelirdi. Hücreler, oldukça geçirimsiz bir zara sahiptir; ama bu zar çok çeşitli özelleşmiş gözenekler ile bezenmiştir. Gözeneklerin çoğu edilgendir: Moleküller bu yolla yayınıyorsa, onların geçişine izin verirler. Ama bazıları makinedir; belli iyon ya da molekülleri ATP harcayarak hareket ettiren tulumbalardır.

Çoğunlukla, iyonlar dengeye gelene kadar bir zardan geçerler. Edilgen gözenekler, iyonların yayınımına izin verir; fakat iyonlar ancak denge sağlanana kadar yayınacaktır. Hücrenin içiyle dışı arasında denge dışı bir derişim farkı yaratmak için etkin bir tulumba gereklidir. Böyle bir tulumba olan *sodyum-potasyum tulumbası* sodyumu hücre dışına ve potasyumu hücre içine basarak çoğu hücrede genelde bulunan yüksek potasyum, düşük sodyum ortamını korur. Bu tulumbalar, hücre için son derece önemlidir. Hücrelerimiz genellikle enerjilerinin üçte birini sodyum-potasyum tulumbalarını işletmeye ayırırlar. Sinir hücrelerinde bu tulumbalara ayrılan enerji üçte ikiye kadar çıkabilir.

Mekanistlerin Demokritos'tan Helmholtz'e kadar haklı çıktıklarını gördük: Yaşam, makineler üzerine, tulumbalar ve motorlar üzerine kuruludur. Bu makinelerin hayal edebilecekleri herhangi bir makineden çok farklı şekilde çalışan moleküler nanobotlar olduklarını bu bilim insanları bilemezlerdi. Yaşamın nanomakineleri, karmaşanın çocuklarıdır. Karmaşa tarafından işletilirler ve gelecek bölümde göreceğimiz üzere, en azından kısmen, karmaşa tarafından tasarlanmışlardır.

8

Saat ve Ribozom

Kullanışlı olan her küçük farklılığın korunması ilkesine Doğal Seçilim adını verdim.

— CHARLES DARWIN

Şu ana dek söylenmiş olanlar, böyle bir makinenin oluşumunda işletilmiş yeteneğe olan hayranlığımızı artırmalı mıdır? Yoksa bunun yerine bizi hepten ters çıkarıma, yani sanat ve yetenekle ilgili diğer bütün kanıtlar aynı kalsa ve bu son ve üstün sanat eseri şimdi diğerlerine eklense bile bu işte ne sanat ne de yetenek olduğu karısına mı yöneltmelidir? Bu kanı saçma düşünceler ortaya atılmaksızın sürdürülebilir mi? Evet; bu, tanrıtanımazlıktır.

— WILLIAM PALEY

William Paley (1743-1805) on sekizinci yüzyılda yaşamış bir din adamı, teolog ve filozoftu. Çalışmaları zamanının din adamları tarafından o kadar takdir edilmiştir ki Kilise onu St. Paul Katedrali'nin başpapaz yardımcısı ve Bishopwearmouth'un bölge papazı yaparak filozof bir rahibe göre büyük bir gelir bahşetmiştir. Paley'nin ahlak üzerine yazıları şaşırtıcı derecede çağımıza uygundur. Köleliğe ve zenginlerin fakirliğin sürdürülmesine etkin bir biçimde destek

vermelerine saldırmıştır. Hatta eğer kendilerini ve ailelerini beslemeleri için gerekliyse fakirlerin hırsızlık yapma haklarını bile savunmuştur. Paley doğa tarihi hakkında gericiydi. Bilimsel devrimin son zamanlarında yazarken, devrim öncesi zamanlara sarkan bir doğa felsefesinden esintiler taşıyordu. Buna rağmen eserleri o kadar ikna ediciydi ki, genç Darwin bile hayranları arasındaydı. Din adamlarını memnun eden şey, onların gözünde Paley'nin mekanik felsefeyi yerle bir etmiş olmasıydı. Maddenin kendini düzenleyebileceğine inanmanın saçma olduğu konusunda ona katılıyorlardı. Dahası, maddenin kendini düzenlediğine inanmanın tanrıtanımazlıkla bir olduğuna karar vermişlerdi.

Paley'nin metinlerinin en ünlü bölümü, *Doğa İlahiyatı*'nın giriş kısmıdır: "Yerde bir saat bulduğumu düşünün; bu saatin nasıl olup da oraya gelmiş olduğu merak uyandırıcıdır; pek çok parçasının ... bir amaç uğruna bir araya getirildiği yargısına vardığımızdan saatin bir yapıcısı olmalıdır: onu [bir] amaç uğruna meydana getirmiş ... bir veya birkaç imalatçı olmalıdır."

Canlıları saatlere benzetmek o kadar ikna edicidir ki La Mettrie gibi radikal bilinemezciler, Paley gibi Hristiyan savunucular ve hatta Schrödinger gibi yirminci yüzyıl bilim insanları bile, birbirlerinden tamamen farklı bakış açılarını savunmak için bu benzetmeyi kullanmışlardır. Bir canlıyla bir saatin yüzeysel benzerliğinin tanrıtanımazlık, Hristiyanlık ve bilimsel şüpheciliğin savunulmasında kullanılması şüphe uyandırmalıdır. Bu başarılı bir benzetme midir?

Bu soruyu cevaplayabilmek için gelin farklı bir şekilde soralım: Bedenlerimiz, tasarladığımız makinelere benzer mi? Bunun cevabı açık bir şekilde hayır olmalıdır. Descartes veya La Mettrie bedenimizi oluşturan tulumbalar, borular ve kollardan ne kadar etkilenmiş olurlarsa olsunlar, artık insan

bedeninin moleküllerin etkileşiminden ortaya çıkmış bir şey olduğunu biliyoruz. Elbette ki vücudumuzda büyük ölçekli tulumbalar, borular ve kollar da vardır; ancak kendi başlarına bizi neyin canlı kıldığını açıklayamazlar. Bakteriler de canlıdır ancak ne kalpleri, ne ciğerleri, ne de kolları vardır. Tulumbalar ve kollar içeren bir makine yapabiliriz ancak ne kendi besinini bulabilecek, ne de üreyebilecektir.

O halde, eğer yaşamın temelinde moleküller varsa, atomik hareketin rastlantısal gücüne maruz kalmak zorundadır. Şansın önemli ölçüde etkisi olacaktır. Gerçekten de moleküler makinelerin hareketine ya da evrimin işleyişine bakacak olursak, şans yaşamın ayrılmaz bir parçasıdır. Şansın herhangi bir etkiye sahip olması, bir saatin çalışmasında isteyeceğimiz en son şeydir; şans sadece zararlıdır.

Paley şansı alaya almıştır: "Şans bize ne yapar ki? Örneğin insan bedeninde şans, yani nedenlerin tasarım olmaksızın işlemesi bir ur, bir siğil, bir ben, bir sivilce oluşturabilir ancak asla bir göz oluşturamaz. Cansız nesneler arasında bir toprak yığını, bir çakıl, bir damla sıvı belki, ancak karmaşık bir mekanizmanın değerli bir amacına yanıt verebilecek bir saat, bir teleskop, herhangi bir düzenli beden şansa atfedilemez. Bir yerlerde amaç olmadan bu gibi bir şeyin var olduğu görülmemiştir." Bu bakış açısında ilgi çekici bulduğum şey, bir sıvı damlasının aslında gereklilikten doğmasına rağmen Paley'nin bunu şansa indirgemiş olmasıdır. Bir çakıl, elbette ki kısmen şanstır ancak aynı zamanda atom altı parçacıklardan atomların oluşmasının, yüksek kütleye sahip yıldızlarda ve süpernovalarda ağır elementlerin üretilmesinin, karmaşık silikat minerallerinin kristalografisinin ve yanardağlardan toprak aşınmasına kadar sayısız karmaşık yer hareketinin sonucudur. Öte yandan bir siğil gelişmiş, evrimleşmiş bir makinenin, bir virüsün sonucudur. Paley bunları bilemezdi,

ancak bu, derinden inanılan şeylerin çağdaş bilginin ışığında ne hale geldiğini iyi göstermektedir.

Belli ki saati yapan birileri vardır, çünkü saat narin bir tasarımdır. Belli bir görevi yerine getirir, sadece bütün parçaları çalıştığında iş görür ve şans veya karmaşanın herhangi bir müdahalesiyle başa çıkamaz. Kısacası, saat aslında o kadar karmaşık değildir. Esasında saatler, bir hücrenin en küçük organeli ile kıyaslandıklarında (bir saat imalatçısı olan babamdan özür dilerim) yalnızca çocuk oyuncaklarıdır. Öte yandan pek çok doğal varlık, Paley'nin bile tasarımın dışında tutacağı kadar aşırı derecede karmaşıktır: yıldızlar, gezegenler, dağlar, volkanlar, hava durumu ve hatta çakıllar.

Paley üreme konusunda da benzer şekilde yanılmıştır. Bir gün bir saatin "kendisine benzeyen" başka bir saat yapabileceğini bulma olasılığına kafa yormuştur. Bu, yaratıcının bizim düşündüğümüzden bile daha gelişmiş olduğunun bir kanıtı olmaz mıydı? Üreyebilme becerisi, saatin karmaşıklığını daha da artıracak ve bu yüzden bir yapıcısı olma olasığını *daha* da artıracaktı. Ancak bu mantık kusurludur: Eğer bir saat başka bir saati yapabiliyorsa, bir yaratıcıya gerek duymayacağı açıktır. Bir saat, basitçe başka bir saatin sonucu olacaktır. Ve Paley'nin dediği gibi, eğer yeni saat öncekine "benziyorsa", neden eskisinden biraz daha iyi olmasın ki? İlginç bir şekilde, Paley yeni saatin benzer, fakat tamamen aynı olmadığını söylerken işin içine şansı katar. Ne kadar benzer? Yavruda neyin aynı, neyin farklı olacağını ne belirler? Eğer bu şekilde üreyen ve yapımları süresince bilgi alışverişinde bulunan ve her gelişimi sonraki nesle aktaran böyle milyonlarca saat varsa, zamanla daha iyi hale gelmeleri beklenmez mi?

Saatlerin bebek yapamayacakları itirazında bulunmanızdan önce size sadece Paley'nin savını izlediğimi hatırlatmama izin verin. Elbette ki kendi kendine üreyebilen bir saat, bir

saat olmayacaktır. Bir saat, dışsal bir amaç için yapılmış bir araçtır; zamanı belirtmeye yarar. Üremeye başlarsa, içsel bir amaç edinir: verimli üreme. Eğer zamanı ne kadar iyi gösterdikleri üzerine saatleri seçen ve sadece iyi olanların üremesine izin veren bir dış etmenimiz varsa, nesiller geçtikçe daha iyi saatler olacaktır. Ancak dış etmenin eksikliğinde saatler, artık saat olmayacaktır çünkü varoluş amaçları sadece verimli üremek olacaktır. Bir süre sonra (hangisinin en iyi ürediğine bağlı olarak) pek çok farklı makineye ayrılacaklardır.

Şimdi bir adım daha ileri gidelim. Hiçbir şey enerji olmaksızın çalışamaz. Bir saatin çalışması için kurulması gerekir. Bir canlının beslenmesi gerekir. Bu nedenle, üreyen saatlerin enerji tüketmesi gerekir. Rekabet ettikleri saatleri, üremek için yeterli enerji elde etmede geçmeleri gereklidir. Bu, ekmek paralarını kazanmaları için farklı yollar bulmalarını gerektirir. Biyologlar bu rollere *niş* der. Kısa süre içinde saatlerimiz tanınmaz hale gelir. Sadece birkaçı hâlâ zamanı gösterir. Dişlileri artık sindirim veya hareket için kullanılacaktır. Kollar ve kadran, bilgi değiş tokuşu için uygun bir eş aramaya yarayacaktır. Belki de karanlıkta parlayan bir akrep kolu, karşı cinsi baştan çıkaracaktır. Evrim budur, yaşam budur.

Evrim

Moleküller nasıl evrimleşir? Türlü Amerikan okullarının yönetim kurullarındaki olaylı tartışmalara rağmen evrimin işleyişi, Bölüm 1'de görmüş olduğumuz gibi açık bir zihinle incelendiğinde oldukça barizdir. Bu gözlem Darwin'in destekçisi Thomas Huxley'in, bunu daha önce düşünmemiş olduğuna hayıflanmasına neden olmuştur. Moleküller, bir organizmanın büyük ölçekli kısımlarına uygulananla aynı doğal seçilime tabidirler. Aslında proteinlerin evrimi, evrimin nasıl işle-

diğini görmek için iyi bir yoldur çünkü proteinin aminoasit dizisiyle DNA'da bu diziye karşılık gelen bilgi arasında doğrudan bir ilişki vardır. Her moleküler keşif (yükü biraz daha hızlı taşıyacak veya DNA'yı okurken daha az hata yapacak her yeni moleküler makine) kendisini taşıyan canlıya bir üstünlük sağlayacaktır. Bunun sonucunda daha iyi moleküler düzenekler, bir toplumda daha yaygın hale gelecektir. Veya koşullar değiştikçe, değişen koşullarla başa çıkmak için yeni makineler ortaya çıkacaktır.

Proteinlerin evrimine ünlü bir örnek, 1975'te bir Japon naylon fabrikasının atık suyunda yeni bir *Flavobacterium* türünün keşfedilmesidir. Bu bakteri, naylon üretimi ile ilişkili kimyasalları yani doğada var olmayan kimyasalları yemek üzere evrimleşmiştir. Daha fazla inceleme yaptıklarında araştırmacılar bakterinin içinde, naylonu parçalamasına yardımcı olacak şekilde evrimleşmiş üç enzimi ayırt etmeyi başarmışlardır. Naylon atık suyunda büyümemiş *Flavobacterium* türlerinde bu enzimlerin hiçbiri bulunmaz. Bakteriler bu yeni enzimleri nasıl icat etmişlerdir? Bakteriler çok hızlı çoğalır ve sayıları çok fazladır. Bu sebeple çok hızlı evrimleşebilirler. Bu durumda birkaç *Flavobacterium* hücresinin DNA eşleme düzeneği bir hata yapmış gibi görünüyor. Makine bir DNA dizisini yanlış bir başlangıç noktasından okumaya başlayarak bir çerçeve kayması değişinimine neden olmuştur. Sonunda çıkan proteinin naylonu parçalayabilmesi, bununla dolu bir havuzda yaşarken faydalı olmuştur. Rastlantının bu kadarı gerçekten inanılır mıdır? Kesinlikle. Tek bir insanın vücudunda 10^{14} (yüz bin milyar) bakteri olduğunu göz önünde bulundurun. Japonya'daki fabrikanın atık suyunda bundan çok daha fazlası bulunuyor olmalıdır. Bir bakterinin ortalama bölünme süresi yirmi ila altmış dakikadır. Bölünme sürelerinden yavaş olanı dikkate alır ve naylon fabrikasının on yıldır

üretim yaptığını varsayarsak, bakteriler 87.600 nesil geçirerek sayısız bakteri üretmiş olmalıdır. Bu devasa bakteri sayısını ve pek çok nesli göz önüne alırsak, pek olası gözükmeyen bir değişinim, tanımlı olasılıklar evrenine kaymaya başlar. Ancak işimiz henüz bitmedi: İlk enzim naylonu sindirmekte iyi olmayabilir; ancak kötü bir naylon sindirim enzimine sahip olmak, hiç enzime sahip olmamaktan daha iyidir. Kötü naylon sindirim enzimi bakteri toplumunda bir kez yayıldıktan sonra hızla evrimleşmiş ve gelişmiştir.

Çok ağır, adım adım ilerleyen ve biraz da tahmin edilmesi güç olan evrim süreci, insanların bu işleyişin hücrelerimizdeki karmaşık düzeneğe yol açtığına inanmasını zorlaştırmaktadır. Ancak yukarıdaki örneğin gösterdiği gibi bazen evrim birkaç yıl içerisinde gerçekleşir. Ne çarpıcıdır ki, yaşam tarihinin büyük kısmı (yaşam tarihinin, yani üç milyar yılın neredeyse üçte biri) tek hücreli organizmaların evrimi ile geçmiştir. Çok hücreli canlılar sadece son bir milyar yılda ortaya çıkmıştır. Çok hücreli yaşamın ortaya çıkması neden bu kadar uzun zaman almıştır? Hücrelerimizdeki karmaşık düzeneğe bakarsak bir cevap belirir: İlkel enzimleri bugünkü karmaşık hücre düzeneğine çevirmek, milyarlarca yıllık evrim gerektirmiştir. Çok hücreli canlılar, ancak asgari bir verimlilik ve karmaşıklık derecesine ulaşıldıktan sonra gerçekleşebilmiştir. Yaşamın ilk zamanlardaki evrimi hakkındaki bu görüş, temel bir seviyede çok hücreli hayvanların (ve bitkilerin) tamamının aynı oldukları gözlemiyle desteklenmektedir. Kulağa aşağılayıcı gelse de nanometre ölçeğinde bir insanla bir mantar arasında pek az fark vardır. Hücredeki temel alet edevatlar aynıdır. Bu alet takımının karmaşıklığı, gelişmesi için gereken uzun zamanı mazur kılar. Alet seti bir defa ortaya çıktıktan sonra, evrim ahtapottan kızılağaç ormanlarına kadar insana parmak ısırtacak çeşitlilikteki çok hücreli canlıları yaratmakta

özgür kalmıştır. Bir açıdan yaşamın gerçek gizemi, moleküler ölçekte yatar. Evrimin asıl işinin yapıldığı yer burasıdır. Gerisi pastanın süsüdür.

Moleküler makinelerimizin fosil ataları, çoğunlukla temelli kaybolmuşlardır. Proteinler üç milyar yıl boyunca aynı kalmaz ve ilkel makinelere sahip bakteriler uzun zaman önce yenip gitmiştir. Bakterilerden kayda değer bir şekilde farklı oldukları bulunan kadim mikroorganizmalar bile gerçekte kadim değillerdir. Bir açıdan bakteriler ve kadimler bizden daha fazla evrimleşmişlerdir. Her şeyden önce çok daha fazla zamanları vardı ve çok daha hızlı üremişlerdir. Bunu akılda tutarak, moleküler makinelerin nasıl evrimleşmiş olduklarını belirlemek için *herhangi* bir şey yapılabilir mi?

Ribozomu veya bir kinezin moleküler motorunu ortaya çıkaran evrimsel adımları tam olarak açıklamaya çalışmak, bir suç gerçekleştikten asırlar sonra onu çözmeye çalışmaya benzer. Karın Deşen Jack kimdi? Bunu bilmek artık imkânsızdır. İzler silinmiştir. Ancak geride kalan az sayıdaki kayıt ve belirsiz kanıtlarla, nasıl bir insan olmuş olabileceği hakkında makul birkaç sav ortaya koyabiliriz. Aynı yolla, moleküler mekanizmaların evrimiyle ilgili geride kalan az sayıdaki ipucuna bakarak makul bir öyküye ulaşmaya çalışırız. Bu durumda *makul*, öykünün kanıtlara uygun olduğu ve bilinen fizik ve kimyayla örtüştüğü anlamına gelir. Makul bir öykü oluşturulduktan sonra, parçaları laboratuvarda sınanabilir. Eğer bu sınavları da geçerse elimizde *olası* bir öykü kalır, ancak kanıtlanmış bir öyküye asla ulaşamayız. Jack kaçak olmaya devam edecektir.

Ribozomun evrimi, iyi bir örnektir. Bölüm 7'de, RNA'nın hem DNA'dan, hem de proteinlerden daha eski bir molekül olduğuna inanıldığını belirtmiştim. Hangisinin (protein kodlayan DNA'nın mı yoksa DNA'nın okunması için gerekli olan

proteinlerin mi) önce ortaya çıktığı sorusu yumurta mı tavuktan çıkar yoksa tavuk mu yumurtadan sorusuna benzer; yanıt açık değildir. RNA bilgi taşır ve tepkimeleri yürütebilir. Ayakları olan ve yumurtlayabilen bir yumurta gibidir. Tavuğa gerek yoktur.

RNA'nın tepkimeleri yürütebilme becerisi, oldukça yeni bir keşiftir. 1982'de Boulder'daki Colorado Üniversitesi'nden Tom Cech ve çalışma arkadaşları, bir bakterideki özel bir RNA ipliğinin, protein temelli enzimler olmadan kendini kısmen keserek RNA ipine geri bağlayabildiğini bulmuşlardır. Harry Noller ve Santa Cruz'daki California Üniversitesi'nde çalışan ekibinin ribozomdaki RNA'nın da enzimsel özelliklerinin olduğunu keşfetmesi, bundan ancak on yıl sonra gerçekleşmiştir. Yıllar içinde ribozomdaki ağır işlerin tamamının RNA tarafından yapıldığı ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar, protein bileşenlerini çıkardıktan sonra verimlilik ve aslına uygunlukta bir miktar azalma olsa da RNA hâlâ ulak RNA'yı işleyebilmiş ve bir aminoasit zinciri üretebilmiştir.

Ribozomun proteinlere değil de RNA'ya gereksinim duyduğunun keşfi, enzimsel RNA'nın yaşamın ilk evrelerinin asıl bileşeni olabileceğini düşündürmektedir. 2010'da yayınlanmış olan bir makalede Rehovot'daki (İsrail) Weizman Bilim Enstitüsü ve Heidelberg'deki (Almanya) Avrupa Moleküler Biyoloji Laboratuvarı'ndan araştırmacılar, aminoasit zincirinin oluştuğu RNA cebinin tüm ribozomlarda aynı olduğunu ve ribozomun ilk atasının bu olabileceğini öne sürmüşlerdir. Eğer gerçekten de önce RNA ortaya çıkmışsa ve kesilme ve yeniden şekillenmeyle kendi evrimini yönetebiliyorsa, sonradan proteinleri oluşturacak bir yapı haline gelmiş olabilir. Bundan sonra proteinler, RNA'nın olabileceğinden daha iyi enzimler olarak ilkel organizmaya yardımcı olmuşlardır. Bu ilk protein-üreten RNA, sıkı denetlenen protein ürünleri ya-

ratamamış olabilir, ancak daha gevşek denetim aynı zamanda daha çok değişinime ve muhtemelen daha hızlı evrime yol açacaktır. Sonunda, RNA ve proteinlerden oluşan ortak güç, DNA'yı keşfetmiştir ve modern hücre de yoldadır. Bu olası bir hikâyedir.

Moleküler makinelerin evrimini göz önüne almanın bir başka yolu, aile ilişkilerine bakmaktır. Önceki bölümde kinezin ve miyozinin motor bölgelerinde pek çok benzerlikler olduğuna değinmiştik. Bu, ortak ata olan bir proteinden evrimleşmiş olabileceklerine işarettir. Miyozin ve kinezin, ATP'nin bağlanmasından ileri gelen şekil değişiklikleriyle ilişkili anahtar bölgelerinde aynı belli halkalara sahiptirler. İlginç bir şekilde bu yapıları, makine olmayan ancak moleküler anahtar olan G-proteinleriyle de paylaşırlar. Moleküler anahtarlar, kimyasal iletileri hücrenin dışından içine iletirler. Bölüm 6'da moleküler motorların, bir denetim molekülüne bağlandıklarında şekillerini değiştirebilen enzimlerden evrimleşmiş olabilecekleri hakkında fikir yürütmüştük. Moleküler anahtarların çalışmasını sağlayan şey, bu alosterik etkidir.

G-proteinlerinin kinezin ve miyozinle ilişkilerinin ayrıntıları, milyarlarca yıllık evrimin sisinde kaybolmuştur. Yine de motor proteinlerin moleküler anahtarlardan evrimleşmiş olmaları epey makuldür ve G-proteinleriyle ilişkileri, bu fikri destekler. Kinezin, miyozin ve G-proteinleri arasındaki ilişki, evrimde farklı moleküllerdeki benzer parçaların genelde farklı amaçlara hizmet ettiklerini gösterir. Kinezin gibi karmaşık bir makinenin evrimi, her parçanın sıfırdan icat edilmesini veya tüm parçaların eş zamanlı olarak var olmasını gerektirmez. Konu evrim olunca, neredeyse her yol mübahtır.

DNA'mızdaki belirli genler tarafından kodlanmış iki protein olan A ve B'yi hayal edelim. Protein A ve B farklı işlevler yerine getiriyor olsunlar. Ya B proteininin bir kısmı A protei-

ninin daha iyi çalışmasını sağlıyorsa, veya A ve B'nin parçalarının birleşimi, tamamen yeni bir işleve sahip yeni bir protein yaratıyorsa? Sorun değil. Bazen protein dizileri, kopyalama hataları veya virüslerle genomumuzda toplu halde yer değiştirirler. Bu farklı protein birlikleri tamamen yeni bir moleküler makine oluşumuna yol açabilir. *Flavobacterium*'un naylon yiyen enzimi buna örnektir.

Kinezin ve miyozin fi tarihinde oluştuklarından beri pek çok biçime evrimleşerek büyük üstaileler oluşturmuşlardır. Böyle bir aile ağacının bir örneğini Bölüm 7'de görmüştük. Aynısı neredeyse tüm moleküler makineler için geçerlidir. Her protein, işleri çoğunlukla oldukça farklı olan ancak açıkça ortak bir atadan gelen akraba proteinlerle birlikte bir ailenin parçasıdır. Evrim asla sona ermez; süreğendir. Evrim, yürüyen moleküler motor gibi yeni bir numarayı bir kere keşfettiğinde, kısa süre içinde hepsi özelleşmiş işlevler yerine getiren pek çok türünü üretir.

Yaratılışçıların yaygın bir itirazı, bazı biyolojik yapıların "indirgenemez derecede karmaşık" olduğudur. Bundan kastettikleri şey, birbirine bağlı çok sayıda parçası olan bir yapının, bu parçalardan herhangi biri çıkartıldığında tamamen işlevsiz hale gelmesidir. Örneğin bir araba nasıl evrimleşebilir? Motor, zaten bir araba olmaksızın evrimleşemeyecektir. Ancak araba da motor olmadan evrimleşemez. Arabanın tüm parçaları, birbirine uyacak şekilde tasarlanmış olmalıdırlar. Hiçbir parça dışarıda bırakılamaz. Yani, bu sava göre moleküler makineler, aynı araba gibi *tasarlanmış* olmalıdırlar. Bunun sebebi (savlarına göre) bir moleküler mekanizmanın ancak tüm parçalar yerindeyken işlevsel olduğudur. Evrimsel ara basamaklar mevcut olamaz. Moleküler makinenin öncül versiyonlarının tamamı (gerekli tüm parçalar yerli yerinde olmadıkça) tamamen işlevsiz olacaktır.

Yüzeysel olarak makul gözüken bu düşüncenin pek çok sorunu vardır. İlk olarak, görmüş olduğumuz üzere yapılar, çoğu zaman daha önce tamamen başka bir amaca hizmet etmekte olan parçalardan bir araya getirilmişlerdir. Arabayı ele alalım. Arabanın farklı parçaları, kesinlikle tamamından bağımsız olarak geliştirilebilir. Bir motor, sabit bir makineyi çalıştırabilir. Günümüz otomobillerinin Bölüm 2'de görmüş olduğumuz Kardan mafsalı, bir su tulumbası olarak icat edilmiştir. Pistonlar, hava tulumbalarından gelmişlerdir. Viteslerse saatlerden. Liste böyle uzar gider. Evrimde bu çeşit çok yönlülüğün sayısız örneği vardır. Orta kulağımızdaki kemikler, atalarımız arasındaki bir çiftyaşamlının çene kemiğinden evrimleşmiştir. G-proteini gibi moleküler anahtarlardan motor proteinlerin evrimi başka bir örnektir.

İndirgenemezlik savındaki ikinci sorun, tamamlanmamış yapıların ilk başta gözüktüğü kadar işe yaramaz olmayacağıdır. Gözü ele alalım. Bir merceği olmayan göz gerçekten de işlevsiz midir? Hiç göze sahip olmamaktan kesinlikle yeğdir. Bazı mikroorganizmaların ışığa hassas noktalarından memelilerin gelişmiş gözlerine kadar gözlerin neredeyse tüm ara evreleri doğada bulunur. Aynı şey motor proteinler için de geçerlidir. İki bacaklı motor proteinlerin ilerleyebileceklerini görmüştük. Ancak tek bacaklı motor proteinler de, çok daha düşük verimlilik ve azalan ilerleme hızına karşın, saf bir Brown cırcırı mekanizması kullanarak çalışabilirler. Hatta daha önce bahsetmiş olduğumuz gibi tek bacaklı kinezinler de mevcuttur; iki bacaklı bir kinezin oluşturmak için birleşip birleşmeyecekleri hakkında jüri henüz kararını vermemiştir. Yine de, en azından kuramsal olarak tek bacaklı bir kinezinin çalışmaması için fiziksel bir sebep yoktur. Kinezin 1 kadar iyi olmayabilir, ancak hiç kinezine sahip olmamaktan iyidir.

Pek çok biyolog, DNA'daki evrimsel değişimleri yaşam tarihinin en önemli olayları olarak görür. Bu görüşün savu-

nucularından birisi, "bencil gen" fikriyle meşhur olan evrim biyoloğu Richard Dawkins'tir. Bu görüşün lehine söylenebilecek pek çok şey olsa da biyologlar genellikle fizik yasalarının rolünü hafife alırlar. Bu nedenle DNA-merkezli görüş, gereklilikten çok şansa vurgu yapar. DNA-merkezli görüş, evrimin gelişigüzel olduğunu ve gelişigüzelliğin tek başına yaşamın karmaşıklığını yaratmaya yetmeyeceğini savunmak için evrimdeki şans kavramını kötüye kullanan yaratılışçılar tarafından sömürülmüştür.

Eğer evrim gerçekten de gelişigüzel olsaydı, sadece tek bir işlevsel proteini yaratma olasılığı astronomik derecede küçük olurdu. Bu olasılıkları hesaplamak, yaratılışçılar arasında yaygın bir alaveredir. Ancak bu olasılıkların konumuzla ilgisi yoktur. Evrim gelişigüzel *değildir*: Gelişigüzel bir süreçle (değişinim) gelişigüzel olmayan, gerekli bir sürecin (seçilim) işbirliğidir. Şans ve gerekliliğin dengesinin sonucudur. Bu alışılmadık bir şey değildir; *doğanın tamamı bu dengenin sonucudur*. Eğer öyle olmasaydı, doğa (gerekliliğin galip gelmesi halinde) her yerde aynı olan, hiçbir özelliği olmayan bir yapı veya (şansın galip gelmesi halinde) herhangi bir yapısı olmayan gelişigüzel bir "yığın" olurdu. Doğada her seviyede görmüş olduğumuz zarif düzen ve göz kamaştırıcı çeşitlilik (galaksilerden moleküllere kadar) şans ile gerekliliğin verimli etkileşimin sonucudur. Dünya'nın ya da bir çakılın var olma olasılığı nedir? Bu, anlamsız bir sorudur. Benzer şekilde, bir proteinin gelişigüzel oluşması olasılığı nedir sorusu da anlamsızdır. Evrim gelişigüzel değildir.

Yaratılışçıların çok sevdikleri bir başka soru da şudur: "Tüm bu bilgi nasıl oldu da DNA'ya girdi?" İlk bakışta DNA'daki bilgi hakkındaki sorular haklı gözükmektedir. Bunun sebebi, DNA'daki iletinin bir anlamı olmasıdır. Bir proteinin yapısını belirler ya da bir canlının gelişimini düzenler. Ancak anlam ile bilgi aynı şey midir? Bilgi ölçülebilir; anlam

ise ölçülemez. Yaratılışçılar bu iki terimi işlerine geldiği gibi birleştirirler. Bilgi kuramına göre bir ileti, ne kadar gelişigüzel olursa o kadar çok bilgi içerir. Daha önce değindiğimiz gibi, mükemmel bir düzene sahip olan bir mesaj pek az bilgi içerir. AAAAAAA bilgi içermezken ACTTGATTC bilgi içerir. Peki ACTTGATTC'nin bir anlamı var mıdır?

Bana göre DNA'nın bilgi içerdiği fikri, yaratılışçılık ve akıllı tasarım masalının korunmasının ana zanlılarından birisidir. Her şeyden önce genetik dizi ile kalıtyazım ve çeviri makinelerinin tamamı olmaksızın DNA ne bilgi, ne de anlam içerir. Daha da kötüsü, kesin konuşmak gerekirse DNA proteinleri dizgilemez bile; en azından işlevsel proteinleri dizgilemez. DNA sadece bir proteinin aminoasit dizisini dizgiler. Bir proteinin işlevselliği üç boyutlu biçiminden ve proteinin çeşitli kısımlarının fiziksel özelliklerinden gelir. Bu biçim, amino asitlere etki eden *fiziksel kuvvetlerin* (bazen çaperoninlerin de yardımıyla) sonucu olan protein katlanmasının sonucudur. Bir proteini işlevsel biçimine sokacak bilginin büyük kısmı fizik yasaları ve bu fizik yasalarının mekân ve zamanda iş görmelerinde saklıdır. Yaşamın fizik ve zaman-mekândan aldığı bilgi girişinin miktarını nasıl ölçebilirsiniz? Ölçemezsiniz. DNA sadece fizik yasaları bağlamında, kurulu bir düzen ve çevreyle ilişki halinde bir anlam taşır. DNA bize bir hayvanın ya da proteinin alacağı son biçimi söylemez. Bağlam olmaksızın DNA anlamsızdır.

Genetiğin önemli bir ifadesi *en büyük dogmadır*: Bilgi sadece tek yönde, DNA'dan RNA'ya ve proteinlere akar, proteinlerden DNA'ya bilgi akışı olmaz. Bu en büyük dogma bir canlının gelişimi süresince eşlenme, kalıtyazım ve çeviride geçerli olurken, proteinler, gelişimin herhangi bir aşamasında DNA'nın hangi parçalarının okunacağını düzenlerler. Bunlar geri besleme döngüleridir. Bu yüzden bir insanı ortaya çıka-

racak olan bilgi, DNA'da bir plan şeklinde kodlanmamıştır. DNA için *plan* sözcüğü kullanılsa da bu yanıltıcı bir benzetmedir. Çok daha iyi bir benzetme, *yemek tarifidir*. Bir insan yapmak için DNA, gelişen organizmayı diğer proteinler, RNA ve DNA ile *fiziksel etkileşimlerinin* karmaşık geri besleme döngüleriyle şekillendiren proteinleri yapmak için gereken bilgiyi sağlar. Bu, yemek pişirmeye benzer. Bir yemek tarifi, yemek pişirmenin sonucunun karmaşık tanımını içermez; sadece malzemeler (proteinler) ve bu malzemelerin ne zaman ekleneceği (düzenleme) hakkında bilgi içerir. Daha sonra malzemeler arasındaki fiziksel etkileşimler, yemeği hazırlar.

Bunu anlatmanın başka bir yolu, canlıların zamanlaması özel olarak ayarlanmış bir yemek tarifine göre olan karmaşık etkileşimlerden doğan, belirmekte olan olgular olduklarıdır. Genetik dizgi içerisinde bir insanın her hücresini bütünüyle belirtmenin hiçbir yolu yoktur. Beynimizdeki trilyonlarca bağlantıyı nasıl tanımlarsınız? Birkaç yıl önce İnsan Genomu Projesi'nin, insan genomunda sadece yaklaşık otuz üç bin protein dizgileyen gen olduğunu açıklaması bir miktar şaşırtıcı olmuştu. Bu sayı, basit solucanlarda görünenden çok fazla değildir. DNA'daki bilginin, bir canlıyı tanımlamaktaki açık yetersizliğinin evrimi destekleyen en kuvvetli savlardan birisi olduğunu düşünüyorum. Daha önce ileri sürüldüğü gibi yaşam, fizik ve kimyadan oluşan bir satranç tahtasında oynanan karmaşık bir oyundur. Daha iyi bir benzetme düşünemiyorum. Bir canlının gelişimi proteinler hakkında bilgi içerdiği gibi mekân, zaman, fizik ve karmaşık geri besleme döngüleri hakkında da bilgi içerir. DNA'da bunların hiçbiri bulunmaz.

Evrim, tıpkı yaşam gibi zaman, mekân ve fizikten oluşan satranç tahtasında oynanan bir oyundur. Bu oyunun sonucu önceden belirlenemez. Oyun, olağanüstü sayıda olası sonuç yaratabilir ve evrimin görevi, bu sonuçlardan bazılarını

bulmaktır. Şurada bir proteini kurcalayarak veya burada bir DNA dizisini düzenleyerek bunun nasıl bir etkisi olduğunu görürüz; evrim kuramsal olarak var olabilecek tüm olası yaratıklardan sınırlı bir miktarın yaşadığı bir dünya yaratmıştır. Bunlardan biri de biziz.

Yaratılışçılar insanoğlunun, Dünya tarihinin amacı olduğunu iddia ederler. Eğer yola bu varsayımla çıkarsanız, bizimle sonlanmasını gerektiren bir süreç olan evrimin ne kadar oyuncu olduğunu görmek kesinlikle zor olacaktır. Ancak bu fikri bir defa terk edip evrimin, gezegenimizde karşılaştıklarımızla aynı olmasa da *birtakım* uygun canlılar üretmiş olacağını fark ettikten sonra her şey yerli yerine oturmaya başlar. Burada şansı mı savunuyorum? Şans önemlidir; ancak benim düşüncem yaşamın kaçınılmaz olduğu ve sayısız yaşam formunun her halükarda evrimleşecek olduğudur. Daha önce görmüş olduğumuz gibi saf şans karmaşa, saf gereklilik ise katılık yaratır. Şans ile gereklilik birlikte yaratılışı oluşturur. Neyin yaratılacağı tahmin edilemez ancak yaratılışın kendisi kaçınılmazdır.

Bu tartışma, D'Arcy Thompson ve Jacques Monod'un beslediği fikirler arasındaki farklılıkları hatırlatmaktadır (Bölüm 2). Monod, yaşamın varoluşunun inanılmaz bir kaza olduğuna, evrensel piyangoyu kazanmak anlamına geldiğine inanıyordu. Monod, DNA merkezli yaşam görüşüne fazla kapılmış gözükmektedir. Öte yandan Thompson, DNA'dan haberimiz olmadan çok önceleri yaşamıştır. Gerekliliğe vurgu yapmıştır; canlılardaki tüm yapıların matematik ve fizik yasalarının sonucu olduğuna inanmaktaydı. Bu da, açık bir şekilde yanlıştır. Fizik yasaları tek başlarına bir kaya oluşturabilir ancak evrimin sağladığı bilgi olmaksızın bir canlı oluşturamayız. Monod ve Thompson'un görüşleri, yaratılışçı-geçirmez bir yaşam görüşüne ulaşmak için birleştirilebilir: Bilgi önemlidir

ancak bilgi pek çok kaynaktan gelir: evrim, fizik, kimya ve canlı hücrelerdeki pek çok karmaşık varlığın etkileşimi.

Cırcırlar

Evrimdeki şans ile gerekliliğin etkileşimi, moleküler makinelerin işleyişindeki şans (moleküler fırtına olarak) ile gerekliliğin (yapı ve fizik kanunları) etkileşiminde yansımasını bulur. Termodinamiğin ikinci yasası, her şeyin basit tekdüzeliğe doğru hareket ettiğini öngörür. Ancak, serbest enerjinin bedelini ödediğimiz sürece, çevremizdeki hayret verici karmaşıklığın ortaya çıkması ikinci yasayı çiğnemez. Yine de bu karmaşıklığa ulaşmak için serbest enerjiden beslenen bir çeşit düzeneğe gerek vardır. Hücrelerimizde yönlü hareket, "bir amacı olan" etkinlik, moleküler cırcır düzeneklerinin (serbest enerjiyi azalttıklarından ve asimetrik yapılarından dolayı düzen yaratmak için moleküler fırtınanın rastgele hareketlerini ayarlayan moleküler makineler, enzimler ve motorların) etkinliğinden doğar. Evrim de bir cırcır düzeneğidir: Değişinimlerden gelen gelişigüzel girdiyi, gitgide artan sayıda olası canlı oluşturacak şekilde düzenler. Bu düzenleme doğal seçilimle sağlanır. Bu nedenle, evrim ile evrimin ürünleri olan moleküler makinelerimiz arasında hoş bir benzerlik oluşur.

Moleküler fırtına ile evrim arasında daha doğrudan bir bağlantı da vardır. Schrödinger'e *Yaşam Nedir?* adlı kitabını yazması için ilham veren Delbrück'ün yeşil kitapçığında görmüş olduğumuz gibi, değişinimlere en büyük katkı ısıl hareketten gelir. Daha da önemlisi eşlenme ve DNA onarımı, moleküler fırtınaya maruz kalan ve bu sebeple arada sırada, nadir de olsa hatalar yapan moleküler makineler tarafından yürütülür. Bu hatalar, gezegende sürmekte olan yaşamın evrimine hammadde sağlar. İlginç şekilde evrim değişinimleri

en aza indirmeye çalışır. Eşlenmelerin olağanüstü ölçüde aslına uygun olması (on milyar baz çiftinde bir baz çifti hatası), ne tuhaf çelişkidir ki, evrilmemenin evrimsel bir üstünlüğü olduğunu göstermektedir. Evrim, nadir olarak radikaldir. Düşük hata oranı, kademeli bir süreç olmasına olanak tanır. Tüm bunlara rağmen DNA bir plan değil de bir yemek tarifi içerdiğinden, küçük farklar son ürün üzerinde büyük etki sahibi olabilir. Aynı şey yemek yaparken de geçerlidir. Örneğin kek yaparken kabartma tozu koymadığınızı düşünün!

Evrimin bir cırcır düzeneği olarak iş gördüğü gözlemi, yaratılışçıların olasılık savlarını da geçersiz kılar. Evrim, olasılıksızlığı adım adım, değişinim değişinim, seçilim seçilim inşa eder. "Gelişigüzel bir araya gelen aminoasitlerin bir kinezin yaratma olasılığı nedir?" sorusu, evrimin işleyişiyle ilgisizdir. Kinezin birdenbire eksiksiz bir biçimde varlığa gelmemiştir; veya evrim kinezin oluşturmayı amaçlamamıştır. Kinezin evrimin bir cırcır düzeneği gibi her seferinde küçük bir değişiklikle git gide daha fazla karmaşıklaşırken rastladığı bir şeydir.

Başka Bir Yolu Yok...

Moleküler makinelere bakmak, bu makinelerin var olabilmeleri için tek yolun evrim olduğunu fark etmeme neden oldu. Görmüş olduğumuz gibi yaşam, fiziksel dünyanın tüm yönlerini sonuna kadar kullanır: zaman ve mekân, gelişigüzel ısıl hareket, karbon kimyası, kimyasal bağlar, suyun özellikleri. Tasarlanmış makineler farklıdır. Genellikle sınırlı bir fiziksel özellik kümesini temel alırlar ve tüm dış etkilere direnmek üzere tasarlanmışlardır. Moleküler makinelerin karmaşaya karşı direnmektense onu *kullanma* eğilimleri, evrime güçlü bir destektir. Neden mi? Eğer yaşam bir mucize olmadan kendi kendine başlamışsa, moleküler ölçekte başlamış olma-

lıdır. Moleküler ölçek her zaman moleküler fırtınanın hükmünde olmuştur. Yaşamın (karmaşaya teslim olmaktansa) bir yolunu bulup ısıl gelişigüzelliği çalışma biçiminin temel bir parçası haline getirmesi, onun aşağıdan yukarı bir süreç olduğunu göstermektedir. Yukarıdan aşağı tasarlanmamıştır. Yukarıdan aşağı bir tasarım, moleküler fırtınaya daha kolay direnebilmeleri için yaşamın temel varlıklarını daha büyük yaparak ısıl hareketin karmaşıklığından kaçınırdı. İnsanların tasarladığı makinelerin yaptıkları da budur; kısa süre önce nanoteknologlar, yaşamın nanobotlarından kendi küçük makinelerini yapmayı öğrenene kadar.

Moleküler makinelerin moleküler çevrelerine hassas biçimde uyumu da evrim için güçlü bir savdır. Evrim kurcalamaktır; biyolojik yapıların kademeli olarak geliştirilmesi ve daha iyi uyarlanmasıdır. Yaşam tarihi çok uzundur ve evrimin, bedenlerimizi çalıştıran fizikten yararlanan bu göz kamaştırıcı makineleri yaratmak için bolca zamanı olmuştur. Kusursuzluğa böylesine yakın bir mekanizmayı elde etmek için, değişken tasarım yapan bir sürece ihtiyaç vardır. Bir kereliğine yapılan tasarım yeterli değildir. Koşullar zamanla değişse de moleküler makinelerimiz uyarlanabilir kalmalıdır. Sürecin dışında bulunan bir tasarımcı, evrimin işleyişine izin verirse en iyisini yapmış olur. Uyarlanma, fizik yasalarının kayıp bileşeni sağladığı gerçeğince desteklenir. Örneğin hücrelerimizdeki pek çok yapı, fiziksel kuvvetlerin sonucu olan, kendi kendine kurulan süreçlerce üretilir (kesecikler, kolajen gibi). Evrim aşırı tasarım yapmaz: Ancak fizik yasalarından yararlanmaya yetecek kadar tasarım yapar. Eğer fizik sizin için çalışıyorsa, zaten tasarlanmış olan şeyi tasarlamak için niye uğraşasınız ki?

Ayrıca bütün canlıların hücrelerindeki moleküler düzeneğin benzerliğini de göz önünde bulundurmak zorundayız.

Bir *E. coli* bakterisinde, bir mantarda, bir mavi kuşta, bir begonyada veya bir insandaki moleküller ve hücredeki süreçlerin çoğu neredeyse özdeştir. Bu, ortak atayı kuvvetle destekler. Aynı zamanda, canlılar arasındaki farklara bakarak farklı moleküler makinelerin, her türün kendine has özel işlevlerini yerine getirmek için nasıl uyum sağlamış olduklarını görebiliriz.

Yine de evrimin lehine ve durağan bir tasarıma karşı en iyi sav, herhangi bir tasarımcının, canlıların evrimleşmesini engellemek için çok fazla çalışmak zorunda kalacağıdır. Bölümün başında ima ettiğim şey budur. Paley'in üreyen saati evrimleşecektir. Görmüş olduğumuz gibi, değişinimler olacaktır. Bunların bazıları, taşıyıcısına üstünlük sağlayacaktır. Böyle bir üstünlük, toplumda yayılma eğiliminde olacaktır. Bunu nasıl durdurursunuz? Ve bunu neden durdurmak isteyesiniz? Eğer ben dünyayı yöneten, her şeye gücü yeten bir varlık olsaydım, hiç zahmet etmezdim. Neden arkama yaslanıp, rahatlayarak evrimin benim için yaratacağı şeylerin tadını çıkarmayayım ki?

9

Ekmek Parası

Ne DNA, ne de başka herhangi bir molekül tek başına hayatı açıklayabilir.

—LYNN MARGULIS, *YAŞAM NEDİR?**

Harvardlı Ünlü Biyolog ve Yazar Ernst Mayr (1904-2005) *Biyoloji Budur* adlı kitabında, bilim insanları ve düşünürlerin yaşam hakkında konuşurken onu genellikle "hareketsiz bir nesnenin" cansızlığının zıddı olarak gördüklerini yazmıştır. Mayr'a göre bu tanımın sorunu, yaşamın bir "şeye" atıfta bulunuyor görünmesidir; bu, düşünürler ve biyologları yüzyıllarca yanlış yönlendiren bir fikirdir. Eğer yaşam bir şeyse, o halde başka şeylerden açık bir şekilde ayrılabiliyor olmalıdır ve bu sebeple bir "yaşam maddesi" veya "yaşam kuvvetinin" varlığı dikkate alınmalıdır. Ancak Mayr, yaşamın bir şey değil de bir süreç olduğunu fark ettikten sonra, yaşama sürecini bilimsel olarak araştırabileceğimizi açıklamıştır. Yaşayan ve yaşamayanlar arasında bir ayrım yapabiliriz. Yaşam süreçlerinin moleküllerin davranışlarının sonuçları olduğunu açıklamaya bile çalışabiliriz.

* Lynn Margulis ve Dorion Sagan, *What Is Life?*, California University Press (© 2000 California Üniversitesi Mütevelli Heyeti).

Yaşamın ne olduğunu kimse açıklayamaz. "Yaşam nedir?" sorusuyla ilgili problem her zaman bu olmuştur. Bu, düşünürleri ve bilim insanlarını yüzyıllar, hatta binyıllar boyunca bir yaşam kuvveti aramaya iten bir sorudur. Yaşamı tanımlayamasak da, yaşamın nasıl işlediğini açıklayabiliriz. Süreci açıklayabiliriz. Mayr'ın dediği gibi moleküler biyofizik ve nanobilim devrimi, "bir süreç olarak yaşamın, nasıl kendileri canlı olmayan moleküllerin ürünleri olabileceğini" açıklamakta başarılı olmuştur. Bu önemli bir adımdır. Yaşamı "hareketsiz bir nesnenin cansızlığından" uzaklaştırmak için, ilk önce moleküllerin yönlü hareketi ve eylemi nasıl yaratacağını, yani karmaşanın düzen haline nasıl geleceğini anlamamız gerekir. Yeni, moleküler makine bilimi bunu yapmakta başarılı olmuştur. Ancak bu yeterli midir? "Yaşamak", vücudumuzdaki moleküler makinelerin tamamının eylemlerinin toplamı mıdır?

Ne yazık ki, kinezini ya da ATP sentazı anlamak, insan hayatını hatta tek bir hücreyi bile açıklayamaz. Bir canlının hücresinin tüm moleküllerini bir test tüpüne atabilir ve bunları çalkalayabilirim (motor proteinlerin bazıları bir süreliğine kıpraşabilir) ancak kendilerini, canlı bir hücre oluşturacak şekilde düzenlemeyeceklerdir. Başladığımız yere mi döndük? Sonuçta, hücrelerimizdeki moleküler aktiviteyi düzenlemek için görünmez bir güce mi ihtiyaç duyuyoruz? Hayır, şu ana kadar bunun gerekli olmadığını görmeye yetecek kadar çok şey öğrenmiş olmalıyız. Canlıların ayırt edici özelliği, fiziğin dışında bulunmaları değil, canlının düzenlenmesini zamanda bir noktadan diğerine taşıyan ve kendini-düzenleyen, değişken bir yapıya dayanmış olmalarıdır. Yaşam kendini sürdürür. Yaşam, yaşamdan gelir.

Her insanın atomları, yedi yılda bir yenilenir ancak aynı kişi olarak kalırız. Biz, bizi meydana getiren atomlar değ-

liz; proteinlerimiz, DNA'mız veya moleküler makinelerimiz de değiliz. Bunun yerine karmaşık bir süreç, kemomekanik bir donanım üzerinde çalışan bir yazılımız. Bilgisayarların, bir zamanlar saatler ve buhar motorlarına ayrılmış simgesel mevkii aldığı çağımızda yaşamı bir bilgisayar yazılımına benzetmek uygundur. Ancak yaşamı bilgisayara benzetmeyi abartmamak için dikkatli olmalıyız. Yaşama sürecini oluşturan "program" çok senkronizedir, merkezsizdir, kendiliğinden uyum sağlayabilir, "süngerimsidir" ve neredeyse tamamen madde alışverişiyle denetlenir (sinir iletileri hariç, ancak orada bile bir miktar madde alışverişiyle gerçekleşmektedir). Ayrıca milyarlarca yıl boyunca evrimleşmiş bir programdır.

Yaşamak, moleküllerin belli bir programa uygun olarak dans etmesidir. Moleküler motorların gelişigüzel yükleri gelişigüzel yerlere taşımasına izin veremeyiz. Belli kargolar, belli yerlere, belli zamanlarda taşınmalıdır. Aynı şey hücrelerimizdeki her etkinlik için geçerlidir: Hangi proteinler ne zaman ne kadar üretilmelidir? Bir moleküler motor, bir yükü ne zaman alıp ne zaman bırakmalıdır? Bölüm 6'da, hücrelerin bu kararları nasıl düzenlediğine bir göz atmıştık. Pek çok karmaşık protein alosteri (protein bir kontrol molekülüne bağlandığında yapı ve etkinliğin değişmesi) ile denetlenebilir. Hücrelerimizde proteinler diğer proteinleri ve aynı zamanda DNA'nın kalıtyazımını düzenlerler. Bu yüzden proteinler, DNA'da saklanan bilgilere göre yapılırken şekerler, iyonlar ve lipitler gibi diğer moleküllerle yönetilirler. Karmaşık "yaşama" programı, tüm bu moleküller arasında onları karmaşık ağlar şeklinde bağlayan karmaşık geri besleme döngülerinden ortaya çıkar. Hareketli bir karmaşık geri besleme döngüsü fikrini kavramak zordur. Ancak bir hücrede olup biten budur. Hücrelerimizdeki karmaşık makineler, evrimsel mühendislik harikalarıdır. Fakat hücre, ancak bu moleküller, düzenlenmiş

etkileşimlerden oluşan zengin bir şebekenin içerisinde hücre olur. Bu yardımlaşmalı, kendini sürdüren, düzenlenmiş etkinliğe *yaşamak* diyoruz.

Düzenlenme

Düzenlenme nasıl çalışır? Moleküler makinelerin nasıl çalıştığından söz ederken işlerini ne zaman yapacaklarını nasıl bildiklerinden hiç bahsetmedik. Her zaman çalışarak yükü alır, taşır, iyonları hücre içine ve dışına iter ve gerekmese bile daha fazla ATP mi üretirler? Bu felakete davetiyedir. Moleküler makineler ilk olarak ve her şeyden önce enzimlerdir ve vücudumuzdaki enzimlerin çoğu, bir ketleyicinin bağlanması veya alosterik etkileşimle düzenlenir. Ketleyici bağlanması, bir enzimi veya motoru düzenlemek için uygulanan doğrudan bir yöntemdir. Eğer enzimin bağlanma cebine, enzimin hammaddesinden farklı bir molekül bağlanırsa ve bu molekül enzim tarafından dönüştürülemezse, o zaman bu molekül enzimin işlevlerini "tıkar". Bu, ketlemedir. Alosteri daha önce görmüş olduğumuz gibi, hammaddenin bağlanmasına yardımcı olarak veya engelleyerek yapısal bazı değişiklikler yapacak şekilde, enzimin ayrı bir bağlanma cebine denetleyici bir molekülün bağlanmasıyla enzimin etkinliğinin kontrol edilmesidir.

Pek çok ilaç (ve pek çok zehir) ketleyici bağlanmasıyla çalışır. Mide asidi giderici pantoprazol, bir proton tulumbası ketleyicisidir. Bu ilacın ketlediği özel proton tulumbası, midenin içini kaplayan hücrelerin zarlarında bulunan bir moleküler makinedir. Bu makinenin "işi" ATP'den aldığı enerjiyi mideye proton (hidrojen iyonları) basmak için kullanmaktır. Protonlar mideyi asidik yaparlar. Pantoprazol makineye bağlanarak çalışmasını geçici olarak durdurur ve midede asitliğin

artmasını engeller. Ketleyicinin bağlanma gücü ya da enzimi serbest bırakmadan önce ne kadar bağlı kalacağı, etkinleşme enerjisinin yüksekliğine bağlıdır. Bu, doğanın tepkimeleri farklı zaman ölçeklerinde kontrol edebilmek için ketleyicileri biçimlendirmesine olanak verir. Aynısı alosteri için de geçerlidir: Bir denetim molekülünün bağlanması; bağlanma gücü (*ilgi*), molekülün ayrışma katsayısı (etkinleşme enerjisine bağlıdır) ve denetim molekülünün hücredeki derişimine bağlıdır (düşük derişimlerde bir enzim ile bir denetim molekülünün karşılaşma olasılığı düşüktür).

Kinezinler, moleküler makinelerin bedende nasıl düzenlendiklerine iyi bir örnektir. Kinezinler, ATP'yi işleyen ve mikrotübüllere bağlanan bir veya iki benzer motor bölgeden oluşurlar. Motor bölgeye ek olarak kinezinler yükü bağlamak, belirli bölgelere bağlanmak veya düzenlenme için birtakım başka bölgelere de sahiptir. Yük taşıyan motor kinezin-1'de (kinezin-2, kinezin-3 ve kinezin-7'de de) yük olmadan motor proteinlerin ortalıkta dolaşması savurganlık olacağından, yük bağlanma bölgesi aynı zamanda düzenleme işi de görür. Sonuçta ATP kullanırlar. Kinezin nasıl düzenlenir? Ortada taşınacak yük yokken kinezin molekülü, yük bağlama bölgesinin motor bölgeye gevşekçe bağlanacağı şekilde katlanır. Uygulamada, molekülün el freni çekilmiştir. Hücre, motoru çalıştırmak istediğinde yük bölgesine bağlanıp onu motor bölgeden ayıracak iki denetim molekülü gönderir. Bu süreç, el frenini indirir. Kinezin-1'in düzenlenmesinin tek yolu bu değildir. Örneğin, hücre mikrotübüle bağlanan çeşitli proteinleri kullanarak kinezinin hangi mikrotübülde yürüyeceğine karar verebilir. Bazıları kinezini "çekecek", diğerleri ise yoluna gitmesini ketleyecektir. Başka bir denetleyici protein kümesi, yükün bağlanmasını ve ayrılmasını denetler. Enzimlerin ve moleküler makinelerin, doğru işi doğru zamanda

doğru yerde yaptıklarından emin olmak için çeşitli yollarla düzenlenmeleri oldukça yaygındır.

Moleküler motorların var oluşları da çeşitli moleküler geri besleme döngüleri ve denetim molekülleri ile düzenlenir. Örneğin, birtakım kinezinler hücre bölünmesinin sadece belirli bir aşamasında (mitoz) gereklidirler. Bu aşamada üç kinezinin üretim hızı artar. Sonraki aşamaya geçildikten sonra diğer moleküller bu kinezinlerin parçalanmasını sağlayarak onları geri dönüştürürler. Mitoz, karışık ve oldukça ahenkli bir süreçtir. Kinezinlerin (kromozomların ayrılmasına yardım ederler) sadece varlıkları değil, aynı zamanda yerleri de düzenlenmelidir. Denetleyici proteinler, çeşitli kinezinlerin doğru yerde işlerini yapmalarından emin olunmasını sağlar.

Moleküler makinelerin işlevleri ve düzenlenmelerini anlamak, ecza sanayisinin bir lütfu olagelmiştir. Tıbbi ilaçlar, birkaç istisna haricinde, enzimleri veya moleküler makineleri ketleyerek iş gören yapay denetim molekülleridirler. Büyük ilaç şirketlerinin AR-GE çalışanlarının görevi, hedef proteinlere bağlanıp etkinliklerini engelleyecek ve bir yan etkiye sebep olmamak için başka herhangi bir şeye bağlanmayacak kimyasallar bulmaktır.

Kinezinler kanser ilaçları için bir hedeftir. Kanser hücreleri fevkalade hızlı bölünerek urlar oluştururlar. Sonunda hücreler saçılarak kanserden kaynaklanan ölümlerin esas sebebi olan yayılmayı gerçekleştirirler. Monatrol adlı bir ilaç, mitoz esnasında önemli bir rol oynayan kinezin-5'i hedef alır. Bölüm 7'de bahsedilmiş olduğu gibi kinezin-5, aynı anda iki mikrotübüle bağlanabilen ikili bir motordur. Monastrol kinezin-5'e bağlanınca, ATP bağlanma bölgesinin yapısında bir değişikliğe neden olur. Kinezin yine ATP'ye bağlanabilir ancak yıkımın ardından ADP'yi serbest bırakamaz. ATPaz cebine ADP sıkışmış olan motor, enerji alamaz ve durur. İğ

iplikleri kendini salar ve hücre bölünemez. Bölünmenin ortasında sıkışan kanser hücresi intihar eder.

Yan Etkiler

Wayne Eyalet Üniversitesi'ndeki meslektaşım Rafi Fridman'ın laboratuvarı kolajen sindiren, zara-bağlı MMP-14 (metaloproteinaz 14) enzimi ve onun ketleyicisi olan TIMP-2'nin etkileşimini araştırmaktadır. Benim laboratuvarım, canlı hücrelerde TIMP-2'nin MMP-14'e olan ilgisini ölçmeye çalışarak Rafi ile işbirliği yapmaktadır. Bu, tek molekül seviyesinde ölçümler yapmayı gerektirir. Bunu yapmak için TIMP-2'yi bir AFM ucuna takıyor ve canlı bir hücrenin yüzeyinde MMP-14 ile etkileşime girmesine izin veriyoruz. Daha sonra MMP-14 ile TIMP-2 arasındaki bağı çekmek için kolu kaldırıyor ve bağı kırmak için gereken kuvveti kaydediyoruz. Sayısız ölçümden ve uygun istatistikleri uyguladıktan sonra, iki protein arasındaki bağın ortalama ömrünü belirleyebiliriz.

Bilim insanları TIMP-2'nin MMP-14'ü ketlemekle kalmayıp enzimi, serbest halde bulunan bir diğer MMP olan MMP-2'yi *etkinleştirmek* için hazırladığını keşfetmiş olduklarından, MMP-14 ile TIMP-2 arasındaki etkileşim özellikle ilgi çekicidir. Başka bir deyişle, MMP-14'ün ketleyicisi, MMP-14'ün kolajen parçalayan etkinliğini ketlerken aynı zamanda başka bir kolajen parçalayan makine olan MMP-2'yi *etkinleştirirler*. Ketleyici gerçekten de bir ketleyici değil, kolajeni parçalamanın yöntemini değiştiren bir anahtardır. Neden? Bu, halen yanıt aranan bir sorudur.

Bölüm 7'de bahsedildiği gibi MMP'ler hücrelerin hareketinde önemli bir rol oynarlar. Kanser hücrelerinde MMP'ler genellikle bol miktarda üretilir ve kanser hücrelerinin tüm vücuda yayılmasına izin verirler. Kanserle olan bu ilgileri sebebiyle MMP'ler ilaç geliştirilmesi için önemli bir hedef

olagelmişlerdir. MMP'yi hedef alan monastrol gibi ilaçlar, MMP'nin iş görmesini engelleyecek olan yapay ketleyicilerdir. İlk yapay ketleyiciler geliştirildiklerinde (bir test tüpünde) çok iyi çalışıyorlardı. Ne var ki, uzun onay süreçlerinin ardından bu ilaçlar ölümcül kanser hastalarında kullanıldığında iyi sonuç alınamadı. Daha da ötesi ciddi yan etkilere, özellikle de dayanılmaz eklem ağrılarına neden oldular. Ne olmuştu? MMP'ler sadece kanser hücreleri tarafından değil, eklemlerimizdeki kıkırdağı oluşturan sıradan hücreler tarafından da kullanılırlar. Önemli bir moleküler makinenin etkinliğini hedef gözetmeksizin kapatmak, kanserle savaşmanın en iyi yolu değildir.

Bu arada kinezin-5'i hedef alan monastrol ilacı da sorunla karşılaşmıştır. Birtakım yan etkilere neden olmasının yanı sıra (kanser olmayan hücreler de bölünürler), pek çok kanser türü karşısında etkisiz kalmıştır. Bazı ilaçların neden laboratuvar deneylerinde umulduğu kadar iyi sonuç vermediği her zaman iyi anlaşılamamaktadır. Tek bir enzim çeşidi ya da moleküler motoru kapatmak, kansere ya da diğer hastalıklara bir çare bulmak için her zaman anahtar olmayabilir. Hücrelerimizdeki moleküller daha yeni anlamaya başladığımız karmaşık yollardan birbirleriyle etkileşime girmektedirler. Hücrelerimiz, iyi düzenlenmiş makinelerdir. Karmaşıklıkları göz kamaştırıcı olduğundan düzenlemelerinin şifresini çözmenin zor olduğu ortadadır. Hücrelerimizin karmaşık işleyişinin tam olarak anlaşılamaması ilaçların istenen sonuçlara ulaşmada genellikle yetersiz kalmalarının esas nedenidir.

Sistem Biyolojisi ve Denetim Ağları

Biyolojik sistemlerde denetim pek çok seviyede gerçekleşir. DNA, proteinleri yapmak için gereken bilgiyi taşır. Proteinlerin türü ve üretimlerinin zamanlaması, DNA'ya bağlanan

özel proteinlerce denetlenir. Kalıtyazım ve çeviri, denetim molekülleriyle denetlenir. Bu süreçlerin hepsi, olumlu ve olumsuz geri besleme döngüleri içerir. Görmüş olduğumuz gibi enzimler ve moleküler makineler, kinezin-1'in "el freni" örneğindeki özdenetimden, çok sayıda etkileşimli denetim molekülü içeren moleküler mekanizmaların bazen birbirine zıt düzenlenmesine kadar çeşitli yollarla denetlenmektedir. Bunların üstüne hücre yüzeyi, dış kimyasallarca denetlenen çok sayıda özelleşmiş almaç içerir. Bir almaç bir defa kimyasal bir hedefe bağlandığında, yapısında bir denetim molekülüne bağlayan ya da serbest bırakan, hücre içinde bir geri besleme döngüsü zincirini tetikleyen, tüm hücrenin "büyük ölçekli" tepkisine yol açan bir değişiklik olur. Günümüzde bu iletim yolakları, biyokimyacıların ve hücre biyologlarının araştırmalarının büyük kısmını oluşturmaktadırlar.

Şifresi çözülen ilk denetim yolağı, Jacques Monod ve François Jacob'ın 1965'te Nobel Ödülü aldıkları, *E. coli* bakterisindeki "lac operonu"dur. *E. coli*, içlerinden biri laktoz (süt şekeri) olan pek çok değişik "besin"le hayatta kalabilir. Laktozu parçalamak için üç enzim gereklidir. Bu enzimlerden biri, laktozu hücrenin içine basan moleküler bir mekanizmadır. Bu enzimleri üretmek için kaynaklar gerektiğinden, eğer laktoz mevcut değilse onları üretmek pek mantıklı olmayacaktır. Ayrıca bu tulumba, kıymetli ATP'yi tüketir. Peki, DNA, ortamda laktoz bulunup bulunmadığını nasıl anlar? Eğer bakteriyi çevreleyen "çorbada" laktoz varsa, hücre yüzeyindeki bir laktoz almacı etkinleşir (laktoza bağlanır ve alosterik yolla hücre içine kimyasal bir ileti gönderir). Bu, hücre yüzeyindeki birkaç laktoz tulumbasını etkinleştirir ve bunlar laktozu hücre içine basmaya başlar. Ancak az sayıdaki bu pompalar, çevredeki laktozun tamamını hücreye almak için yeterli değildir. Ne yapmalı? Daha fazla tulumba bulmalı!

Laktoz sindirimi için gerekli olan enzimlerin bilgisini barındıran genin başında, operon adı verilen bir DNA dizisi yer alır. Operon, bir denetim proteininin (*bir baskılama proteini*) bağlanabileceği bir DNA parçasıdır. Baskılayıcı, operona bağlandığında DNA'dan RNA yazımını sağlayan RNA polimeraz engellenir ve kalıtyazım ilerleyemez. Laktoz sindirimiyle ilgili hiçbir enzim üretilmez.

Ancak laktoz, baskılayıcı proteine bağlanarak (alosterik etkileşimle) proteinin artık DNA operonuna bağlanamayacağı şekilde bir biçim değişikliğine yol açar. Artık RNA polimeraz, laktoz genlerini okumakta özgürdür ve çok miktarda laktoz sindirim enzimi ve laktoz tulumbası üretilebilir. Böylece laktoz, baskılayıcı ve DNA operonu arasındaki etkileşim laktoz-sindiren enzimlerin sadece laktozun varlığında üretilmesini sağlar. Hücremizin "bilgisayar mantığı" böyle çalışır. Aşağı yukarı her proteinin üretimi, buna benzer geri besleme döngüleriyle kontrol edilir.

Bu geri besleme döngülerinin nasıl çalıştıkları, *sistem biyolojisinin* alanına girer. Moleküler biyolojinin, kimyasal bağları cepte görmesi gibi sistem biyolojisi de moleküler biyolojiyi cepte görür ve protein ile DNA dizilerini etkileşim halindeki matematiksel varlıklar, hücrelerimizin bilgisayar yazılımındaki oyuncular olarak ele alır. Bu yolla bilim insanları atomlardan moleküllere, proteinlere, ağlara, sistemlere ve sonunda hücrenin tamamına ulaşır. Tüm dünyada, nasıl çalıştıklarının ayrıntılarını anlamak amacıyla *sanal hücreler* (basit hücrelerin düzenleme ağlarının eksiksiz modelleri) geliştirmeye çalışan birkaç ekip vardır.

Bu çalışmaların önemli bir bulgusu, temsil edilen ağların karmaşıklığı arttıkça yeni, şaşırtıcı özelliklerin ortaya çıkmasıdır. *Science* dergisinde 1999'da yayınlanan bir makalede New York'taki Mount Sinai School of Medicine'den iki araştırma-

cı olan Upinder S. Bhalla ve Ravi Iyengar, hücrelerde işleyen bu gibi çeşitli ağlar üzerinde yürüttükleri deneysel çalışmalarında etkileşim halindeki ileti ağlarını modellediler. Bhalla ve Iyengar farklı ağları birbirlerine bağlayarak (mesela bir ağ, bir diğer ağdaki bir enzimi denetleyen bir molekül üretiyor), bireysel ağlarda bulunmayan yeni özelliklerin ortaya çıktığını bulmuşlardır. Bu özelliklerden biri *kalıcı etkinleşme*dir. Bu özellik, üretime en başta neden olan ilk uyaran artık ortadan kalkmış olsa da bir protein veya denetim molekülünün üretiminin sürmesidir. Kalıcı etkinleşme neden kullanışlı olsun ki? Hücrelerimizdeki bazı süreçler uzun süre alır; ancak aynı zamanda kısa süreli bir uyaranla tetiklenebilirler. Kök hücrelerin kan, böbrek veya beyin hücrelerine dönüşmesindeki gelişim, bunun örnekleri arasındadır. Kalıcı etkinleşmenin önemli olduğu başka bir süreç, hafıza oluşumudur. Bir şeyi hatırlamak için beyinlerimiz, beyin hücrelerinin yapısı ve aralarındaki etkileşimde fiziksel değişiklikler yapmak zorundadır. Ne duyusal etkiler, ne de bunlardan kaynaklanan kimyasal iletiler sonsuza kadar sürer. Yine de hatırlamaya ihtiyaç duyarız. Kalıcı etkinleşme buna olanak tanır.

Kalıcı etkinleşme, bir defa açıldıktan sonra uzun süre açık kalacak bir anahtara ihtiyaç duyar. Aynı zamanda anahtar çok kolay tepki vermemelidir. Nihayetinde kalıcı bir anı yaratmanın ya da bir kök hücreyi beyin hücresine çevirmenin ciddi sonuçları vardır. Kesinlikle gerekli olmadıkça bunları yapmak istemezsiniz. Bu sebeple anahtar, yalnızca ileti yeterince güçlü ve kalıcı olduğu zaman açılmalıdır. Basit moleküler anahtarlar bu işi görebilirler mi? Moleküler anahtarlar genelde süreğen iletiler göndermezler. Bir defa açıldıklarında iletilerini gönderirler (mesela bir molekül salarlar) ve işleri biter.

Daha iyi bir taktik, kendini etkinleştiren bir geri besleme döngüsüne sahip olmaktır. Bhalla ve Iyengar bunu buldular.

İleti ağları belirli biçimlerde etkileşime girdiklerinde, kimyasal bir iletinin yüksek etkinliğe sahip bir konumda kilitlenip kalmasına (başka bir deyişle, bir iletim molekülünün uzun bir süre boyunca bol miktarda üretilmesine) neden olabilirler. Bu, sadece, yeterince güçlü kimyasal iletilere tepki olarak gerçekleşebilir. Ağ bir kere etkinleştirildiğinde bu kalıcı olur; yani başka bir ileti tarafından kapatılana kadar açık kalır. Bu *ikili denge* (ağın iki kararlı evresi olduğu durum: düşük ve yüksek), ağı etkinleştirmek için gereken evrenin süresi ve eşik derişim; etkileşim halindeki ağların belirmekte olan özellikleridir. Bir bilgisayarda elektronik transistörleri daha büyük bir ağa bağlamak gibi, moleküler anahtarları etkileşim halindeki bir ağ içerisinde birbirlerine bağlamak da daha karmaşık işlevlere kapı açabilir.

Fizikçi ve Biyolog

Yaşamı en küçük bileşenlerine ayırdık: DNA, proteinler, enzimler, moleküler makineler. Bir şeyi parçalarına ayırarak nasıl çalıştığını anlayabileceğimiz fikri, bir fizikçi için doğaldır. Bazıları fiziği, sonunda her şeyi açıklayacak bir bileşen ya da denklem bulana dek her şeyi giderek daha küçük parçalara ayırma işi olarak görür. Biyologlar, yaşam üzerinde çalışılırken bu yaklaşımın işe yaramayacağının farkındadırlar. Yaşamı açıklayacak bir "hayat atomu" ya da formül yoktur.

Görmüş olduğumuz üzere moleküler makinelerin yönlü hareketlerinin altta yatan atomik karmaşadan nasıl *ortaya çıktığının* sırrını istatistiki mekaniğin ve nanobilimin yardımıyla çözebiliriz. Ancak bu makineleri anlamak, canlı bir hücrenin nasıl çalıştığını tam olarak anlamaktan çok uzaktır. Sonraki adım, karmaşık ileti ve denetim ağlarında bu makinelerin nasıl etkileşime girdiklerini anlamaktır. Bu anlayış seviyesine

ulaşmak beraberinde kendi özelliklerini getirir ve bizi, yaşamın nasıl işlediğini anlamaya yaklaştırır.

Parçaları anlamak önemlidir ancak parçaların kendileri, bütünü açıklamada her zaman yeterli değillerdir. Parçalar arasındaki karmaşık ilişkiler, malzeme olarak temellerini parçalardan almalarına rağmen kavramsal olarak bağımsız yeni süreçler, yapılar ve ilkeler oluştururlar. Bu görüşe bütüncülük denir.

Benim bilemediğim nedenlerden ötürü, farklı dallardaki bilim insanları arasında bilime doğru yaklaşımın ne olması gerektiğine dair büyük bir tartışma vardır: bu yaklaşım indirgemecilik mi, yoksa bütüncülük mü olmalıdır? Bu kitabın da göstermiş olduğunu umuyorum ki, eğer yaşamı anlamak istiyorsak indirgemecilik son derece önemlidir. Bu olmaksızın bilim insanları uzun zaman önce giderek küçülen ölçeklere bakmayı bırakır ve bunun sonucunda da moleküler makinenin harikalarını kaçırırlardı. Fakat aynı zamanda, moleküler makineler her şeyi açıklamazlar. Bilim insanları, bu makinelerin nasıl etkileştikleri ve hücrenin karmaşıklığında hangi görevleri üstlendiklerini de açıklamak zorundadırlar. Nihai hedef her zaman, moleküllerden hücrelere ve organizmalara değin, yaşama dair süreçlerin tamamını açıklamaktır. Oyuncağı parçalarına ayırdık, şimdi tekrar birleştirmek istiyoruz. Bir şeylerin nasıl çalıştığını öğrenmenin yolu budur. Yani indirgemecilik ve bütüncülük, bir madalyonun iki yüzü gibidirler; ikisi de iyi bilim yapmak için gerekli olan parçalardır.

Bir açıdan indirgemecilik ve bütüncülük arasındaki savaş, atomcular ve canlıcılar arasındaki eski savaşın çağımızdaki uzantısıdır. Sürekli olarak hareket eden atomların varlığını iddia eden eski atomcular, dünyada gördükleri hareketlilik ve değişimi, nihai olarak atomlar arasındaki akıl ermez etkileşim olarak açıkladılar. Canlıcılar daha tepeden bir bakış

açısını benimsediler ve dışardan bakıldığında yaşam, cansız dünyayla karşılaştırıldığında çok farklı ve gizemli göründüğünden dolayı yaşamı fiziksel güçlere indirgemenin imkansız olduğunu iddia ettiler. İndirgemecilik ve bütüncülüğün fay hatları tüm bilimlerde vardır, özellikle de biyolojide. Örneğin çevrebilimciler, karmaşık bir çevrede pek çok canlının etkileşimi hakkında bütünlemeci düşünmek zorundayken yelpazenin diğer ucundaki moleküler biyologlar ve biyofizikçiler, yaşamın mümkün olan en küçük birimlerine bakarlar.

Ernst Mayr biyolojik bütüncülüğün sıkı bir savunucusu ve yirminci yüzyılın büyük evrim biyologlarından birisiydi. Pek çok başarısının arasında en iyi çağdaş tür tanımı olan, türlerin birbirleri aralarında üreme becerilerinden yoksun olmalarıyla ayrılmaları düşüncesi vardır. Mayr biyoloji ve evrim tarihi hakkında pek çok harika kitap yazmıştı ve Darwin'in kuramının en ateşli savunucularından birisiydi. Ancak (bana göre) tuhaf bir kusuru vardı: Fizikçilerden nefret ediyordu.

Mayr daha genel olarak biyolojiye karşı indirgemeci yaklaşımların hepsine derin bir hoşnutsuzluk besliyordu. 2004 yılında yayınlanan bir makalede şunları iddia edecek kadar ileri gitmişti: "Bildiğim kadarıyla yirminci yüzyılda fizik tarafından yapılan büyük keşiflerin hiçbiri, yaşayan dünyanın anlaşılabilmesine hiçbir katkıda bulunmamıştır." Bu kitapta ele almış olduğumuz, floresan spektroskopi, nanoteknoloji ve X-ışını kırınımı gibi yirminci yüzyıl fiziği içeren gelişmeler göz önüne alındığında bu, büyük bir bilim insanının ağzından çıkan şaşırtıcı ölçüde cahilce bir ifadedir. Öyle görülüyor ki sevgilisi biyolojinin fizikçiler tarafından kaçırılabileceğinden endişe ediyordu. Bu korkusu yersizdi ve hâlâ da öyledir.

Adil olmak gerekirse Mayr, biyoloji ile fizik arasındaki farklılıkların nedenlerini, başka herkesten daha anlaşılır bir

şekilde açıklayabilmiştir. Ona göre bu farklılıklar karmaşıklık derecesinde, şansın etkililiğinde, evrimsel tarihin öneminde ve türlere toplum muamelesi yapılmasındaydı. Daha önce değindiğimiz üzere, şans ve karmaşıklık yaşamın temel özellikleridir. Biyolojinin büyük kısmının beklenmedik olaylar, donmuş kazalar olduğu savında oldukça haklıdır. Örneğin biyofizikçiler bir ribozomun genetik bilgiyi bir protein ürününe nasıl çevirdiğini açıklayabilirler ancak genetik kodun kendisi, tamamen şansın bir eseri gibi görünmektedir. UUG (RNA moleküler bazları urasil-urasil-guanin) genetik harfleri bir lösine denk gelirken UGU'nun sistein olarak okunmasının, indirgenebilir bir fiziksel sebebi yoktur. Fiziğin büyük kısmında, buna benzer donmuş kazalarımız yoktur. Bakırın bir eriyikten kristalleşmesine izin verirseniz, her zaman yüzey merkezli kübik bir kristal yapı alacaktır. Her hidrojen atomundaki enerji seviyesi aynıdır. Cıvanın süperiletken geçiş sıcaklığı her zaman aynıdır. Bunlar kuantum mekaniği kullanılarak tahmin edilebilirler. Sabit yasalara göre gerçekleşirler.

Ancak yine de, evrenimizde biyolojik olmayan pek çok donmuş kaza vardır. Güneşimiz, Dünya, Ay ve gezegenimizdeki her dağ, tarihteki garipliklerin sonucudur. Ancak hepsi fizik tarafından açıklanabilir. Yıldızları, gezegenleri ve dağları oluşturan mekanizmaları biliyoruz. Sadece bir dağın bir milyar yıl sonra belirli bir yerde olup olmayacağını tahmin edemiyoruz.

Pek çok bilim insanı için bütüncülük ile indirgemecilik arasındaki düşünsel tartışmalar, üzerinde durulmaya değmeyecek konulardır. Fizikçilerin çoğu dahi, parçaları geri birleştirmemiz gerektiğinin farkındadır. Esneklik, iletkenlik veya saydamlık gibi pek çok fiziksel özellik, çok sayıdaki atomun kendi aralarındaki "bütüncül" etkileşimlerinden kaynaklanır. Bölüm 3'te görmüş olduğumuz gibi, istatistiki mekanik,

gezinen atomların indirgemeci manzarasından bütüncü yasaların nasıl ortaya çıktığını açıklamak için doğmuştur.

Bilim pek çok seviyede iş görür. Bir canlı için kuarklar ve elektronlarla başlayabiliriz. Bunları kullanarak, ilkesel olarak, çekirdeklerin ve atomların özelliklerini tahmin edebiliriz. Atomlara bir defa ulaştıktan sonra, yine ilkesel olarak, zor da olsa moleküllerin özelliklerini açıklayabiliriz. Ancak bu noktada dahi kuarklar seviyesi ile moleküller seviyesi arasındaki ilişki en iyi ihtimalle zayıftır. Atomik yapılarını belirleyerek moleküller hakkında pek çok şey öğrenmek mümkündür ancak bir molekülün özellikleri hakkında bir öngörüye ulaşmak, hatta işe yarar bir açıklama getirmek çok güçtür. İlerlemeye devam ettiğimizde bu bağlar, oldukça karmaşık bir varlık ile en temel madde ve enerji seviyeleri arasında anlamlı kavramsal hiçbir ilişki kalmayana kadar giderek daha belirsiz bir hal alır.

Biyolojiyi anlamanın zorluğu, bu seviyelerin pek çoğunda birden işliyor olmasıdır: moleküllerden ekosistemlere kadar. Bu seviyelerin her biri yaşamın (veya canlılığın) ne olduğunu anlamaya katkıda bulunurlar ve hepsi önemlidir. Bir fizikçi olarak yaşamı fiziğe bağlayan seviyelerden heyecan duyuyorum, ancak bunun yaşamın karmaşıklığının sadece küçük bir kısmı olduğunun farkındayım.

İnekler ve Kuarklar

Bu noktada, karmaşık bir varlıkla madde ve enerjinin en temel seviyeleri arasında anlamlı kavramsal hiçbir ilişki olmadığı yönündeki önermeme itiraz edebilirsiniz. Bu sonuca nasıl ulaştım?

Kısa süre önce Wayne State Üniversitesi'nde kuramsal nükleer fizikçi olan meslektaşım ve arkadaşım Sean Gavin

ile indirgemecilik ve bütüncülük üzerine bir tartışmaya girdim. Sean bana, parçacık fiziği araştırmalarının güçlü bir destekçisi olan Steven Weinberg'ın bir konuşmasını dinlediğini söyledi. Weinberg her zamanki gibi, parçacık fiziğinin kimya ve biyoloji de dahil tüm diğer bilimlerin temelinde olduğu iddiasında bulunmuştu. Bir fizikçi olarak, maddenin neden yapılmış olduğunu ve evrenimizin biçimini hangi kuvvetlerin belirlediğini bulmaktan daha temel bir şey olmadığını anlıyorum. Bu önemli bir çalışmadır. Eğer evrenin ne olduğunu öğrenmek istiyorsak (eğer bilimin uzun vadede ilerlemesini istiyorsak) Weinberg'e katılmalı ve parçacık fiziğindeki çalışmalarını desteklemeliyiz. Mevcut en büyük parçacık hızlandırıcı olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın İsviçre'nin Cenevre kentinde çalıştırılmasıyla, evrenimizin derin, temel yapısı hakkında pek çok yeni ve şaşırtıcı bulgu elde etmeyi bekleyebiliriz. Sean, ben ve neredeyse tanıdığım bütün fizikçiler, bu konuda uzlaşabiliriz. Ancak Sean burada çok komik ve doğrudan bir soru sordu: "Peki parçacık fiziğinden bir ineğe nasıl ulaşırsın?" Müthiş bir soru!

İneklerin varlığına parçacık fiziğinden yola çıkarak ulaşmak çok karmaşık bir iş mi olur? Yoksa bir ineğe kuarklar ve elektronların özelliklerinden yola çıkarak ulaşmak imkânsız mıdır? Bir inek (çoğundan bu kitapta bahsetmiş olduğumuz) moleküllerden meydana gelir. Bu moleküller atomlardan oluşur. Bu moleküllerin özellikleri, biraz zorlarsak onları oluşturan atomların özelliklerine indirgenebilir. Atomlar gluonlar tarafından bir arada tutulan kuarklar (kuarklar artı gluonlar, atomun çekirdeğinde proton ve nötronları oluştururlar) ve elektronlardan oluşurlar. Farklı atomların kimyasal özellikleri, çekirdek etrafındaki elektronların düzenlenmelerine bağlıdır. Bu yüzden, kuarklar ve elektronlar (ve aralarındaki kuvvetler) farklı özelliklere sahip atomları, onlar da molekülleri,

hücreleri ve inekleri oluşturduğundan bir ineğin parçacık fiziğiyle açıklanabileceğini söyleyebiliriz.

Ancak yolda bir yerlerde, inek diye bir şeyin var olma nedenini gözden kaybettik. İneği nelerden oluştuğuyla açıklamak, bir evin tuğlalarla açıklanmasına benzer. Daha iyi bir açıklama, ineğin evrimin (altında yatan parçacıkların maddesel gerçeklikleriyle açıklanabilen bir sürecin) bir sonucu olduğunu belirtir; ancak bu sonucu tahmin etmek mümkün değildir. Eğer yaşam filmini baştan oynatırsak bir inek tekrar oluşur mu? Bunu, kimse bilmiyor; ineğe benzer bir şeyin oluşması olasıdır ancak yeni varlık altı bacaklı ve sadece iki mideli olabilir. Bu sebeple "inek" için, parçacık fiziği yasalarını temel alan bir formül yoktur. Bir inek yapmak için (atomlara ve moleküllere gerek olduğundan) parçacık fiziği gerekli olabilir, ancak açıkçası yeterli değildir.

Ne var ki, bu evrendeki tüm maddesel nesneler bildiğimiz parçacık fiziğine dayanır. Ancak eğer farklı bir evren var olmuş olsaydı, parçacık yasaları bizim yasalarımızdan oldukça farklı olmuş olabilirdi. Bu yasalar karmaşık yapıların yaratılmasına izin verdiği sürece, inek diyebileceğimiz bir şeyin ortaya çıkmasına yol açabilirlerdi. "İnek" kavramı, kuarkların ve elektronların parçacık özelliklerinden tamamıyla bağımsızdır. Bir düşünür, bir ineğin parçacıklarla açıklanamayacağını, çünkü parçacıkların ineğin "inekliği" için bir neden oluşturamayacağını söyleyecektir.

Moleküler makinelerin gerçekliği ne olacak? Bu gezegendeki yaşamı anlamak için, kuarklar ve elektronlarda olduğu gibi, moleküler makineleri anlamamız gerekir. Ancak çoğu canlıdaki moleküler makinelerin belirli bir hayvana veya bitkiye özgü olmadığını görmüştük. Yani moleküler makinelerden bir ineği veya herhangi başka bir hayvanı da türetemeyiz. Bu, moleküler makinelere ilişkin içgörülerimizi işe yaramaz

hale mi getirir? Moleküler makineler, canlının tamamı hakkında bize hiçbir şey söylemez mi? Hayır, moleküler makineler bize hücrelerin nasıl çalıştığından daha fazlasını anlatır. Dünyadaki yaşamın tamamındaki benzerlikleriyle bize evrim ve yaşamın birliğini anlatırlar; karmaşayı evc leştirme becerileriyle yaratıcı bir evrenin sadece şans ve gereklilikle mümkün olacağını anlatırlar; düzenlenebilir olma ve düzenleme becerileriyle bize yaşamın madde ve programdan ibaret olduğunu anlatırlar ve moleküler fırtınanın canlandırdığı ardı arkası kesilmez hareketleriyle, yaşamın bir nesne değil, bir süreç olduğunu anlatırlar.

Bahse girerim, farklı bir evrende bu şeyler çok da farklı olmazdı. Ama yanıldığımı kim kanıtlayabilir ki?

Sonsöz

Yaşam, Evren ve Her Şey

Uzun bir yol kat ettik; eski zamanların hayati kuvvetlerinden, moleküler biyologlar ve biyofizikçilerin moleküllerine ulaştık. Eğer yaşama can veren "yaşam kuvvetini" arıyorsak, o zaman arayışımız başarılı olmuştur. Bu can veren kuvvet, evrenin yaratılışının son kızıllığında art arda hızla tekrarlanan atomların gelişigüzel kuvvetidir. Bu yönsüz kuvveti alıp ona bir yön veren moleküler makineler, şans ve gerekliliğe sıkı sıkıya sarılırlar ve kendileri de bu kucaklaşmanın sonucudurlar. Evrim tarafından biçimlendirilmiş moleküler makineler, vücudumuzda moleküler fırtınayı evcilleştirir ve onu yaşamın dansına çevirir.

Evren şans ile gerekliliğin çocuğudur. Her yıldız ve galaksi, gezegen ve dağ, mikrop ve fil, doğanın bu iki temel eğilimi arasındaki etkileşimin bir göstergesidir. Çağdaş bilim tarafından şekillendirilen bu evren görüşü, kendimiz hakkında nasıl düşüneceğimizi etkilemeli midir? Bir yandan belki etkilememelidir. Çarpışan atomlardan bir dâhinin zihnine kadar, yaşam pek çok seviyede gerçekleşir. Moleküler makineler bizim parçalarımızdır ancak bizi belirlemezler. Evrenin yaratıcılığının doğal bir uzantısı olan zeki, yaratıcı varlıklarız ancak doğa tarafından belirlenmiş değiliz. Makinelere dayalı olsak da biz makine değiliz.

Öte yandan bilim, kendimiz hakkında oldukça derin bir şeyi öğrenmemize olanak vermiştir. Yaşam, harika bir moleküler düzenektir. Bu, yaşamı en "ilkel" halinde bile takdir etmemize neden olmalıdır. Bir virüs bile doğanın bir mucizesidir. İnsanlar da aynı doğanın parçasıdır. Onun en mucizevi parçasıyız. Hepimiz hem aynıyız hem çok farklıyız. *Gereklilikle* hepimiz yaşamın birliğine bağlıyız, ancak şans eseri hepimiz eşsiziz. Şu ya da bu biçimde, öyle olmamız gerekiyordu.

Eğer evrende başka bir yerde yaşam varsa moleküler makinelere dayalı olacaktır. Belirleyebildiğimiz kadarıyla fizik yasaları her yerde aynıdır. Nanoölçek, her yerde kendini yöneten nanoölçekli makineler için fırsat sağlayarak enerjinin kolayca dönüştürülebileceği özel bir ölçektir. En mütevazı canlı bile inanılmaz derecede karmaşıktır. Canlı bu karmaşıklığa ulaşabilmek için, çok sayıda etkileşen parçadan oluşmalıdır. Bu parçaların küçük, etkin, çeşitli ve karmaşık olmaları gerekir; yalnızca moleküller bu işin hakkından gelebilirler.

Dünyayı bir bütün olarak anlayabilmek için doğrusal, nedenselci düşüncemizi terk etmeliyiz. Zihinlerimizin, insan toplumunun ve yaşamın karmaşıklığı, oyunun kurallarına bir tutam gelişigüzellik eklenmesinin sonucudur; bu, karmaşık ilişkiler ağında oynanan, yeni ortaya çıkan özelliklerle dolu bir oyundur. Büyük ve çok eski evrenimizde yaşamın kaçınılmaz olduğuna inanıyorum (ancak bunu kanıtlayamam). Dünya'daki yaşamın, evrendeki tüm maddenin sadece küçük bir kısmı olduğunu göz önünde bulundurun. Eğer evrendeki her gökadada yaşam dolu milyonlarca dünya olsaydı, tüm canlı varlıkları oluşturan toplam madde hâlâ evrendeki maddenin toplamının küçük bir kısmı olurdu.

Evren, termodinamiğin ikinci yasasının bir kurbanı değildir. Eğer öyle olsaydı sadece hidrojen ve helyumdan oluşan

bir buluttan ibaret olurdu. Ancak durum böyle değildir. Yaşam ortaya çıkmadan önce yerçekimi, atomları oluşturmak için çalışmıştır. Yıldızlar daha ağır elementleri üretmiştir. Gezegenler, atomların karmaşık moleküller yaratılmasını olası kılacak şekilde daha da yoğunlaşacakları bir yüzey sağlamıştır. Evren 13,75 milyar yaşındadır. Yaşamın bir yerlerde ortaya çıkmak için bol bol zamanı ve malzemesi vardı. Maddenin özünde olan, giderek daha karmaşık yapılar oluşturma dürtüsü göz önüne alındığında yaşam kaçınılmaz gözüküyor.

Elbette çağdaş bilimin bu bulgularını reddedenler olacaktır. Kendilerini doğadan ve evrenden ayıran bir görüşü korumayı seçeceklerdir. 1925'te yayımlanan *Neye İnanıyorum* adlı kısa kitabının hatırlanmaya değer bir bölümünde düşünür Bertrand Russell, bilimin sağlamış olduğu bakış açısıyla bu gibi görüşlere karşı çıkmıştır: "Bilimin açık penceresinden bakmak, geleneksel insancıl mitlerin yarattığı rahat sıcak ortama alışkın olan bizleri başta ürpertse de, temiz hava nihayetinde zindelik verir ve geniş alanların kendilerine has bir görkemi vardır." Buna, bu ürpertinin bilim hakkında daha çok şey öğrendikçe heyecandan kaynaklanan bir ürperme olduğunu gördüğümüzü eklemek isterim; evrenimizin inanılmaz büyüklüğü ve onun şimdilik küçük, ancak giderek büyüyen bir köşesini anlayabilmekte sergilediğimiz hüner bizi heyecanlandırıyor.

Pek çok kişi, insan gibi bir şeyin şans ve gereklilik gibi "kör kuvvetlerin" sonucu olabileceğinden kuşku duyar. Karmaşık yapıların yaratılmasının, bir tasarımcının tasarı yapan zihnine ihtiyaç duyduğuna inanmak isterler. Ancak bir zihin nasıl icat eder? Yeni fikirler nasıl oluşur? Yeni fikirler, davetsiz misafirler gibi zihnimizde beliriveren rastlantısal şeyler değil midir? Hücrelerimizi canlandıran moleküler fırtınanın kendisi bazen fikirlerimizi sarsarak ani kavrayışlar sağlaya-

maz mı? Bu gelişigüzel düşünceler, görünüşte bağlantısız olan tecrübeler arasında yeni bağlantılar kurarak alışılmışın dışına çıkmamızı sağlayabilir. Böyle bir insan düşüncesi modeli bana mantıklı geliyor. Yeni fikirler başka nasıl oluşabilir ki? Nereden gelirler? Dışarıdan mı? Hayır, fikirlerin kimyasal ve elektriksel iletiler aracılığıyla iletişim kuran karmaşık biyolojik hücreler ağı olan beyinler tarafından yaratıldığını biliyoruz. Yeni fikirler oluşturmanın tek yolu, işin içine bir dereceye kadar gelişigüzellik katmaktır. Evrenin veya yaşamın kökenini açıklamak için her şeye kadir bir bilince başvursak da, şans ve gerekliliğin aynı temel kuvvetleriyle baş başa kalırız. Her şeye kadir bu bilincin bile bunlara ihtiyacı vardır.

Anlaşılacak her şeyi anlamaya yaklaşıyor muyuz? Yüz elli yıl önce Charles Darwin ellerini kaldırarak şöyle haykırmıştı: "Tüm bu Yaratılış sorununun insan zihnine çok zor geldiği konusunda çok derin hisler taşıyorum. Oldu olacak bir köpek, Newton'un zihni hakkında fikir yürütsün! Bırakın da herkes dilediği gibi umut etsin ve inanacağına inansın." Bu duyguyu anlıyorum. Gizemlerin gizemine nüfuz etmekten *hâlâ* çok uzağız. Ancak çözüme çok daha yaklaştık.

Eğer yaşamı henüz tam olarak anlayamıyorsak bu, yaşamın inanılmaz karmaşık olmasındandır. Yaşamın temel parçalarını (DNA, enzimler, moleküler makineler) bir araya getirerek bir Shakespeare ya da bir Einstein'ı nasıl yaratırız? Bu gibi gizemlerle karşılaşan pek çok insan Darwin gibi ellerini kaldırarak yaşamı açıklamanın mümkün olmadığını ilan eder. Ancak bu kitapta görmüş olduğumuz üzere, bilim karanlığı ışığa çevirebilir ve yaşamın derin sırlarını ortaya çıkarabilir. Yaşamın şans ve gereklilikle yönetildiğini gördük.

Sözlük

açık düzenek Yalıtılmış düzeneklerin aksine çevre ile enerji ya da madde veya her ikisini değiştokuş edebilen düzenek.

ADP (adenozin difosfat) ATP'den bir fosfat kökünün uzaklaştırılmasından doğan ürün. ADP, iki fosfat grubu takılı bir nükleotitten (adenin) ibarettir.

aktin Hücrenin "iskeleti"nde yer alan uzun, ipliksi bir protein. Aynı zamanda miyozine yolluk eder ve kaslarda miyozin II'nin çektiği iplikleri oluşturur.

alosteri Bazı enzimlerde bulunan, bir denetim molekülüne bağlandıklarında biçim ve işlev bakımından değişebilme özelliği. Alosteri, hücrelerdeki düzenlemenin temelini oluşturur.

amino asit Proteinin en küçük yapıtaşı. Proteinler, doğada bulunan yirmi farklı amino asidin çeşitli birleşimlerinden oluşur.

atomculuk Her şeyin küçük, bölünemez ve sürekli hareket eden parçacıklardan oluştuğu inancı.

atomik kuvvet mikroskobu (AKM) Sivri bir uç ile bir yüzey arasındaki küçük kuvvetleri ölçen bir tür tarama sonda mikroskobu. AKM yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturmakta ya da moleküller arasındaki kuvvetleri ölçmekte kullanılabilir.

atomlar Bir çekirdek (proton ve nötronlardan oluşan) ve bir elektron bulutundan oluşan, en küçük kimya birimleri. Kimyasal bağlardan elektronlar sorumludur.

ATP (adenozin trifosfat) Hücrelerde kimyasal enerjiyi gezdirmekte kullanılan enerji taşıyıcı molekül. Üç fosfat grubu takılı bir nükleotitten (adenin) ibarettir.

ATP yıkımı (su yardımıyla) ATP'nin suyla, fosfat gruplarından birini koparıp büyük miktarda enerjiyi serbest bırakan tepkimesidir. Son ürün: ADP (adenozin difosfat).

ATP sentaz Mitokondrilerde bulunan karmaşık devinimli düzenek. ATP'yi yeniden doldurmak için proton farkını kullanır.

ATPaz ATP'yi yıkan enzim. Hemen hemen her moleküler makinenin bir parçası.

basınç Birim alana düşen kuvvet. Bir gazda basınç, atomların bir duvar ile gerçekleştirdiği çok sayıda çarpışmanın sonucudur.

baş Bir motor proteinin motor bölgesine, özellikle üzerinde yürüdüğü bölgeye, verilen ad.

belirme Çok sayıda parçanın etkileşiminden özelliklerin ortaya çıkması; belirmiş özellikler, yalnızca parçaların kendilerinin özellikleri değildir.

besin kalorisi Enerji birimi, 4,184 Joule'a eşittir.

bit Asgari bilgi miktarı; "evet" veya "hayır" (ya da "1" veya "0") yanıtının barındırdığı bilgi.

bölge Büyük bir molekülün bir parçası.

Brown hareketi Havadaki ya da sıvıdaki moleküllerle gerçekleşen çok sayıda çarpışmanın sonucunda oluşan küçük parçacıkların gelişigüzel hareketi.

Brown cırcırı Yönlendirilmiş yayınım süreci sayesinde belirli bir yönde hareket eden bir moleküler makine. Termodinamiğin (ısıldevinimin) ikinci yasasını çiğnemez, çünkü çalışması için makineyi üzerinde ilerlediği yoldan ayırmak için düzenli aralıklarla cırcıra enerji sağlanır.

bütüncülük Düzeneklerin, parçalarına ayrılmaksızın, bir bütün olarak incelenmesi gerektiği görüşü.

büyük ölçekli durum Bir düzeneğin, dışarıdan ölçülebilen durumu; çok sayıda atom ve molekülün ortalaması olmak durumundadır. *Çoğunlukla, sıcaklık ve basınç gibi büyük ölçekli nicelikler çerçevesinde tanımlanır.*

cancılık Her şeyin bir ruhu olduğu ve yaşadığı inancı.

çaperonin Diğer proteinlerin doğru biçimlerine katlanmalarına yardım eden peroteinler.

çeviri Kalıtsal bilgiyi bir proteine çevirmek. Taşıyıcı RNA (tRNA) yardımıyla ribozomda gerçekleşir.

çiftsever Hem suseven hem de susevmeyen özellikleri olan moleküller.

değişinim Bir gendeki geri dönüşsüz değişim; DNA'nın bir iyon ya da kökle (eşlenmemiş elektronları bulunan atomlar, moleküller ya da iyonlar) olan kimyasal tepkimesinin sonucu.

denge Termodinamikte entropinin en yüksek, serbest enerjinin en düşük olduğu ve artık düzenekten yararlı iş çıkarılamadığı durum. Tekdüze sıcaklık ve basınçla nitelenir.

devridaim Termodinamiğin ilk ya da en azından ikinci yasasını çiğneyebilecek makine. İmkânsız olduğu bulunmuştur.

dinein Mikrotübüller üzerinde hareket eden bir moleküler motor ailesi.

dirimselcilik Yaşamın, özel kuvvetlerle ilişkili olduğu inancı.

DNA (deoksiribonükleik asit) Hücre çekirdeğinde bulunan uzun, ikili-sarmal yapıda bir molekül; proteinleri yapmak için gereken dizileri saklar ve hücrenin gelişimine yön verir.

Düşünce deneyi Fiziksel bir kuramın mantıklı olup olmadığını görmek için varsayımsal bir durum ortaya atmak.

enerji İş yapabilme erki. Enerjinin birimi Joule'dür (J).

enerji dönüşümü Enerjinin bir çeşitten diğerine değişimi, örneğin, kimyasal enerjiden hareket enerjisine, bir arabada olduğu gibi.

enerji yitimi Kullanılabilir (serbest) enerjinin kullanılamaz enerjiye (ısı) bozulması.

enerji yüzeyi Bir protein biçim değiştirirken enerjisinin nasıl değiştiğini temsil eden çok-boyutlu bir yüzeye dair kavramsal bir fikir. Yüzeydeki her konum, belirli bir protein biçimine karşılık gelirken yüzeyin yüksekliği, o biçimle ilişkili enerjiyi temsil eder.

entropik kuvvetler Enerjideki azalmaya değil de entropideki artışa bağlı olan kuvvetler. Tükenim kuvvetleri ve susevmez kuvvetler buna örnektir.

entropi Enerjinin saçılmışlık derecesi. Sıklıkla "düzensizlik" ile bir tutulur.

enzim Protein temelli tezgen; tepkimenin etkinleşme çıtasını alçaltarak tepkimeyi kolaylaştırabilen bir protein.

eşlenme Hücre bölünmesi sırasında DNA'nın ikilenmesi.

etkinleşme enerjisi Biçim değiştirirken ya da birbirleriyle tepkimeye girerken moleküllerin aşması gereken enerji çıtası.

evrim Yeni proteinler, moleküler makineler ya da canlılar ortaya çıkaran süreç. Yenilik, değişinimler tarafından üretilir; ardından bunlara seçilim etki eder. Karmaşıklığı artıran bir "cırcır" gibi iş görür.

Feynman'ın cırcırı Maxwell'in iblisinin, dengedeki bir düzenekten enerji çıkarabilecek ve böylece termodinamiğin ikinci yasasını çiğneyebilcek, kendiliğinden işleyen bir çeşidi. Mümkün olmadığı gösterilmiştir.

floresanlık Bir molekülün kısa dalga boylu ışıkla uyarılması sonucunda, uzun dalga boylu ışık salınması.

florofor Kısa dalga boylu (floresan) ışık tarafından uyarıldığında görünür ışık salan molekül. Davranışlarının ışık mikroskobunda gözlenebilmesi için molekülleri işaretlemekte kullanılır.

geçiş durumu Bir kararlı biçimden bir başkasına geçerken moleküllerin kendilerini geçiçi olarak içinde buldukları "rahatsız" durum. Geçiş durumu ile ilişkili enerji, etkinleşim çıtasıdır.

gen Bir kalıtsal bilgi birimi. Genomda, DNA'ya yazılmış, bütün bir bilgi dizisi.

genetik kod DNA'nın, proteinlerin amino asit dizilerini şifrelemek için kullandığı şifre dili.

geri besleme döngüsü Bir sürecin ürünleri ile girenlerin alosteri yoluyla etkileşimi sayesinde ürün miktarının denetlenmesi. Geri besleme döngüleri, hücreleri düzenleyen kimyasal "devre"nin temel bileşenidir.

gevşek eşleşme Bir moleküler makinenin tüketilen her bir ATP başına değişken mesafeler kat edebilme yeteneği. Bu gibi bir motorun düzenli aralıklarla yoldan ayrılıp bir Brown cırcırı gibi hareket etmesi gerekir.

güç Enerjinin farklı bir biçime dönüşme hızı ya da yapılan işin hızı. Saniye başına düşen enerji. Gücün birimi watt'tır (W); 1 watt = 1 joule/saniye.

helikaz Eşlenme sırasında DNA ipliklerini açan ve ayıran moleküler makine.

ilerleyicilik Bir moleküler motorun, moleküler bir yol üzerinde uzun mesaferler boyunca ayrılmaksızın hareket edebilme yeteneği.

indirgemecilik Düzeneklerin, daha küçük parçalarına ayrılarak incelendiği yöntem.

irkilebilirlik Canlı dokunun, elektrik akımı gibi dış uyaranlara tepki verme özelliği.

istatistiki mekanik İstatistiki yöntemlerin, atomların ve moleküllerin hareketlerine uygulanması. Çok sayıda atom ve molekülün ortalamalarının alınması, büyük ökçekli termodinamik biliminin yolunu açar.

iş Kuvvet ile uzaklığın çarpımı; kuvvet, bir nesneyi hareket ettirmek için belli bir mesafe boyunca uygulandığında harcanan enerji. İşin birimi joule'dür (J); joule bir newton-metreye (Nm) eşittir.

kalıtyazım DNA'dan ulak RNA'ya bilgi aktarımı.

karmaşıklık Çok sayıda etkileşimli parçadan oluşan ve belirmiş özellikler sergileyen bir düzeneğin özelliği.

kesecik Küresel lipit oluşumu; su dolu bir odacığı, keseciğin dışındaki sudan ayıran çift katlı bir küreden oluşur.

kinezin Mikrotübüller üzerinde hareket eden moleküler motor ailesi. Yük taşımadan ya da hücre bölünmesine yardımdan sorumludur.

kinetik kuram İstatistiki mekaniğin öncüsü; istatistiğin, gazlardaki atomların hareketlerine uygulanması.

kodon Genetik şifredeki bir "sözcük"; üç nükleotit harften oluşur. Her bir kodon genetic şifreye göre bir amino aside karşılık gelir.

kolajen İpliksi proteinler. Hücreler arası ortamın, hayvan bedenlerine yapı kazandıran bir parçasıdır.

kromozom Hücre çekirdeğindeki bir DNA yumağı.

kuantum mekaniği Atomları, elektronları ve atom altı parçacıkları tanımlayan fiziksel kuram. Temelde olasılıklara dayanır.

kuvvet Bir nesnenin biçimini ya da hareket durumunu değiştiren bir itme ya da çekme. Kuvvetin birimi newtondur (N).

küçük ölçekli durum Bir düzeneğin kesin hali; düzenekteki bütün atomların konumları ve hızlarını içerir.

Landauer'in sınırı Bir bitlik bilgiyi silmek için gereken asgari enerji.

lazer cımbızları Odaklanmış lazer ışığında askıda tutulan küçük bir boncuktan yararlanan, lazer-temelli kuvvet ölçüm yöntemi.

ligaz DNA parçalarını birbirine ekleyen enzim.

lipidler Hücre zarlarının temel birleşeni olan miseller ve kesecikleri oluşturan çiftsever moleküller. Susever bir baş grubuna bağlı susevmez bir yağ asidinden oluşur.

Loschmidt'in iblisi Zamanı tersine çevirebilen varsayımsal bir yaratık.

Maxwell'in iblisi Molekülleri *yıklayarak* termodinamiğin ikinci yasasını çiğneyebilecek varsayımsal bir yaratık. İmkânsız olduğu gösterildi.

mikrometre Metrenin milyonda biri. Sıradan bir bakterinin büyüklüğü.

mikrotübüller Hücre iskeletinin bir kısmını oluşturan sert, protein temelli lifler. Kinezin ve dinein, mikrotübüller üzerinde ilerler. Mikrotübüller, hücre bölünmesi sırasında önemli katkıda bulunurlar.

misel Çiftsever moleküllerin küresel düzenlenmesi.

mitokondriler Hücrelerin enerji tesisleri. Şekerin yıkılıp, içeriğindeki enerjinin ATP'ye aktarıldığı yer burasıdır.

mitoz Hücre bölünmesi.

miyozin Aktin üzerinde hareket eden moleküler motorlar ailesi. Miyozin II kas kasılmasından sorumluyken miyozin V hücrelerin içinde yük taşır.

MMP (matris metaloproteinaz) Hücreler arası ortamı yıkıp hücreleri hareket edebilmek üzere serbest bırakan bir enzim. Bazı MMPlerin enerjilerini kolajeni yemekten elde eden moleküler makineler oldukları gösterilmiştir.

molekül En az iki atomun sıkıca bağlı birlikteliği. Biyolojik hücrelerde, DNA ya da proteinler gibi bazı moleküller çok büyük olabilir, binlerce atom içerebilirler.

moleküler fırtına Atomların ve moleküllerin gelişigüzel ısıl hareketi.

moleküler makine Enerjiyi bir biçimden diğerine dönüştürebilen molekül.

moleküler motor Kimyasal enerjiyi hareket enerjisine dönüştüren moleküler makine.

nano ölçek Nanometrenin ölçeği.

nanobilim Nano ölçekli nesnelerin bilimi.

nanobotlar Karmaşık görevleri, özellikle tıbbi uygulamalarda, yerine getirebilen varsayımsal, nano ölçekli makineler.

nanometre Metrenin milyarda biri. Küçük bir molekülün olağan büyüklüğü.

nanoteknoloji Nano ölçekli yapı ya da malzemelerle ilgili teknoloji.

nükleotit Kalıtsal şifrede bir "harf" yerine geçen molekül. DNA ve RNA'nın bir parçası. DNA'da dört nükleotit bulunur: adenin, guanin, timin ve sitozin; A, G, T ve C harfleri ile gösterilirler.

olağan dağılım Çok sayıda istatistiki olarak bağımsız etkene dayanan ölçümlerden beklenen dağılım. Bu evrensel dağılım; fizik, biyoloji, ekonomi ve diğer alanlarda bulunur.

olasılık Bir olayın gerçekleşebilirliği; olayın gerçekleşebileceği yolların sayısının olası bütün sonuçlara bölünmesi ile elde edilir.

pekişim Bazı süreçlerin gerçekleşmesi için çok sayıda parçanın eş zamanlı olarak bir arada davranmasını gerektiren özellik.

polimeraz DNA ya da RNA yapan moleküler makine.

protein Peptit bağları ile birleştirilmiş, katlanmış bir amino asit ipliğinden oluşan büyük bir molekül. Proteinlerin belirli biçimler almak üzere katlanmaları onların hücrelerde enzimler, moleküler makineler ya da yapısal öğeler (kolajen, aktin, vb.) olarak iş görmek dahil pek çok görevi yerine getirmesine izin verir.

protein katlanması Bir amino asit zincirinin işlevsel bir protein oluşturmak üzere en düşük enerji durumunu almak üzere katlandığı fiziksel süreç.

ribozom Hücrelerimizde, DNA'nın içerdiği yönergeler uyarınca proteinleri üreten RNA-temelli makine.

RNA (ribonükleik acit) Hem bilgi taşıyabilen hem de enzim olarak çalışabilen molekül. Hücrelerde bilgi taşımaktan protein üretim makinelerine (ribozom) kadar pek çok görev alır.

serbest enerji İş yapmaya elverişli enerji. Toplam enerjiden kullanılabilir, saçılmış enerji çıkarılarak elde edilir. Kullanılabilir enerji, entropi ve sıcaklık çarpılarak elde edilir.

sıcaklık Dengede bulunan bir düzenekteki atomların ve moleküllerin ortalama kinetik enerjisi.

sıkı eşlenme ATP yıkımının, bir mokeküler motorun hareketi ile bire bir eşlenmesi. Genellikle motor tarafından atılan her bir adım için bir

ATP yıkıldığı anlamına gelir. En azından bir kısmı, gevşek eşlenmenin aksine, yola sürekli olarak bağlı kalan motorlarla ilgilidir.

sistem biyolojisi Canlı hücrelerin düzenlenmesi ve işletilmesinin matematiksel kuramı.

susever Suda *çözündüklerinde serbest enerjilerini düşüren moleküller*. Ya su ile hidrojen bağı oluşturabilirler ya da yüklüdürler.

susevmez Suya konduklarında serbest enerjilerinde bir artış deneyimleyen ve bu yüzden suda çözünmeyen moleküller.

şans ve gereklilik Olan her şeyden sorumlu temel ilkeler. Şans, kuantum mekaniğinden ve moleküler fırtınadan doğarken gereklilik, fizik yasalarının sonucudur.

tarama sonda mikroskobu Görüntü oluşturmak ya da yüzey özelliklerini ölçmek için sivri bir sondanın bir yüzeyi "duyumsadığı" mikroskop çeşidi.

tarama tünelleme mikroskobu Sivri, metal bir iğne ile iletken bir yüzey arasındaki tünelleme akımlarını ölçen bir tür tarama sonda mikroskobu. Atomların görüntüsünü çıkarabilir.

taşıyıcı RNA (tRNA) Kalıtsal bilgiyi proteine çevirmek için gereken anahtarı taşıyan RNA – amino asit birlikteliği.

termodinamik Isı ve enerji, hacim, basınç ve sıcaklık bilimi.

termodinamiğin birinci yasası Enerjinin korunumu yasası; ısıyı açık bir biçimde bir enerji çeşidi olarak kabul eder.

termodinamiğin ikinci yasası Kapalı bir düzenekte entropinin asla azalamayacağını ve enerji dönüşümleri sırasında genellikle artacağını belirten yasa. Bu yasa çok sayıda farklı biçimde ifade edilebilir.

topoizomeraz Eşlenme sırasında gerilimi azaltmak ve DNA'yı düğüm olmaktan korumak için DNA ipliklerini kesip yeniden birleştiren enzim.

ulak RNA (mRNA) Bir protein yapmak için gereken bilgiyi hücre çekirdeğindeki DNA'dan çekirdek dışındaki ribozomlara taşıyan RNA.

X-ışınları Yüksek hızlı elektronları metal bir hedefe çarptırarak üretilen yüksek enerjili elektromanyetik ışına.

yayınım Molekül ya da atomların gelişigüzel hareketi. Ortalamada yayınım, parçacıkların yüksek derişimli bir bölgeden düşük derişimli bir bölgeye doğru hareket etmesine neden olur.

Kaynakça

Bu, kitabı yazarken kullandığım kaynakların bir kısmının listesidir. Bu kaynakların pek çoğu birden çok bölümde kullanılmıştır. Ne var ki, yerden kazanmak adına her bir kaynak yalnızca bir defa, ilk kullanıldığı kısım için belirtilmiştir. Atıflar, yazar soyadına göre alfabetik sıralanmıştır. Yalnızca kolaylıkla erişilebilen kaynakları listeledim. Ne yazık ki, pek çok teknik makale hem halkın erişimine açık değil hem de uzman olmayanlar için anlaşılamazdır.

GİRİŞ

Monod, Jacques. *Chance and Necessity*. Çeviren Austryn Wainhouse. New York: Alfred A. Knopf, 1971.

Schrödinger, Erwin. *What Is Life?* Canto ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Thomson, D'Arcy. *On Growth and Form*. Canto ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

1. BÖLÜM

Alioto, Anthony. *A History of Western Science*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1986.

Aristotle. *De Anima. The Basic Works of Aristotle*. New York: Modern Library, 2001.

———. *Physics. The Basic Works of Aristotle*. New York: Modern Library, 2001.

Cahan, David. *Hermann von Helmholtz and the Foundations of Nineteenth-Century Science*.

California Studies in the History of Science. Berkeley: University of California Press, 1994.

Darwin, Charles. *The Origin of Species*. Available at Literature.org, the Online Literature Library, www.literature.org/authors/darwin-charles/the-origin-of-species/.

Debus, Allen George. *Man and Nature in the Renaissance*. Cambridge Studies in the History of Science. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.

Descartes, René. *Discourse on Method.* www.literature.org/authors/descartes-rene/reason-discourse/.

Gay, Peter. *The Enlightenment: The Rise of Modern Paganism.* New York: W. W. Norton, 1995.

Granger, Herbert. *Aristotle's Idea of the Soul.* Boston: Kluwer, 1996.

Hankins, Thomas. *Science and the Enlightenment.* Cambridge Studies in the History of Science. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

Harris, Henry. *The Birth of the Cell.* New Haven, Conn.: Yale University Press, 2000.

Helmholtz, Hermann. *Über die Erhaltung der Kraft.* www.archive.org/details/berdieerhaltung01helmgoog.

Henry, John. *The Scientific Revolution and the Origins of Modern Science.* Studies in European History. New York: Palgrave Macmillan, 2008.

Holmes, Richard. *The Age of Wonder: How the Romantic Generation Discovered the Beauty and Terror of Science.* New York: Pantheon, 2009.

Hooke, Robert. *Micrographia.* www.gutenberg.org/files/15491/15491-h/15491-h.htm.

La Mettrie, Julien. *Machine Man and Other Writings.* Ed. Ann Thomson. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

La Mettrie, Julien ve Aram Vartanian. *La Mettrie's L'homme Machine: A Study in the Origins of an Idea.* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1960.

Lenoir, Timothy. *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology.* Chicago: University of Chicago Press, 1989.

Lindberg, David. *The Beginnings of Western Science: The European Scientific Tradition in Philosophical, Religious, and Institutional Context, Prehistory to A.D. 1450.* Chicago: University of Chicago Press, 2008.

Lucretius. *De Rerum Natura.* Available at The Internet Classic Archive, http://classics.mit.edu/Carus/nature_things.html.

McKendrick, John Gray. *Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (Masters of Medicine).* New York: Longmans, Green & Co., 1899.

Mendelsohn, Everett. *Heat and Life: The Development of the Theory of Animal Heat.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1964.

Newton, Isaac. *Opticks.* Available at Project Gutenberg, www.gutenberg.org/files/33504/33504-h/33504-h.htm.

Rubenstein, Richard. *Aristotle's Children: How Christians, Muslims, and Jews Rediscovered Ancient Wisdom and Illuminated the Middle Ages.* New York: Houghton Mifflin, Mariner Books, 2004.

Russell, Bertrand. *A History of Western Philosophy*. New York: Simon & Schuster, 1972.

Shelley, Mary Wollstonecraft. *Frankenstein: or the Modern Prometheus*. Available at Literature.org, the Online Literature Library, www.literature.org/ authors/shelley-mary/frankenstein/.

2. BÖLÜM

Chardin, Teilhard. *The Phenomenon of Man*. Available at The Internet Archive, www.archive.org/details/phenomenon-of-man-pierre-teilhard-de-chardin.pdf.

Eigen, Manfred ve Ruthild Winkler. *Das Spiel: Naturgesetze steuern den Zufall*. Serie Piper, 1996; İngilizce basım, *Laws of the Game: How the Principles of Nature Govern Chance*. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1993.

Judson, Horace Freeland. *The Eighth Day of Creation: Makers of the Revolution in Biology*. Plainview, N. Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1995.

Kline, Morris. *Mathematics for the Nonmathematician*. New York: Dover, 1985.

———. *Mathematics in Western Culture*. New York: Oxford University Press, 1964.

Mainzer, Klaus. *Der kreative Zufall: Wie das Neue in die Welt kommt*. Munich, Germany: C. H. Beck, 2007.

Mlodinow, Leonard. *The Drunkard's Walk: How Randomness Rules Our Lives*, New York: Pantheon, 2008.

Moore, Walter. *Schrödinger: Life and Thought*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

Timoféeff-Ressovsky, N. W.; K. G. Zimmer ve M. Delbrück. *Über die Natur der Genmutation und der Genstruktur*. In *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. Berlin: Weidmannsche Buchhandlung, 1935. www.ini.uzh.ch/~tobi/fun/max/timofeeff-ZimmerDelbruck1935.pdf.

Wykes, Alan. *Doctor Cardano, Physician Extraordinary*. London: Muller, 1969.

3. BÖLÜM

Feynman, Richard. *The Feynman Lectures of Physics*. Boston: Addison Wesley Longman, 1970.

Lindley, David. *Boltzmann's Atom: The Great Debate That Launched a Revolution in Physics*. New York: Free Press, 2001.

4. BÖLÜM

Drexler, K. Eric. *Engines of Creation 2.0*. E-kitap. WOWIO, 2006. www.wowio.com/users/product.asp?BookId=503.

Feynman, Richard. "There's Plenty of Room at the Bottom." *Caltech Engineering and Science* 23 (February 1960): 22–36. Available at www.zyvex.com/nanotech/feynman.html.

Nelson, Philip. *Biological Physics: Energy, Information, Life*. New York: W. H. Freeman, 2008.

Philips, Rob, ve Stephen R. Quake. "The Biological Frontier of Physics." *Physics Today* (May 2006): 38–43.

5. BÖLÜM

Feynman, Richard. *Feynman Lectures on Computation*. Reading, Mass.: Perseus, 2000.

Gamow, George. *Mr. Tompkins in Paperback*. Canto ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

Mahon, Basil. *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*. New York: Wiley, 2003.

6. BÖLÜM

Astumian, R. Dean. "Making Molecules into Motors." *Scientific American* (July 2001).

Astumian, R. Dean ve Peter Hänggi. "Brownian Motors." *Physics Today* (November 2002): 33–39.

7. BÖLÜM

Boyer, Paul. "Energy, Life, and ATP." Nobel Lecture, December 8, 1997. http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1997/boyer-lecture.html.

Cooper, Geoffrey. *The Cell: A Molecular Approach*. Washington, D.C.: ASM Press, 1997.

Hoagland, Mahlon ve Bert Dodson. *The Way Life Works*. New York: Three Rivers Press, 1995.

Walker, John. "ATP Synthesis by Rotary Catalysis." Nobel Lecture, December 8, 1997. http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1997/walker-lecture.html.

8. BÖLÜM

Paley, William. *Natural Theology*. "The Complete Works of Charles Darwin Online," http://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=A142&viewtype=text&pageseq=1.

9. BÖLÜM

Alon, Uri. *An Introduction to Systems Biology*. Boca Raton, Fla.: Chapman & Hall/CRC, 2007.

Margulis, Lynn ve Dorion Sagan. *What Is Life?* Berkeley: University of California Press, 1995.

Mayr, Ernst. *This Is Biology: The Science of the Living World*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1997.

Okunması Önerilen Kitaplar

Bu, ileri okuma için şiddetle önerdiğim kitapların açıklamalı bir listesidir. Kitapta geçen konulara açıklık kazandırmaya yardımcı olabilir ya da bir konuyu kitapta bırakılan yerden sürdürebilirler.

ATOMCULUK

Greenblatt, Stephen. *The Swerve: How the World Became Modern.* New York: W. W. Norton, 2011. Kadim Yunanistan ve Roma atomcu düşüncelerinin çağdaş bilime etkisi üzerine keyifli bir okuma.

KARMAŞIKLIK

Kauffman, Stuart. *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity.* New York: Oxford University Press, 1996. En bilindik karmaşıklık kuramcılarından birinin kendiliğinden düzenlenme, karmaşıklık ve yaşamın başlangıcına dair düşündürücü fikirleri.

Waldrop, M. Mitchell. *Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos.* New York: Simon & Schuster, 1992. Karmaşıklık araştırmasının erken dönemlerinin son derece kolay okunur, neredeyse haberci bir biçimde aktarımı. Kitap görece eski olsa da tartışılan konular bugün de tıpkı 1990'ların başında olduğu kadar gündemde.

GELİŞİM

Carroll, Sean. *Endless Forms Most Beautiful: The New Science of Evo Devo.* New York: Norton, 2005. Bu kitap ve Carroll'ın aşağıda anılan *The Making of the Fittest*'i evrimsel gelişime (bedenlerin, biçimlerini nasıl kazandıkları ve bu biçimlerin nasıl evrimleştiğinin kuramı) harika bir giriş sağlıyor.

———. *The Making of the Fittest: DNA and the Ultimate Forensic Record of Evolution.* New York: W. W. Norton, 2006. Yukarıda, *Endless Forms Most Beautiful* ile ilgili yazılanlara bakınız.

EVRİM

Dawkins, Richard. *The Ancestor's Tale: A Pilgrimage to the Dawn of Evolution.* New York: Houghton Mifflin, 2004. En sevdiğim Dawkins kitabı (ama bütün kitaplarını öneririm). Tür tür zamanda geriye, yaşamın kökenine bir yolculuk.

Pallen, Mark. *The Rough Guide to Evolution.* New York: Penguin Books, 2009. Evrime çabuk ama şaşırtıcı derecede ayrıntılı bir giriş. Eğlenceli bir okuma.

Zimmer, Carl. *Evolution: The Triumph of an Idea.* New York: Harper Collins, 2001. Şiddetle önerilen PBS televizyon dizisine eşlik eden bir kitap. Fevkalade açıklamalar, iyi yazın ve çok sayıda görsel anlatım.

KALITIM

Ridley, Matt. *Genome: The Autobiography of a Species in 23 Chapters.* New York: Harper Perennial, 2000. İnsan genomuna harika bir giriş. Her bir bölüm, bir kromozomu işliyor. Bu kitaptaki yazın kusursuz.

MOLEKÜLER BİYOLOJİ

Harold, Franklin M. *The Way of the Cell: Molecules, Organisms, and the Order of Life.* New York: Oxford University Press, 2003. Hücre biyolojisine okunması son derece kolay, gözde bir giriş.

Hoagland, Mahlon ve Bert Dodson. *The Way Life Works.* New York: Three Rivers Press, 1995. Bu kitap aynı zamanda kaynakçada da var; fakat burada bir kez daha andım, zira biyolojiye en ufak ilgisi olan herkesin bu kitabı edinmesi gerektiğine inanıyorum. Mizah, karikatür ve moleküler biyolojiye ciddi bir girişin eşsiz bir karışımı. Genel bir fikir edinmek için en iyi kitap bu.

Lane, Nick. *Power, Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life.* New York: Oxford University Press, 2005. Hücrelerde nasıl enerji üretildiğine dair ayrıntılı ama son derece okunur bir anlatım; fakat aynı zamanda neden iki cinsiyet olduğu gibi pek çok temel soruyu da kapsamına alıyor.

Rensberger, Boyce. *Life Itself: Exploring the Realm of the Living Cell.* New York: Oxford University Press, 1996. Hücresel ve moleküler biyolojiye dair iyi yazılmış, gözde bir giriş.

MOLEKÜLER MAKİNELER

Jones, Richard. *Soft Machines: Nanotechnology and Life.* New York: Oxford University Press, 2007. *Yaşamın Kökeni* ile benzer konuları işliyor; fa-

kat fiziğe daha az ve nanoteknolojiye daha fazla yer ayırıyor. Okunması gereken bir kitap.

Nelson, Philip. *Biological Physics: Energy, Information, Life.* New York: Freeman, 2008. Bu kitap aynı zamanda kaynakçada da var; fakat *Yaşamın Kökeni* açısından önemi olduğundan burada bir kez daha andım. Kendi kitabımı yazmama ilham sağlayan bu kitaptır. *Biological Physics* okuduğum en ilginç ve iyi yazılmış ders kitabı. Ne var ki epey tekniktir; o bakımdan yalnızca matematik ve fiziğiniz sağlamsa bu kitabı alın.

YAŞAMIN KÖKENİ

Davies, Paul. *The Fifth Miracle: The Search for the Origin and Meaning of Life.* New York: Simon & Schuster, 2000. Yaşamın kökenine dair kuramlara son derece kolay okunur bir giriş.

Hazen, Robert. *Genesis: The Scientific Quest for Life's Origin.* Washington, D. C.: Joseph Henry Press, 2007. Yaşamın kökenini inceleyen araştırmacılara dair son derece kolay okunur, kişisel bir giriş. Güncel.

KENDİLİĞİNDEN DÜZENLENME VE DOĞADAKİ DESENLER

Ball, Philip. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature.* New York: Oxford University Press, 2001. Doğada desenlerin kendiliğinden oluşmasının ayrıntılı ve güzelce şekillerle açıklanmış bir anlatımı. D'Arcy Thompson'ın *Growth and Form*'unun çağdaş bir güncellemesi.

TERMODİNAMİK VE YAŞAM

Brown, Guy. *The Energy of Life: The Science of What Makes Our Minds and Bodies Work.* New York: Free Press, 1999. Hücrelerimizdeki ısıl hareketten kilo vermeye kadar insan yaşamında ısıldevinimin yerine dair gözde bir anlatım.

Kurzynski, Michal. *The Thermodynamic Machinery of Life.* The Frontiers Collection. Berlin ve New York: Springer, 2006. Termodinamik ve yaşama dair çok teknik ama engin bir anlatım.

Schneider, Eric. *Into the Cool: Energy Flow, Thermodynamics, and Life.* Chicago: University of Chicago Press, 2006. Yaşam ile termodinamiğin ikinci yasasının nasıl uyumlu olduklarını tartışmakla kalmayıp yaşamı açıklamak için ikinci yasanın nasıl gerekli olduğunu da açıklıyor.

Teşekkür

Eski Yunan'da başlayıp günümüzün en ileri araştırmasında son bulan bir kitap, tek bir kişi tarafından ortaya çıkarılmış olamaz. Bir dizi insan doğrudan ya da dolaylı olarak bana ilham vererek, yardım ederek, kitap üzerinde çalışarak ya da başka biçimlerde, bu kitabı yazmamda bana destek oldular; bunun için onlara teşekkür ederim.

Öncelikle dolambaçlı cümleler, ayak sürüyen paragraflar ve işe yaramayan sözcüklerin son kalıntıları da ayıklanana kadar taslak ardına taslak okumak, eleştirmek, elden geçirmek ve düzeltmek için sayısız saat harcayan güzel ve zeki eşim, sanatçı ve bilim hayranlığında yoldaşım Patricia Domanski'ye teşekkür ederim. Gözden kaçanlar olduysa, tamamen benim hatamdır. Onunla olan tartışmalarım, kitaptaki pek çok düşünceye ilham kaynağı oldu; bana sonsuz sabır gösterdiği için ona özellikle teşekkür etmeliyim.

Ayrıca bana büyük bir öğrenme aşkı aşılayan ebeveynlerime ve öğretmenlerime teşekkür ederim; bu hediye beni sürekli yeni şeyler öğrenmeye ve deneyimlemeye itti. Bu hediyenin bir sonucu bu kitaptır. Ayrıca beni Sokrates öncesi felsefe bakımından hizaya sokan Wayne Eyalet Üniversitesi Felsefe Bölümü'nde Profesör Herbert Granger'a, beni biyoloji ile ilgili araştırmalara başlatan Profesör Rafael Fridman (WSU Patoloji) ve Profesör Heinrich Hoerber'a (şimdi Bristol Üniversitesi'nde) ve moleküler makinelerle ilgili çok sayıda sorumu yanıtlayan fizikçi çalışma arkadaşım Dr. Takeshi Sakamoto'ya teşekkür ederim.

Son olarak, ilk kitap önerisi girişimim pek bir şeye benzemese de bana bir şans tanıyacak kadar kibar olan yayıncım Russell Galen'a ve Basic Books'taki editörlerim T. J. Kelleher ve Tisse Takagi'ye değerli önerileri ve destekleri için teşekkür ederim.

Dizin

A

Adenin 267
Ağdalılık 136, 137
Akıllı tasarım 296
Aktin 126, 127, 151, 152, 223, 225, 226, 227, 234, 235, 243, 244, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 261, 262, 277
Alosteri 205, 229, 240, 305, 307
Amaç 12, 14, 20, 34, 44, 47, 50, 61, 62, 65, 69, 83, 87, 187, 284, 285, 287
Amino asitler 296
Anaksimandros 24
Anaksimenes 24
Anlam 22, 23, 24, 26, 28, 29, 41, 55, 63, 69, 104, 111, 114, 146, 155, 158, 164, 165, 168, 179, 185, 186, 194, 210, 212, 213, 215, 229, 240, 244, 257, 264, 266, 276, 277, 290, 295, 296, 298, 318
Aquinas, Thomas 28
Ateş 24, 25, 30, 41, 42, 44, 45, 46, 119, 126, 173, 234
Atom 11, 13, 14, 25, 80, 87, 90, 92, 98, 99, 104, 105, 107, 119, 120, 135, 136, 139, 140, 181, 285
Atomculuk 24, 25, 26, 27, 28, 33, 34, 35, 51, 82
Atomik kuvvet mikroskopları (AKM) 10, 11, 12, 132, 133, 134, 135, 163, 164, 165, 235, 243, 244, 278
Aziz Augustinus 27

B

Baz 268, 273, 274, 275, 300
Bechhoefer, John 180, 181
Besin 10, 12, 21, 42, 58, 59, 95, 112, 168, 173, 193, 212, 256, 257, 285, 311
Biçim 17, 28, 48, 50, 82, 127, 157, 158, 159, 167, 170, 186, 194, 197, 200, 202, 204, 205, 207, 208, 211, 215, 249, 253, 278, 296, 312
Bilgi 15, 18, 22, 24, 26, 27, 30, 38, 45, 55, 72, 78, 86, 89, 90, 93, 101, 107, 108, 130, 140, 141, 158, 159, 161, 179, 180, 181, 187, 232, 240, 242, 247, 266, 268, 269, 272, 273, 275, 276, 286, 287, 288, 291, 295, 296, 297, 298, 299, 305, 310, 312, 317
Bilimsel devrim 34, 35, 284
Biyofizik 126, 234, 243, 244, 277, 304
Biyoloji Budur (Mayr) 303
Boltzmann, Ludwig 80, 82, 99, 102, 103, 181, 182, 195
Boyle, Robert 43, 44
Brown, Robert 51, 82, 102, 103, 104, 147, 176, 181, 194, 220, 241, 242, 265, 272, 294
Bütüncülük 14, 315, 316, 317, 319
Büyük Hadron Çarpıştırıcısı 319
Büyük ölçekli dünya 11, 136
Büyük patlama 17, 119
Byron, Lord 52

C-Ç

Cancılık 22, 23, 25, 26, 27, 49, 85
Canlı 10, 12, 13, 22, 23, 26, 28, 35, 38, 39, 41, 42, 47, 48, 55, 83, 84, 92, 94, 98, 103, 114, 121, 122, 123, 130, 136, 139, 143, 146, 148, 161, 167, 170, 173, 174, 193, 202, 205, 207, 226,

228, 244, 262, 285, 298, 299, 304, 309, 314, 318, 324
Chardin, Pierre Teilhard de 82, 84, 85, 86, 87
Cırcır 171, 187, 188, 189, 190, 192, 197, 208, 210, 219, 220, 222, 241, 242, 265, 272, 294, 299, 300
Crick, Francis 16, 268
Çaperonin 296
Çekirdek 51, 67, 102, 119, 120, 121, 146, 169, 183, 225, 257, 268, 276, 318, 319
Çeviri 113, 266, 268, 273, 274, 275, 276, 296, 311

D

Darwin, Charles 40, 54, 61, 62, 63, 64, 65, 80, 86, 87, 102, 284, 287, 316, 326
Dawkins, Richard 295
Değişinim 82, 89, 90, 91, 92, 156, 253, 288, 289, 292, 295, 299, 300, 302
Demokritos 24, 25, 34, 41, 61, 82, 98, 102, 281
Denetim molekülleri 205, 308, 311
Descartes, René 12, 33, 34, 37, 42, 55, 284
Dirimselcilik 16, 17, 23, 25, 26, 49, 54, 58, 65, 85, 87
DNA 11, 13, 16, 28, 88, 92, 93, 131, 140, 148, 150, 156, 159, 160, 161, 167, 168, 193, 203, 207, 225, 232, 241, 242, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 288, 290, 292, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 303, 305, 310, 311, 312, 314, 326
Doğal seçilim 62, 64, 65, 283, 287, 299
Drexler, K. Eric 125, 131, 132, 225
Düzensizlik 94, 112, 113, 114, 150, 152, 194

E

Einstein, Albert 80, 82, 103, 104, 119, 147, 176, 181, 326
Elektrik 52, 53, 54, 58, 60, 112, 144, 159, 169, 170, 171, 192, 259, 260, 265
Elektron 88, 92, 107, 119, 133, 134, 139, 140, 153, 168, 233, 235, 251, 257, 258, 260, 265, 318, 319, 320
Enerjinin korunumu 55, 56, 57, 60, 100, 101, 104, 105, 106, 117, 183, 186
Entropi 97, 108, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 119, 138, 142, 143, 144, 150, 152, 179, 180, 181, 182, 185, 187, 238
Enzim 155, 200, 201, 202, 203, 204, 206, 207, 208, 212, 228, 259, 260, 269, 273, 279, 289, 306, 307, 310, 311, 312
Eşleme 268, 270, 271, 273, 288
Evren 16, 17, 18, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 63, 67, 68, 69, 84, 119, 120, 121, 153, 157, 159, 182, 183, 192, 289, 314, 317, 319, 320, 321, 323, 324, 325, 326
Evrim 17, 19, 28, 62, 63, 82, 83, 84, 85, 89, 95, 123, 158, 161, 249, 287, 289, 292, 293, 295, 297, 298, 299, 300, 301, 316, 321, 323

F

Fermat, Pierre de 74, 76, 77
Feynman, Richard 128, 130, 131, 133, 136, 138, 139, 171, 187, 188, 190, 191, 192, 220, 222
Filojiston 44, 45
Fizik 10, 15, 16, 17, 18, 22, 28, 30, 41, 47, 55, 56, 61, 63, 70, 83, 85, 86, 87, 88, 94, 95, 99, 100, 111, 128, 130, 136, 139, 140, 142, 143, 155, 158, 159, 172, 174, 177, 180, 192, 243, 290, 295, 296, 297, 298, 299, 301, 316, 317, 324
Floresan 233, 234, 235, 245, 246, 247, 251, 252, 261, 279, 316
Fosil 24, 290

Frankenstein (Shelley) 51, 52, 53, 54
Franklin, Benjamin 44

G

Galen 29, 30, 31, 32, 42, 43, 44
Galileo 34, 35, 174
Galton, Francis 80, 81, 82
Galvani, Luigi 53, 57, 58
Gamow, George 177, 180
Gassendi, Pierre 33, 34
Gauss, Carl Friedrich 79
Geçişim 147, 166, 167, 280
Gelişigüzellik 11, 17, 65, 68, 69, 74, 81, 82, 85, 87, 94, 95, 99, 158, 159, 218, 222, 295, 301, 324, 326
Gelişim 30, 36, 47, 48, 49, 61, 82, 84, 85, 142, 203, 242, 266, 286, 295, 296, 297, 313
Gen 89, 91, 92, 266, 268, 292, 295, 297
Genetik kod 317
Glukoz 257
Gluonlar 319
Golgi cisimciği 225
Guanin 267, 317

H

Hareket 12, 14, 15, 17, 21, 22, 23, 28, 29, 33, 38, 39, 41, 48, 56, 60, 75, 84, 93, 99, 101, 102, 103, 104, 113, 119, 121, 122, 126, 127, 131, 132, 139, 141, 144, 147, 149, 150, 158, 160, 163, 164, 165, 167, 169, 173, 175, 183, 184, 185, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 202, 205, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 229, 230, 231, 234, 235, 237, 238, 239, 240, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 261, 265, 266, 271, 272, 274, 278, 279, 280, 281, 287, 299, 300, 315
Helmholtz, Hermann von 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 65, 86, 90, 94, 100, 126, 173, 186, 187, 256, 281
Helmont, Jan Baptist van 42, 43
Helyum 67, 119, 120, 324
Hıristiyanlık 29
Hidrojen 67, 119, 120, 153, 154, 155, 160, 161, 163, 229, 257, 258, 267, 306, 317, 324
Hidrojen bağları 153, 154, 160, 267, 272
Hipokrat 29
Hoerber, Heinrich 11, 12
Hooke, Robert 13, 35, 36, 43, 44, 50, 97
Huxley, Thomas Henry 62, 249, 250, 251, 287
Hücre 28, 36, 50, 51, 83, 86, 87, 88, 114, 115, 127, 148, 149, 151, 161, 202, 206, 225, 226, 227, 229, 241, 242, 243, 253, 259, 268, 269, 273, 276, 281, 289, 292, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 311

I-İ

Isı 12, 21, 30, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 55, 56, 58, 101, 102, 104, 105, 106, 110, 112, 115, 142, 143, 172, 173, 174, 176, 178, 184, 212, 240
Isı enerjisi 104, 106, 122
Isıl enerji 106, 107, 108, 141, 168, 169, 170, 192, 194, 238, 249
Işıma 88, 89, 120, 246
İndirgemecilik 14, 15, 315, 316, 317, 319
İnsan Genomu Projesi 297
İplikçik 127, 129, 151, 207, 225, 234, 235, 236, 243, 244, 247, 248, 250, 251, 253, 261, 262, 277
İrkilebilirlik 38, 50, 51, 52, 53, 55, 57, 60, 61
İstatistik 11, 12, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 87, 88, 93, 94, 99, 100, 104, 106, 109, 171, 172, 177, 178, 181, 187, 188, 218, 231, 232, 314, 317

J

Jarzynski, Christopher 183, 184, 185
Joule, James 21, 56, 194, 228

K

Kalıcı etkinleşme 313
Kalıtım 13, 20, 64, 65, 89, 92, 268
Kalıtyazım 268, 269, 273, 274, 275, 276, 296, 305, 311, 312
Kanser 12, 129, 131, 269, 278, 308, 309, 310
Kant, Immanuel 49, 50
Karmaşa 11, 12, 15, 17, 18, 61, 69, 94, 98, 99, 100, 119, 123, 127, 149, 169, 170, 183, 184, 186, 187, 196, 211, 224, 269, 272, 281, 286, 298, 300, 301, 304, 314, 321
Kar taneleri 98, 117, 118, 141, 142, 143
Katılık 137, 163, 164, 165, 252, 298
Katolik Kilisesi 28, 33, 34, 67
Kendini düzenleme 47
Ketleyici bağlanma 306
Kimyasal bağ 93, 118, 160, 168, 198, 218, 300, 312
Kimyasal enerji 58, 59, 60, 169, 245, 258, 259, 262
Kinetik enerji 55, 56, 101, 102, 104, 105, 106, 107, 121, 184
Kinezin 215, 216, 223, 224, 225, 227, 230, 231, 232, 234, 235, 236, 237, 239, 240, 241, 242, 243, 245, 253, 268, 274, 277, 290, 292, 293, 294, 300, 307, 308, 310, 311
Kolajen 151, 152, 278, 279, 280, 301, 309
Kristal 16, 22, 93, 117, 135, 137, 141, 142, 143, 162, 317
Kromozom 13, 88, 89, 92, 242, 243, 266, 268, 269, 308
Kuantum mekaniği 82, 88, 90, 139, 174, 218, 317
Kuark 119, 121, 318, 319, 320
Kumar 16, 69, 70, 71, 72, 73, 78, 79
Kurbağa 42, 49, 52, 54, 58, 59, 60
Kuvvet 10, 15, 16, 17, 20, 26, 27, 28, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 95, 99, 102, 132, 135, 142, 145, 148, 150, 154, 155, 165, 186, 190, 209, 217, 218, 220, 224, 228, 229, 230, 231, 232, 243, 251, 260, 262, 274, 323
Küçük ölçekli durumlar 108
Kütle çekimi 45, 138

L

Laplace, Pierre-Simon 46, 63, 79
Lavoisier, Antoine 45, 46, 58, 59, 186, 256
Lazer cımbızı 185, 231, 251
Leeuwenhoek, Antonie Philips van 36
Leibniz, Gottfried 34, 55
Lizozom 225
Lucretius 26

M

Madde 9, 12, 20, 23, 28, 33, 34, 39, 40, 44, 47, 48, 49, 55, 56, 57, 83, 84, 87, 88, 90, 94, 98, 101, 103, 121, 133, 136, 137, 153, 176, 181, 193, 284, 305, 318, 319, 321, 324
Maxwell, James Clerk 80, 99, 102, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 185, 186, 187, 188, 209, 226, 240
Mayr, Ernst 132, 303, 304, 316
Mekanik enerji 58, 192, 245
Mekanistik felsefe 31, 35, 36, 38, 40, 41, 43, 47
Mekanizm 25, 47, 49, 52, 57, 60, 61, 62, 83, 285, 290, 293, 294, 301, 311, 317
Mendel, Gregor 61, 64, 81, 88
Mikroskop 35, 47, 55, 97, 133, 180, 231
Mikrotübül 151, 214, 215, 216, 236, 237, 240, 242
Mitokondri 213, 225, 226, 242, 256, 257, 258, 259, 260, 262, 263
Mitoz 242, 243, 308
Miyozin 126, 169, 223, 227, 228, 234, 235, 238, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 255, 277, 292, 293

Molekül 10, 90, 92, 93, 103, 121, 137, 140, 143, 146, 147, 148, 150, 154, 157, 158, 160, 162, 164, 165, 175, 178, 183, 198, 199, 200, 202, 204, 208, 217, 218, 223, 228, 232, 233, 244, 245, 257, 272, 290, 303, 306, 309, 313
Moleküler anahtar 252, 292, 294, 313, 314
Moleküler biyoloji 11, 12, 15, 90, 136, 139, 166, 291, 312
Moleküler fırtına 25, 103, 118, 121, 145, 147, 156, 157, 158, 168, 170, 188, 195, 196, 202, 208, 209, 210, 215, 216, 231, 237, 272, 299
Moleküler makine 194, 196, 202, 207, 213, 214, 223, 227, 245, 249, 256, 259, 269, 273, 277, 280, 288, 293, 304
Moleküler motor 194, 214, 223, 224, 227, 239, 252, 269, 293, 305
Monod, Jacques 16, 82, 85, 86, 194, 203, 205, 298, 311
Mutasyon (*bkz.* değişinim) 82, 235, 242

N

Nanobilim 129, 130, 136, 140, 304, 314
Nanobot 129, 131, 223, 281, 301
Nanofizik 126
Nanoölçek 126, 127, 128, 130, 131, 132, 136, 138, 139, 164, 168, 169, 170, 184, 185, 211, 256
Nanoteknoloji 11, 128, 129, 130, 139, 143, 180, 316
Newton, Isaac 34, 35, 45, 50, 54, 55, 174, 326
Neye İnanıyorum (Russell) 325
Nötron 119, 319
Nükleotit 274

O

Olasılık 71, 72, 73, 74, 87, 88, 89, 105, 106, 110, 169, 181, 196, 220, 221, 272, 300

P

Paley, William 63, 283, 284, 285, 286, 302
Paracelsus 31, 43
Parçacık fiziği 319, 320
Pascal, Blaise 74, 75, 76, 77, 79, 99
Pascal üçgeni 74, 75, 76, 77, 79
Pekişim 146, 147, 160, 161, 162, 164, 166, 167
Peynir 154, 155
Pisagor 25, 41
Piyango 298
Platon 27, 41
Poker 70, 71, 73
Protein 13, 114, 126, 145, 150, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 202, 205, 207, 214, 225, 231, 235, 266, 268, 269, 273, 275, 278, 281, 290, 291, 292, 293, 296, 297, 305, 307, 309, 312, 313, 317
Proton 119, 258, 259, 260, 262, 265, 266, 306, 319

R

Ramanujan, Chandra 135
Rastlantı ve Zorunluluk (Monod) 16, 85
Ribozom 225, 275, 276, 277, 283, 290, 291, 317
RNA 148, 168, 185, 268, 269, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 290, 291, 292, 296, 297, 312, 317
Ruh 12, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 33, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 84, 85
Russell, Bertrand 325
Rutherford, Ernest 10

S-Ş

Saat 40, 47, 48, 51, 63, 94, 167, 189, 262, 263, 283, 284, 285, 286, 287
Schrödinger, Erwin 15, 16, 91, 92, 93, 94, 100, 160, 174, 284, 299
Science (dergi) 312
Sıkı eşlenme 214, 222
Simya 35, 38, 43

Sisifos 208, 209, 210, 211, 213, 216, 240
Sitozin 267
Skolastik felsefe 27
Smoluchowski, Marian von 176, 177, 178, 181, 188, 192
Soyaçekim 81, 88, 90
Stoacılar 26, 27, 86
Süpernova 120, 285
Sürtünme 43, 44, 53, 56, 100, 101, 106, 110, 123, 183, 184, 185, 186, 209
Sürüklenme 217, 218, 219, 221, 274
Szilard, Leo 179
Şans 11, 16, 17, 18, 26, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 81, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 95, 118, 127, 142, 177, 181, 202, 285, 286, 295, 298, 299, 317, 321, 323, 324, 325, 326

T

Tanrı 27, 28, 34, 40, 41, 63, 65, 67, 69, 83, 84, 141
Taşıyıcı RNA (tRNA) 275, 276, 277
Teleomekanizm 49
Termodinamik 40, 46, 55, 104, 114, 121, 172, 173, 176, 212
Tıp 29, 30, 31, 36, 37, 55, 72, 73, 80, 129, 268
Timaios (Platon) 41
Timin 267
Titreşim enerjisi 213
Topoizomeraz 269, 271
Transistör 167, 314
Türlerin Kökeni (Darwin) 62, 87

U

Ulak RNA (mRNA) 269, 273, 276, 277, 291
Urasil 273, 317
UTP 274

V

Verimlilik 123, 172, 173, 174, 186, 210, 228, 229, 256, 257, 262, 266, 289, 291, 294
Vesalius, Andreas 32
Vinci, Leonardo da 72
Virüs 152, 285, 293
Voltaire 34, 84

W

Walker, John E. 259, 260, 261
Wallace, Alfred Russell 62
Watson, James 16, 268
Weinberg, Steven 319

Y

Yağlar 145, 154
Yaratılışçılar 111, 112, 259, 293, 295, 296, 298, 300
Yaşam enerjisi 12, 59
Yaşam kuvveti 12, 18, 19, 20, 22, 25, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 65, 68, 86, 186, 187, 303, 304, 323
Yaşam Nedir? (Schrödinger) 16, 91, 193, 299
Yayınım 143, 158, 176, 217, 218, 219, 222, 237, 242, 245, 252, 278, 279, 281
Yıldız 17, 27, 33, 67, 68, 72, 79, 120, 126, 156, 183, 246, 271, 285, 286, 317, 323
Yunan felsefesi 24, 47

Z

Zar 71, 72, 73, 74, 89, 114, 127, 144, 149, 225, 226, 243, 253, 257, 258, 259, 260, 263, 265, 276, 281, 285, 306, 309
Zenon, Kıbrıslı 26
Zerre 34

Yaşamın gizemi henüz tam olarak çözülmemiş olsa da, bilim bize canlıların cansız moleküllerden oluşan karmaşık yapılardan ibaret olduğunu söylüyor. Eğer bu görüş doğruysa, hücrelerin ve organizmaların belli bir amacı varmış gibi görünen hareketi nereden kaynaklanıyor? Fizikçi Peter M. Hoffmann bu ezeli sorunun yanıtını nano-ölçekte bulduğunu ileri sürüyor. Canlı organizmaların düzenli işleyişinin ardında bir "moleküler fırtına" esiyor. Hoffmann'a göre yaşam, atomların gelişigüzel hareketlerini düzenleyen moleküler makinelerin eseri. Küçücük elektrik motorları elektriksel gerilimi harekete dönüştürüyor, nano-fabrikalar başka moleküler makineler imal ediyor ve bu makineler de DNA ipliklerini buruyor, açıyor ve paketliyor. Tüm canlılar etkileşim halindeki bu nano-ölçekli makinelerden oluşuyor. Hoffmann kendi nano-teknoloji araştırmalarına dayanarak atomların karmaşık dünyasından yaşamın nasıl doğduğunu ortaya koyuyor. Size de yaşamın sırrını öğrenmek kalıyor!

"Canlıyı cansızdan ayıran nedir? Yaşam, cansız maddeden nasıl doğar? Bu sorular 2500 yıldır düşünürlerin aklını kurcalamaktadır. Hoffmann'ın kaleme aldığı *Yaşamın Kökeni* birkaç bin yıl boyunca süren tartışmaları özetledikten sonra modern bilimin konuyla ilgili araştırma ve bulgularını ortaya koyarak bu soruları yanıtlamaya çalışan muhteşem bir eser."

—The Scientist

"Maddenin, canlı organizmalarda bulunan cinsten karmaşık süreçleri kendiliğinden oluşturma potansiyeline sahip olduğunu artık biliyoruz. *Yaşamın Kökeni* işte bilimin bunu nasıl kavramaya başladığını anlatıyor. ... Kitabın en önemli mesajı, bir devrimin yaklaşmakta olduğu. Bu devrim bize maddenin neden yapıldığını söylemeyecek. Maddenin bizi oluşturmak üzere nasıl örgütlendiğini açıklayacak."

—Nature

internet satış:
saykitap.com
22,50 TL
ISBN 978-605-02-0505-3
9 786050 205053
SAY YAYINLARI

Popüler Bilim