JOHN GRIBBIN

DERİN BASİTLİK

Kaos, Karmaşa ve Yaşamın Ortaya Çıkışı



ALFA BİLİM

DR. JOHN GRIBBIN

Tam zamanlı bir bilim yazarı olmadan önce Cambridge Üniversitesinde astrofizik bölümünde eğitim görmüştür. *Nature* ve *New Scientist* için çalışmalar yapan Gribbin ayrıca *The Times*, *The Guardian* ve *The Independent*'a bilim dalında yazdığı makalelerle katkıda bulunmuştur. Ayrıca BBC Radyo 4 için de pek çok bilim dizisi hazırlamıştır. John Gribbin yazıları nedeniyle İngiltere ve Amerika'da pek çok ödül alınıştır. Şu anda Sussex Üniversitesi'nde Astronomi Bölümünde misafir araştırmacı olarak görev yapmaktadır. Bazı kitapları şunlardır: *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde* (Metis Yayınları, 2010), *Stephen Hawking: Bilim Dünyasında Bir Hayat* (İnkılâp Kitapevi, 2005), *Çoklu Evrenler* (Alfa Bilim Dizisi, 2012), *İlk Şempanze* (Alfa Bilim Dizisi, 2012). John Gribbin ayrıca *Innervisions* (*İçgörü*) dahil olmak üzere pek çok bilimkurgu eserinin de yazarıdır. Doğu Sussex'te yaşayan Gribbin evli ve iki çocuk babasıdır.

ARDA BARİŞTA

1985 yılında İstanbul'da doğdu. Kadıköy Anadolu Lisesinden 2004 yılında mezun oldu. Lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Tekstil Mühendisliğinde 2010 yılında tamamladıktan sonra İngiltere'de East Anglia Üniversitesinde lisans üstü ekonomi diploması programını bitirdi.

ALKIM KIZILTUĞ

1985 yılında Bilecik'te doğdu. 2004 yılında Kadıköy Anadolu Lisesinden mezun olduktan sonra İstanbul Bilgi Üniversitesinde Ekonomi ve Uluslararası Finans eğitimi aldı. 2 yıl süreyle Işık Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalıştı. Şu anda Londra, School of Oriental and African Studies bölümünde İktisadi Kalkınma alanında yüksek lisans öğrenimini sürdürmektedir.

Derin Basitlik
© 2013, ALFA Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.

Deep Simplicity
© 2004, John and Mary Gribibin

Kitabın Türkçe yayın hakları Akcalı Ajans aracılığıyla Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.'ne aittir. Tanıtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılacak kısa alıntılar dışında hiçbir yöntemle çoğaltılamaz.

Yayıncı ve Genel Yayın Yönetmeni M. Faruk Bayrak
Genel Müdür Vedat Bayrak
Yayın Yönetmeni Mustafa Küpüşoğlu
Dizi Editörü Kerem Cankoçak
Kapak Tasarımı Begüm Çiçekçi
Sayfa Tasarımı Mürüvet Durna

ISBN 978-605-106-778-0
1. Basım: Ekim 2013

Baskı ve Cilt
Melisa Matbaacılık
Çiftehavuzlar Yolu Acar Sanayi Sitesi No: 8 Bayrampaşa-İstanbul
Tel: 0(212) 674 97 23 Faks: 0(212) 674 97 29
Sertifika no: 12●88

Alfa Basım Yayım Dağıtım San. ve Tic. Ltd. Şti.
Ticarethane Sokak No: 53 34410 Cağaloğlu-İstanbul
Tel: 0(212) 511 53 03 (pbx) Faks: 0(212) 519 33 00
www.alfakitap.com - info@alfakitap.com
Sertifika no: 10905

JOHN GRIBBIN

DERİN BASİTLİK

Kaos, Karmaşa ve Yaşamın Ortaya Çıkışı

Çeviri
ARDA BARİŞTA
ALKIM KIZILTUĞ

ALFA | BİLİM

Jim Lovelock için

Bugün anladığımız haliyle yasalara göre, zaman ve mekân aralığı ne kadar küçük olursa olsun bir hesap makinesinin ne olup bittiğini hesap etmek için sonsuz sayıda mantıksal işlem yapması beni hep rahatsız etmiştir. Bütün bunlar nasıl bu kadar ufak bir mekânda olup bitebilir? Ufacık bir mekân ve zamanda ne olacağını anlamak neden sonsuz bir mantık gerektirir? Bu yüzden sık sık şu varsayımda bulunmuşumdur: En nihayetinde fizik hiçbir matematiksel ifadeyi gerektirmeyecek; evrenin tüm mekanizması su yüzüne çıkarılmış olacak ve yasalar, tüm görünür karmaşıklığıyla ortada duran bir dama tahtası gibi basit hale gelecek.

Richard Feynman
Fizik Yasaları Üzerine

Doğanın basitliği, bizim kavrayışımızın basitliğiyle ölçülemez. Doğa yalnızca doğurduğu sonuçlar itibariyle basittir; oysa işleyişi, çoğu zaman çok karmaşık olan çok sayıda olguyu az sayıda genel yasa aracılığıyla yaratmasına dayanır.

Pierre Laplace
1749–1827

İçindekiler

Teşekkür, 11
Giriş, 13

1. Kaostan Doğan Düzen 17
2. Kaosun Dönüşü 59
3. Düzenden Doğan Kaos 99
4. Kaosun Eşiğinde 139
5. Depremler, Yok Oluşlar ve Ortaya Çıkış 179
6. Yaşamın Gerçekleri 225
7. Ötedeki Yaşam 255

Dizin, 301

Teşekkür

Tüm kitaplarımda olduğu gibi burada da Mary Gribbin, sunulan fikirlerin bilim alanında herhangi bir birikime sahip olmayanlara da anlaşılır kılınmasında büyük rol oynadı. Penguin'deki editörümüzün ortak yazarlık konusundaki önyargısı olmasaydı, kendisinin adı kitabın kapağında yardımcı yazar olarak bile geçebilirdi.

Erişimimizi sağladıkları harikulade kütüphane ve hızlı internet hizmeti için Sussex Üniversitesine ve araştırmamıza ve ulaşım harcamalarımıza sağladıkları finansal destek için Alfred C. Munger Vakfı'na minnettarız.

Ayrıca yazar ve yayıncılar, yapıtlarının yeniden üretilmesine verdikleri izinden dolayı aşağıdakilere minnettardır:

Şekil 2.1 Edward Lorenz, *The Essence of Chaos*, University of Washington Press, 1993; Şekil 2.3, 3.1, 3.4, 3.5, 3.7, 3.8, 3.9 J. C. Sprott *http://sprott.physics.wisc.edu/fractals/chaos*; Şekil 2.2, 3.10 James Gleick, *Chaos*, Heinemann, 1988; Şekil 4.1, 5.7 Per Bak, *How Nature Works*, Oxford University Press, 1997; Şekil 4.2 James Murray, *Mathematical Biology*, Springer-Verlag, 1993; Şekil 5.2 J. Feder, *Fractals*, Plenum, 1988; Şekil 5.4 Philip Ball, *The Self-Made Tapestry*, Oxford University Press, 1999; Şekil 5.8, 5.9 Stuart Kaufmann, *At Home in the Universe*, Oxford University Press, 1995; Şekiller 7.2, 7.3 Jim Lovelock'un izniyle basılmıştır.

Telif hakkı sahiplerini korumak için gerekli tüm çaba sarf edilmiştir ve yazarla yayıncılar, dikkatlerine sunulan tüm hata ve eksiklikleri ileriki baskılarda düzeltmekten memnuniyet duyacaktır.

GİRİŞ

Karmaşanın Basitliği

Çevremizdeki dünya bize çok karmaşık görünür. Ebedi gözüken belli başlı basit doğruların mevcut olduğunu kabul etsek bile (elmanın daima havaya değil de yere düşeceği, güneşin batıdan değil de doğudan doğacağı gibi), hayatlarımız modern teknolojiye rağmen hâlâ ve dahası sık sık, ansızın ve çarpıcı değişiklikler üreten anlaşılması zor süreçlerin insafına kalmış durumdadır. Hava durumu tahminleri hâlâ bir bilim olduğu kadar bir sanattır da; depremler ve volkanik patlamalar öngörülemeyecek şekilde ve görünüşe göre rastlantısal biçimde meydana gelir. Hisse senedi piyasalarındaki dalgalanmalarsa belli bir örüntü içinde olmadan, ani iniş ve çıkışlara neden olur. Galileo'dan beri (yaklaşık olarak 17. yüzyıl başları) bilim büyük bir ilerleme kaydetti ve bu ilerlemeyi, söz konusu karmaşıklıkları göz ardı edip elmanın neden yere düştüğü, güneşin neden doğudan doğduğu gibi basit sorulara odaklanarak gerçekleştirdi. Doğrusu bu ilerleme o kadar muhteşemdi ki 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde tüm bu basit sorular cevaplandırılmış oldu. DNA'nın yapısının ve kendini nesilden nesile nasıl kopyaladığının keşfi, moleküler düzeyde yaşam ve evrimi anlaşılabilir kılarken genel görelilik teorisi ve kuantum mekaniği gibi kavramlar, sırasıyla büyük ve küçük ölçekte bütün

evreni açıklanabilir duruma getirdi. Yine de insan düzeyindeki karmaşa –yaşam düzeyinde– baki kaldı. Tüm soruların en ilgi çekici olanı –yaşamın, yaşamsızlıktan nasıl meydana gelmiş olabileceği sorusu– gizemini korumaya devam etti.

Evrenin geleneksel bilimsel araştırmalara karşı koyan en karmaşık öğeleri hiç şaşırtıcı olmayan biçimde bizim ölçeğimizde yer almaktadır. Aslında biz evrendeki en karmaşık şeyler olabiliriz. Nedeni şu: Atom gibi daha küçük ölçekteki yapılar karşılıklı ilişkilerinde görece daha basit davranırlar ve ancak çok sayıda atom ilgi çekici, anlaşılması zor durumlar içinde topluca ilişkiye geçtiğinde, tıpkı insanlar gibi yine ilgi çekici ve anlaşılması bir o kadar zor olaylar meydana getirir. Yine de bu süreç sonsuza kadar süremez; çünkü sürekli daha fazla atom bir araya geldiğinde toplam kütle öyle bir seviyeye ulaşır ki kütleçekimden ötürü o ilgi çekici yapının varlığı sona erer. Bir atom veya hatta su gibi basit bir molekül, içsel yapısının küçüklüğünden dolayı; bir gezegenin iç kısmı veya bir yıldızsa, kütleçekim herhangi bir yapının varlığını sona erdirdiğinden dolayı insandan çok daha basittir. İşte bu yüzden bilim, yıldızların içsel devinimi ve atomların davranışları ile ilgili olarak, insan davranışlarıyla ilgili anlatabildiklerinden çok daha fazla şey anlatabilir.

Bir kısım bilim insanı bu basit problemlere yanıt bulurken, bir kısmı da doğal olarak karmaşık sistemlerle ilgili yapbozlarla ilgilenmek durumundaydılar. Göreceğimiz gibi, bu tip yap-bozları çözmeye yönelik bireysel çabalar çok önceleri harcanmış olmasına karşın, karmaşık insan ölçeğiyle ilgili çalışmaların anlaşılabilir kılınması ancak 1960'lı yıllarda o günün standartlarına göre güçlü ve hızlı elektronik bilgisayarların geliştirilebilmesiyle mümkün olmuştur. Bu yeni gelişmeler de ilk olarak ancak 1980'li yılların sonunda yayınlanmış ve şimdi klâsikleşmiş olan Ilya Prigogine ile Isabelle Stengers'ın beraber yazdığı *Order out of Chaos [Kaostan Düzene]* ve daha sonra James Gleick'ın yazdığı *Chaos [Kaos]* adlı kitaplar ile geniş halk kitlelerine ulaşmıştır. Eski bilimin zaferi konusunda yazmakla meşgul olduğum o günlerde bazen kaos ve karmaşa fikirlerinin üstesinden gelmeye çalışsam da bunun başımı ağ-

rıttığını fark edip konuya mesafeli kalmayı tercih ettim. Gelgelelim yaklaşık on yıl boyunca kaos teorisinin gözden kaybolmasını veya birinin bu konuda açıklayıcı bir kitap yazmasını bekledikten ve kimsenin bu konuyu açık bir dille açıklamayacağına karar verdikten sonra bunu kendim yapmam gerektiğine karar verdim. Bu da konu hakkında bulabildiğim her şeyi okumam ve bütün hikâyeyi kendi kendime anlamam gerektiği anlamına geliyordu. Tam o esnada bunun çok da zor olmadığını keşfettim. Hem görelilik teorisinin hem de kuantum teorisinin, ilk zamanlarda konu hakkında uzman olmayan kişiler tarafından anlaşılmasının çok zor olduğu kabul ediliyordu. Oysaki her ikisi de sadece matematiğe itimat etme niyetinde olanlara bile gayet basit gelecek fikirlerle temellendirilmişti. Aynı durumun kaos ve karmaşa için de geçerli olması gerektiğini ve bunun şaşırtıcı olmayacağını düşünüyordum; ta ki ne anlama geldiğiyle ilgili mesajı net olarak aldığım ve çok iyi hatırladığım o ana kadar. Aldığım mesaj şuydu: Bazı sistemler (burada "sistem" ile kastedilen herhangi bir jargondur: saat sarkacı, Güneş Sistemi veya musluktan damlayan su gibi) kendi başlangıç koşullarına son derece duyarlıdır. Bu nedenle de başlangıçta verdiğiniz, sistemi harekete geçiren ilk dokunuşa ilişkin küçük farklılıklar, sonunda varacağınız yerle ilgili büyük farklılıklara yol açar. Bununla birlikte bir geri-bildirim durumu mevcuttur ve bu sayede sistem de kendi davranışını etkiler. Her şey gerçek olamayacak kadar güzel ve bir o kadar da basit gözüktüğünden, doğru yolda olup olmadığımı tanıdığım en zeki insan olan Jim Lovelock'a sordum. Tüm bu kaos ve karmaşa düşüncesinin temeli, sistemin kendi başlangıç koşullarına olan duyarlılığı ve geri-bildirim gibi iki basit düşünceden mi ibaretti? Evet, aldığım cevaba göre bütün hikâye buydu.

Bütün hikâyenin bundan ibaret olduğunu söylemek, biraz da, ışığın tüm gözlemciler için aynı hızda olduğunu söyleyerek özel görelilik teorisini açıklamaya benzer. Bu da aslında doğrudur, basittir ve anlaşılması kolaydır. Bununla beraber bu basit gerçek üzerine inşa edilmiş yapının karmaşıklığı sarsıcıdır ve tam olarak anlaşılabilmesi biraz matematik bilgisi gerektirir. Görelilik teorisinin özünü bilimle hiç haşır neşir olmayan

insanlara bile anlatabilme tecrübemden ve kaos ile karmaşayı temellendiren basit gerçekleri fark etmemden hareketle, aynısını bu konuda da yapabilmem konusunda cesaretlendim. Sonuca varmak tamamen kendi elinizdedir ve kaos ile karmaşayı en basit şekilde derinden başlayarak açıklamaya yönelik bir çabaya bağlıdır. Kavranması gereken; kaos ve karmaşanın, özü itibariyle Isaac Newton'un üç yüz yıldan daha fazla süre önce bulduğu o basit ve bilindik yasalara riayet ettiğidir. Bu yeni gelişmeler, bazılarının size inanmayı telkin ettiği gibi dört yüz yıllık bilimsel çabayı tersine çevirmekten ziyade, uzun sürede oluşturulmuş bu basit yasalara dayanan bilimsel anlayışın (önceden bildirilemese de) hava durumunu, hisse senedi fiyatlarını, depremleri ve hatta insanları izah edebildiğini gösterir. Sizi de ikna etmeyi umuyoruz ki, kaosun ve basit sistemlerde karmaşanın ortaya çıkışıyla ilgili çalışmalar, yaşamın kökenini açıklayabilmenin tam eşiğindedir. Gerek Murray Gell-Mann'a ithaf edilen şekilde gerekse Richard Feynman'ın kitabın kapağında öne çıkardığı gibi, çevremizdeki dünyanın –hatta yaşayan dünyanın– anlaşılması güç davranışı yalnızca "derinlerdeki basitlikten ortaya çıkan yüzeydeki karmaşa"dır.[1] İşte bu kitabın konusu tam da karmaşaya temel oluşturan o basitliktir.

John Gribbin,
Ocak 2003

[1] Örneğin Roger Lewin tarafından *Complexity* adlı kitapta alıntılanmıştır.

1

Kaostan Doğan Düzen

17. yüzyıldaki bilimsel devrimin öncesinde dünyaya, bugün bilim insanlarının terimi kullandığı bağlamdan biraz farklı, ama çoğu insanın günümüzde kullandığı anlamda bir "kaos" hükmediyormuş gibiydi. Dünyanın karışıklığını temellendirenin basit ve sistemli yasalar olabileceği kimsenin aklına gelmiyordu. Havanın ve rüzgârın davranışları, kıtlıkların meydana gelişi ve gezegenlerin yörüngeleri hakkında yapılan akıl yürütmelerin vardığı yer, en nihayetinde bütün bunların, Tanrı'nın veya tanrıların keyfine kalmış olduğuydu. Evrende düzenin nereden kaynaklandığı sorusuna cevap olarak, fiziksel nesnelerin bir harmoni ve düzen ihtiyacına her nerede olursa olsun tepki vermesi gösteriliyordu. Evrenin merkezinde yer aldığı düşünülen dünyanın etrafındaki gezegenlerin ve güneşin yörüngelerinin dairesel olduğu varsayılıyordu; çünkü daireler kusursuzdu. Nesneler yere düşüyordu; çünkü dünyanın merkezi evrendeki simetrinin ve aslında her şeyin merkezindeydi, dolayısıyla da en güçlü cazibe noktasıydı. Hatta MÖ 3. yüzyılda yaşamış olan Samoslu filozof Aristarkhos, dünyanın güneş etrafında döndüğünü söylediği sıralarda bile yörüngesinin dairesel olduğuna inanıyordu.

Bu örnekler antikçağ bilimi ile Galileo sonrası bilim arasındaki önemli farkları görmemizi sağlar. Antik Yunanlar harika matematikçilerdi, bilhassa da iyi geometricilerdi ve hareketsiz nesneler arasındaki ilişkileri gayet iyi kavramışlardı. Bu geometri bilgilerinin kökeni kendilerinden de önceki toplumlara dayanıyordu. Nitekim bilimin ilk olarak tarih öncesi çağlarda gelişmekte olan tarımsal toplumların yaşamsal deneyimlerinden –bina inşa etme, şehir kurma ve toplum karmaşıklaştıkça ortaya çıkan toprağı parsellere bölme gibi ihtiyaçlarından– ortaya çıktığını tahmin etmek çok da zor olmasa gerek. Yine de antikçağ bilim insanlarının, nesnelerin nasıl hareket ettiği ve hareket yasaları hakkında bir fikri yoktu. Sadece Zeno'nun "ok ile asla öldürülemeyen asker" gibi ünlü paradokslarından kafalarının ne kadar karıştığına bakmamız bile bunu anlamak için yeterlidir. Paradoksa göre, asker bulunduğu yerden kaçmaya başlarsa, askerin ilk durduğu yere ok eriştiği anda asker bir miktar mesafe kat etmiş olacaktır. Ok, bu ekstra mesafeyi de kat ettiği andaysa asker biraz daha uzaklaşmış olacak ve bu olay asker mesafe kat ettikçe devam edecektir. Diğer bir deyişle okun askeri vurması olası görülmemektedir.

Aristarkus gibilerinin varlığına rağmen, Nicolaus Kopernik 1543'te güneş-merkezli (fakat hâlâ dairesel temelli) evren modelini geliştirdikten sonra bile dünya-merkezli evren görüntüsü (ya da bilim insanlarının bugün kullandığı şekliyle "modeli") geçerli kaldı. Kopernik, *De Revolutionibus Orbium Coelestrum [Göksel Kürelerin Devinimleri Üzerine]* adlı kitabını aslında 1530'da tamamlamıştı ve kitabın içeriği daha kitap yayınlanmadan önce geniş bir biçimde ele alınıp tartışılmıştı. Martin Luther bunun üzerine 1539'da "Bu budala, astronomi bilimini tamamen ters yüz etmeye çalışıyor; ancak kutsal kitap der ki: Joshua dünyanın değil güneşin sabit durmasına hükmetmiştir." diyerek düşüncesini dile getirdi. Benzer eleştirilere cevaben Galileo ise: "İncil bize cennete gitmenin yolunu gösterir, göklerin nasıl hareket ettiğini göstermez." şeklinde sert bir yanıt verdi. Çağdaş Galileo olarak kabul edebileceğimiz Johannes Kepler, Tycho Brahe tarafından özenle derlenmiş gözlemlerden faydalanarak, Mars'ın güneş etrafında dönmek-

te olduğunun yanı sıra bu dönüşü eliptik bir yörünge üzerinde yaptığını da -öğrenmeye niyeti olanlara- izah etti ve Antik Yunanların çok sevdiği, "dairesel mükemmelliğin evreni yönettiği" sanrısını yerle bir etti.

1564 ile 1642 yılları arasında yaşamış olan Galileo, bilim ve bilim tarihi hakkında çok az fikir sahibi olan insanlarca bile bugün, gökyüzünü ilk kez teleskopla inceleyen, güneş- merkezli Kopernik modelini destekleyici kanıtları bulan ve Katolik Kilisesi'ni karşısına alıp sapkın ilan edildikten sonra bu baskı neticesinde kitaplarını su gibi sattıran adam olarak tanınır. Galileo'nun yaptıkları elbette bunlarla sınırlı değildir. Gözlem ve tecrübeleri sonucunda karşılaştırmalı teoriler (veya modeller) de dahil bilimsel araştırma yöntemlerini ortaya koyan ve "hareket"i bilimsel bir şekilde ciddi olarak ilk ele alan da aynı sapkın Galileo'dur.

1583 yılında Pisa'da tıp öğrencisiyken yaptığı keşif, Galileo'nun hareketle ilgili çalışmalarına öncü oldu. Katedraldeki sıkıcı bir vaaz esnasında şamdanın bir ileri bir geri salınmasını izlerken nabzıyla bu salınımların zamanını ölçtü. Bu ölçümlerinde lambanın, sallanırken çizdiği yayın uzun veya kısa olmasına bakmaksızın bir salınımı aynı sürede tamamladığını fark etti. Sonraki deneylerindeyse sarkacın salınımı tamamladığı sürenin, sarkacın ne kadar uzağa sallandığına değil, onun boyuna bağlı olduğunu gösterdi. Bu, saat sarkacının temeliydi; ama bir saat yapmasına gerek dahi kalmadan (ki ileriki yıllarda oğlunun yapacağı bir saati kendisi tasarlamıştı) daha sonra eğik düzlemden yuvarlanan topların davranışını incelerken de sarkacı kronometre olarak kullanmayı başardı. Bu deneyler Galileo'nun zekâsına ve bilimsel metoduna yönelik başka bir kavrayış geliştirmemizi sağladı. Galileo kütleçekimin hareket üzerindeki etkisini araştırmak için düşmekte olan nesneler üzerinde çalışmayı arzu etti; ama düşer haldeki toplar, onun izlemesine imkân vermeyecek kadar hızlı hareket ediyordu. Bu nedenle topları eğimli bir rampadan aşağı doğru yuvarladı ve topların kütleçekim etkisi altında yaptığı düşüşün daha yavaş ve daha zamana yayılmış olduğunu fark etti. Galileo bu deneyler aracılığıyla ivme kavramını geliştirdi. Bir

nesnenin sürati (veya hızı) onun belirli bir zaman içerisinde (diyelim ki bir saniyede) ne kadar uzağa hareket ettiğini ifade eder. Örneğin 9,8 m/s'lik sabit bir hız, o nesnenin her saniyede 9,8 metrelik bir mesafeyi kat ettiğini belirtir. Buna ilaveten Galileo, düşmekte olan nesnelerin (ya da yokuştan yuvarlanan topların) her bir saniyede hızlarını artırarak daha da çabuklaştığını keşfetti. Çarpıcı biçimde, deneyler hızın her saniyede aynı miktarda arttığını gösterdi. Bu "düzgün ivme"ydi ve 9,8 m/s/s'lik düzgün bir ivme (kaldığı yerden başlamak üzere); nesnenin hızının ilk saniyede 9,8 m/s'ye, ikinci saniyede 19,6 m/s'ye, üçüncü saniyede de 29,4 m/s'ye çıkacağı ve bunun böyle devam edeceği anlamına geliyordu. Bu belirli örneği bilerek seçtim; çünkü 9,8 m/s/s bize aslında dünya yüzeyinde düşen bir nesnenin kütleçekimden kaynaklanan ivmesini verir. Bunun da nedeni, zamanın iki kere hesaplanıyor oluşu, diğer bir deyişle ikinci dereceden bir etki oluşu, hızın ise birinci dereceden bir etki oluşudur. Kütleçekime bağlı bu ivme de sarkaçların, döngülerini tamamlama davranışlarını açıklar.

Galileo bir şey daha yaptı ki bu yaptığı, kitapta bahsettiğimiz hikâyenin temelindeki şeyin ta kendisiydi. Eğimli düzlemden aşağı doğru yuvarlanan topların, sürtünme sebebiyle ufak bir yavaşlamaya maruz kaldığının farkına vardı. Aslında ölçtüğü şey kusursuz bir düzgün ivme değildi; ancak topların, sürtünme etkisi olmasaydı ideal ve kaygan bir eğimde nasıl hareket edebileceğini esas gözlemlerinden ortaya çıkararak çağına göre büyük bir atılım gerçekleştirdi. Bu çeşit akıl yürütme, sonraki dört yüzyıl boyunca bilimsel araştırmanın da merkezinde yer alacaktı. Bilim insanları, özellikle de fizikçiler, dünyayı matematiksel yasalar bağlamında tanımlamaya çalıştıklarında, bu yasaları varsayımsal nesnelerin (mesela birbirlerinden sektiklerinde deforme olmayan ve sürtünmeye maruz kalmadan düzlem üzerinde yuvarlanmaya devam eden kusursuz katı kürelerin) davranışlarını açıklamak için formüle ettiler. Yine de Antik Yunan filozoflarının aksine, kendi kusursuzluk tasvirlerinin gerçek dünyayı temsil etmediğinin farkındalardı. Daha sonraları bu denklemlerin bilincinde olarak, gerçek dünyadaki kusurlulukları (örneğin hava direncinin

düşmekte olan nesneye etkisini) hesaba katmak için düzeltme katsayıları gibi terimleri literatüre kazandırmanın yolunu açtılar. Hava direnci, nasıl olup da bir çekiç ile bir tüyün dünyada farklı hızlarda; fakat –Apollo astronotlarının gösterdiği gibi– atmosfersiz olan ayda aynı hızlarda düştüğünü net bir şekilde ortaya koyar.

Tüm bunlar Galileo'nun, seleflerinin gerçek hayatta var olduğunu düşündükleri geometrik kusursuzluğun başka bir yönünü bilim sahnesinden indirmesine yaradı. Galileo'dan önce bir top, mermisini yatay düzlem üzerinde herhangi bir açıda ateşlediğinde, merminin namludan çıkışıyla önce düz bir çizgiyi, ardından bir süre için kusursuz bir dairenin yayını izleyeceği ve en sonunda dikey olarak yere düşeceği düşünülürdü. Hareket yalnızca düz çizgilerin ve dairelerin gözde canlandırılan kusursuzluğunu içeriyordu. Kütleçekimin sabit düşey bir ivme ürettiği keşfini top mermisine uygulayışı ve topun namludan çıkıştaki ilk hızını göz önüne alışı vasıtasıyla Galileo, topun hedefe varıncaya kadar izleyeceği esas yolun, bir parabolün parçası olan düzgün bir eğri olduğunu gösterdi. Aynı hesaplamalar, bir topun azami menzilinin, (atış şiddeti ve barut miktarını sabit kabul edersek) ancak top yatay düzleme 45 derecelik bir açıyla ateşlendiğinde elde edileceğini ortaya koydu. Bunlar, Galileo'nun yaşadığı çalkantılı dönem için büyük önem taşıyan pratik hususlardı ve askeri ilerlemeye sunduğu bu katkı onun ilk etapta itibar sağlamasına önayak oldu. Kusursuzluk hakkında filozoflar ve dinbilimciler ne derse desin, savaş meydanındaki orduların, dairesel hareketlerin cazibesiyle alakalı laf ebeliği yapmaya vakitleri yoktu. Askerlerin cephede tek bilmek isteyecekleri şey, namlularını doğrulttuklarında yaratabilecekleri maksimum etkinin nasıl sağlanacağıydı ve Galileo onlara bunu gösterdi.

Isaac Newton'un (1642-1727) evrensel kütleçekim kanunu, Kepler'in eliptik yörüngeler keşfi ve Galileo'nun hem ivme hem de 17. yüzyılın –belki de tüm zamanların– en büyük bilimsel keşfine yol veren bilimsel metodunun bir kombinasyonuydu. Newton'un muazzam çalışması *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (ya da kısa adıyla *Principia*) *[Doğal Felsefe-*

nin Matematiksel İlkeleri] 1684 ile 1687 yılları arasında yazıldı ve 1687'de yayınlandı. Bu kitabın yazılmasından 20 yıl önce, kendisi Trinity Kolejinde çalışma yoluna girmiş Cambridge mezunu müstakbel bir akademisyenken üniversitesi vebadan kapanınca annesinin Lincolnshire'daki evinde dört ay boyunca deyim yerindeyse hapis kalmıştı. Bu çalışma da tam o dönemde geliştirdiği fikirlere dayanıyordu. Tıpkı Galileo gibi Newton da teoriler ve modelleri gerçek dünyaya dair deney ve gözlemlerle karşılaştırmanın önemine vurgu yapmıştı. Bulduğu her fırsatta da fikirlerini sınamak adına ilgili deneyler gerçekleştirdi. Bu durum, bugünkü bilimsel metodun bir parçası olarak öyle bir yer etti ki sadece bilim insanları tarafından değil, herkes tarafından kanıksandı. Bunun yanında Newton, 17. yüzyılda bile çoğu filozofun, fiziksel dünyanın doğasıyla ilgili deneylere hiç bulaşmadan soyut yöntemlerle bu derece fikir yürütebilmesine alan açmış olmasından dolayı bile takdir edilesidir. Bu konuda klasikleşmiş bir örnek, farklı ağırlıktaki iki maddenin aynı yükseklikten bırakılması durumunda aynı anda yere düşüp düşmeyeceği tartışmasıydı. Farklı ağırlıkların 10 metre yükseklikten bırakıldıklarında aynı hızla düştüklerini deneylerle gösteren ve bu deneylerin sonuçlarını 1586 yılında yayınlayan Flaman mühendis Simon Stevin'dan sonra bile, on yıllar boyunca bu tartışma soyut düşünürler arasında sürüp gitti.[1]

Newton da, Galileo'nun basitleştirilmiş modeller (sürtünmesiz düzlemler gibi) kavrayışını kabul edip bu kavrayışı gerçek dünyanın belirli görünümlerini tanımlamak adına belirginleştirdi. Örneğin Newton kütleçekim hesaplamalarında Mars, ay ya da elma gibi nesnelerin kütlelerinin tek bir noktada yoğunlaştığını kabul etti. Bu çalışmalarda –söz konusu nesnenin dışında olmamız şartıyla– o nesnenin kütleçekimsel etkisini, bizim o noktaya, diğer bir deyişle nesnenin kütlesinin merkezine (nesne bir küreyse aynı zamanda geometrik merkezine) olan

[1] Bu arada Galileo'nun bizzat kendisinin, Pisa'daki eğik kuleden böyle bir deney gerçekleştirdiği yönünde kanıt yoktur. Bu efsanenin kökeni –taparcasına sevdiği Galileo'nun yaşlılıktan gözleri görmez olunca daha 17 yaşındayken onun kâtibi olan– Vincenzo Viviani tarafından yazılmış renkli biyografisine dayanır.

uzaklığımız üzerinden hesapladı. Bunun küresel nesneler için de geçerli olduğunuysa *Principia*'da kanıtladı. Aslında Newton dünyanın kusursuz bir küre olmadığını biliyordu (hatta dünyanın kendi ekseni etrafında dönüşü nedeniyle ekvatorda ne kadar şişkin olduğunun hesabını yapabiliyordu); ama dünyayı (güneşi, Mars'ı ve diğerlerini) ilk etapta küresel bir nesne olarak varsaymanın, akabinde de yörüngeleri buna göre hesaplamanın mantıklı olacağını hissetmişti. Sonraki hesaplamalarsa, yeterince uzak olmanız şartıyla düzgün olmayan nesnelerin bile –kütleçekimsel açıdan konuşursak– gerçekten de tüm kütleleri tek bir noktada yoğunlaşmışçasına davrandığını ortaya koydu. Yine de bu durum, hesaplamaları apaçık kılmak adına, gerçekler yerine idealize edilmiş kestirimlerin gerekli veya yardımcı olduğunda kullanılmasının önemini ortadan kaldırmıyordu.

Bu husus aslında göze çarptığından çok daha fazlasını barındırır. Newton *Principia*'da, küresel bir nesnenin kütleçekimsel etkisine, sanki nesnenin tüm kütlesi merkezinde yoğunlaşmış gibi yaklaşmanın doğru olduğunu geometrik tekniklerle kanıtladı. Bu geometrik tekniklerle Newton'un çağdaşları da haşır neşir olduğu gibi aynı tekniklerin Antik Yunanlar tarafından kavranması da gayet olasıydı. Şimdi biliyoruz ki Newton, *Principia*'yı yazmadan uzun bir süre önce şu an kalkülüs olarak adlandırılan matematiksel tekniği geliştirmişti (ya da keşfetmişti) ve bu ispat kalkülüs sayesinde çok kolayca anlaşılabilirdi. Kimi akademisyenlerse Newton'un gerçekten de kalkülüs sayesinde problemi çözdüğünden ve akabinde çağdaşlarının kendisini anlamasından emin olmak adına her şeyi klâsik terminolojiye çevirme zahmetinde bulunduğundan şüphe ederler. Durum gerçekten de böyle olsaydı Newton bir anlamda kendini ayağından vurmuş olurdu; çünkü yeni bulduğu matematiksel teknik konusunda sessiz kalarak, tekniği ondan bağımsız biçimde kendi de keşfetmiş olan (ve bu tekniğe bugün kullandığımız adını da veren) Alman Wilhelm Leibniz ile girebileceği şiddetli bir münakaşada haksız çıkmanın yolunu boşu boşuna açmış olurdu. Leibniz bu kavrama Newton'dan kısa bir süre sonra sahip olmuştu; ancak çalışmasını yayınlayarak

aklıselim davranmıştı ve bu da erken davranma konusundaki tartışmayı alevlendiriyordu (Aynı tartışmalar iki başkahramanın da ödün vermeye razı olmamasından ve Newton'un nispeten daha kaba, kendi yetenekleri konusunda kibirli ve kendine rakip olarak gördüklerine karşı kindar oluşundan kaynaklanıyordu). Aslında kimin erken keşfettiğiyle ilgili tartışmalar çok da önemli değildir. Burada esas konu kalkülüsün, problemleri matematiksel olarak kullanılabilen küçük bileşenlerine ayırıp bu sonuçların birbirine eklenmesiyle problemin geneline bir çözüm bulabilen bir teknik oluşudur. Örneğin küre, hem sonsuz sayıda hem de ölçülemeyecek kadar küçük madde parçalarına ayrılmış ve bu madde parçalarından birinin kütleçekimsel etkisini, küredeki konumu bağlamında tanımlayan bir denklem olarak kabul edilebilir. Tüm madde parçalarının birlikte devinim halinde oluşunun toplam etkisi daha sonra bu denklemde bir araya getirilebilir veya entegrali alınabilir.[2]

Bu tip bir süreç zamana da uyarlanabilir. Örneğin okun uçuşu, okun izlediği yol boyunca sonsuz sayıdaki noktanın herhangi birisindeki hareketinin tanımıyla ayrıştırılabilir. Aynı şey oktan kaçan askerin izleyeceği yol için de yapılabilir. İki diferansiyel denklem, entegralleri alındığında, ok ile adamın nerede karşılaşacağını bize kesin olarak ve hiçbir paradoksa yer bırakmaksızın söyleyecektir. Kalkülüs yaygın bir şekilde anlaşıldığında, Newton ve Leibniz'in zamanı ehlileştirmiş oldukları düşünüldü. Nasıl Antik Yunanlar statik nesneler arasındaki ilişkileri kesin olarak açıklayabildiyse, Newton ve Leibniz de zamanı ehlileştirerek, hareket eden nesnelerin davranışlarını aynı kesinlikle açıklamayı en azından prensipte mümkün kılmıştı. Tek bir yıldızın yörüngesini takip eden tek bir gezegenin veya tek bir oktan kaçmaya çalışan tek bir adamın düzeyinde kalkülüs kolaydır; ancak aynı temel kurallar geçerli olsa dahi

[2] Arşimet'in asırlardır kayıp olan el yazmalarından birinin tek kopyasının 20. yüzyılda tercüme edilmesi, bu büyük Yunan matematikçinin bu çeşit bir entegralin özünü iki bin yıl önce geliştirmiş olduğunu ortaya çıkardı. Newton ve Leibniz'in tabii ki bundan haberi yoktu; ancak bu durum aralarındaki didişmenin önemini de bambaşka bir boyuta taşır.

karışık sistemlerle uğraşırken kalkülüs de karışıklaşır. Bu tip bir sistemi tanımlamak için bir grup diferansiyel denklemi kâğıda dökmek gayet anlaşılır olsa da bu denklemlerin çözülmesi (veya entegrallerinin alınması) yeni problemler yaratır.

1680'lerde "gizlice" hangi matematiksel teknikleri kullanmış olursa olsun Newton, *Principia*'da çağdaşlarına benzer teknikler kullanarak gezegenlerin güneş etrafında eliptik yörüngeler izlemesi (teori ve gözlemin uyuşması) için kütleçekimin ters kare yasasına göre davranması gerektiğini kanıtlar. Daha açık söylemek gerekirse, birbirlerine belli mesafede bulunan (mesafeyle kastedilen her bir nesnenin kütle merkezinden ölçülen mesafedir) iki kütle arasındaki çekim kuvveti, o iki kütle değerinin birbiriyle çarpımının birbirlerine uzaklıklarının karesine bölümüyle doğru orantılıdır ki bu da ters kare yasasının ta kendisidir. Hesaplamaya giren orantının "sabit"i kütleçekim sabitidir ve kütleçekimin gücünü ifade eden bu sayı *G* ile gösterilir. Sembollerle ifade edecek olursak: $F=\frac{GMm}{r2}$

Bu durum Newton'un çağdaşlarına çok da sürpriz olmadı. Hepsi de Kraliyet Topluluğu'nun[3] üyeleri olan Robert Hooke, Edmond Halley ve Christopher Wren zaten ters kare yasasının eliptik yörüngeler üretebileceğinin farkındaydı. Newton'un başarısı *sadece* ters kare yasasının bunu yapabileceğini kanıtlamaktı ve dolayısıyla kütleçekim de bu yasaya tâbi *olmak zorundaydı*; ama Newton daha da ileri gitti. Onun çalışmaları bunun bir *evrensel yasa* olduğuna işaret ediyordu. Bu yasa sadece ağaçtan düşen elmaya, dünyanın etrafında dönen ay veya güneşin etrafında dönen gezegenler için geçerli olmakla kalacak bir yasa değildi ve yaz-kış, gece-gündüz, her zaman geçerliydi. Aynı zamanda bu yasa, evrenin herhangi bir yerinde herhangi bir tür maddenin, evrenin herhangi başka bir yerindeki herhangi başka tür bir maddeye uyguladığı çekim kuvveti için de geçerliydi. Evrenin, dünyamıza karışan kaprisli tanrılara yer olmayacak kadar düzenli bir yer gibi görünmesini sağlamasına ilaveten Newton başka üç yasayı daha bilimin

[3] Londra Royal Society [Kraliyet Topluluğu], farklı bilimsel alanlarda uzman kişilerden oluşan ve bilimsel araştırmalara kaynak sağlayan bir kurumdur –çn.

hizmetine sundu.[4] Bu yasalar, laboratuvarda, dünya genelinde veya Güneş Sistemi ve ötesinde hareket eden nesnelerin davranışlarını açıklayan hareket yasalarıydı ve daha da ötesinde her zaman her yerde geçerli olan evrensel yasalar olarak kabul edilmeliydi.

Bunlar üç yüz yıllık bilimi destekleyen hareket yasalarıydı; ama çok basit bir şekilde özetlenebiliyor ve dünyaya bilimsel açıdan bakmanın ilerleyişini gözler önüne seriyordu. Newton'un ilk yasası der ki: Her nesne ya hareketsiz kalır ya da bir kuvvetle karşılaşana kadar düz bir çizgi üzerinde hareket eder. "Hareketsiz kalma" hikâyesi ortak akla, diğer bir deyişle dünyada her gün karşılaştığımız durumlara uygundur. Nesneler, herhangi bir şey onları harekete geçirmediği sürece sabittir; ancak düz bir çizgi üzerinde sabit hareket hikâyesi sağduyuyla çelişebilir. Bu dünyada nesneleri harekete geçirdiğimizde ve kendi hallerine bıraktığımızda nesneler yere çarpar ve durur. Galileo'nun düşüncelerini bir adım öteye taşıyan Newton'un kavrayışı, o nesnelerin sadece dışsal bir kuvvet (kütleçekim) yüzünden yere düştükleri ve başka kuvvetler (sürtünme) yüzünden de durdukları yönündeydi. Newton bugün aşina olduğumuz, bir uzay aracının içindeki sıfır kütleçekim durumunda ve neredeyse sürtünmesiz ortamda, kendi bulduğu yasalarına tâbi nesneleri hiç görmeden dahi sürtünme ve diğer dış kuvvetler ihmal edildiğinde, dünyanın nasıl bir halde olabileceğini öngörmüştü.

İkinci yasasıysa bir nesnenin hareketinin, ona uygulanan kuvvetten ne kadar etkileneceğinden bahseder. Yasa der ki: Bir kütleye uygulanan kuvvet şu basit denklemle gösterilebilecek bir ivmeye sebep olur: $F=ma$ veya $a=\frac{F}{m}$. Güneşin etrafındaki bir gezegenin yörüngesini açıklayan veya tanımlayan da, bu yasa ve beraberinde kütleçekim yasasıdır. Birlikte bu iki yasa, Galileo'nun gözlemlediği ve tanımladığı düşmekte olan nes-

[4] Muhtemelen şu konuya parmak basmak yerinde olacaktır: Ancak 1609 yılında Johann Kepler, bir şeyin gezegenleri güneş etrafındaki yörüngelerinde tutuyor olması gerektiğini fark ettiğinde bu şeyi "Kutsal Ruhun Kuvveti" olarak tarif etti ve kimse de onu alaya almadı.

nelerin davranışını da açıklar. Dünyanın kütlesine *M* dersek o zaman dünya yüzeyindeki herhangi bir kütleye uygulanan kütleçekimsel kuvvet de kendi kütlesi *m* ile doğru orantılıdır ($F=\frac{GmM}{r2}$) ancak bu kuvvet nedeniyle oluşan ivme *F*'nin *m*'ye bölünmesiyle elde edilir. Bu nedenle, *m* kütlesi denklemden düşer ve kütleçekim etkisinde düşmekte olan her nesne, dünya yüzeyine yakınken aynı oranda ivmelenir. Ayın yüzeyinde veya başka herhangi bir yüzeyde de farklı oranda ivmelenirler; ancak birbirleriyle yine eşit bir ivmeye sahip olurlar.

Üçüncü yasanın söylediği, bir nesnenin üzerine uygulanan her kuvvetin kendisine eşit ve karşıt bir kuvvet ürettiğidir veya Newton'un diliyle konuşacak olursak, her etki [aksiyon] için eşit ve zıt bir tepki [reaksiyon] vardır. Bu durumun tipik bir örneği, bir tüfek içindeki mermiyi yollamak için etki uygulandığında tüfeği tutan keskin nişancının omzunda tepme şeklinde bir tepki oluşmasıdır. Masaya yumruğunuzu vurduğunuzda vuruş kuvvetinize eşit bir tepkiyi açık şekilde hissedersiniz. Diğer örnekler kadar açık gözükmese de güneş, kütleçekim vasıtasıyla bir gezegene kuvvet uyguladığında gezegen de sanki bu iki nesne gergin bir lastikle birbirlerine bağlıymışçasına eşit ve zıt bir kuvveti güneşe uygular. Ağaçtan düşen bir elma dahi dünyayı ufak bir miktar da olsa kendine doğru çeker. (Hem elmaya hem de dünyaya aynı kuvvet uygulanıyorsa bile bu çekiş; ivme, kuvvetle doğru ancak kütleyle ters orantılı olduğundan ve dünyanın kütlesi elmanınkinden çok daha büyük olduğundan çok ufak bir miktardadır.) Yörüngeler söz konusu olduğundaysa, sadece dünyanın yörüngesindeki ay değil, dünya ve ayın her ikisi de ortak kütle merkezleri etrafındaki bir yörüngededirler. Dünyanın kütlesi ayın kütlesinden çok daha fazla olduğundan beraberce yörüngesinde oldukları bu kütle merkezi dünya yüzeyinin bile altındadır.

Bu yasalar, uzayda hareket eden gezegenler ve onların uydularında olduğu gibi dünyada gerçekleşen olaylarda da aynı şekilde geçerlidir. Newton'un bu yasalarının eyleme dökülüşüne güzel bir yaklaşım olan bilardo masası örneğine ileride değineceğiz. Oysa şimdilik gezegenlerin davranışları üzerinde

yoğunlaşacağız; çünkü Newton'un dünyayı tanımlayışıyla ilgili sorunlar, kendisi bu düşünceleri geliştirir geliştirmez belirdi. Bu sorunlar yüzyıllar boyunca halı altına süpürüldü; ama "kaos" fikrinin çağdaş bilimsel anlamda ilk emareleri, yörüngesel mekanik mecrasında eninde sonunda ortaya çıkacaktı.

Sorun biraz da –kütleçekim yasası dahil– Newton'un yasalarının, iki nesnenin birbirleri etrafındaki yörüngelerini (ayın dünya çevresindeki veya dünyanın güneş çevresindeki yörüngesi gibi) tam olarak hesaplayabiliyor olmasına rağmen, aynı yasaların üç ya da daha fazla nesnenin ortak kütleçekimsel kuvvetlerinin hesaplanışına cevap veremiyor oluşundan kaynaklanıyordu (dünya, güneş ve ayın hep beraber uzay içinde hareket ediyor oluşu gibi). Bu durum "üç cisim problemi" olarak adlandırılmasına rağmen aslında, ikiden daha fazla sayıdaki tüm cisimler için bir sorun teşkil ediyordu. Dolayısıyla da daha genel olarak fizikçiler bu yüzden sorunu, *N* ikiden büyük herhangi bir sayı olmak kaydıyla, "*N* cisim problemi" olarak da tarif etmeyi tercih ettiler. Bu tip sistemleri tanımlayan denklemler kâğıda dökülebilir, ancak çözülemezler; ayrıca entegralleri alınamaz ve analitik çözümlerinin olmadığı, bir diğer deyişle matematiksel analiz tekniklerinin bunlarla uyumlu olmadığı söylenir. Öte yandan analitik yoldan çözülebilen denklemlerinse belirlenimci olduğu söylenir. Örneğin tek bir gezegenin yörüngesini tanımlayan denklem belirlenimcidir ve elips yapısında analitik çözümler barındırır. Şunun hakkını vermemiz gerekir ki üç cisim problemlerinin çözümlerinin olmayışı matematikçilerin insani yetersizliğinden daha çok, bu eksikliğin matematiğin yasalarının içine gömülü olmasından kaynaklanır.

Bununla birlikte, problemin etrafından dolaşma yolları da açıktır. Bu yollardan biri kestirim yöntemleridir. Gerçek anlamda birbirleri etrafındaki bir yörüngede bulunan üç cisim için, tekrar eden adımlar halinde hesaplamayı yapmak mümkündür. En başta, cisimlerden birinin hareketsiz olduğunu varsayıp diğer ikisinin kendi yörüngelerinde kısa bir mesafeyi nasıl kat ettiklerini hesaplarız. Daha sonraysa bu yeni pozisyonlardan başlayarak diğer bir cisim hareketsiz tutulurken

öteki ikisinin hareketini hesaplar ve bunu üçüncü cisim için de tekrar etmek yoluyla bir sonuç elde ederiz. Elde edeceğimiz sonuçlar mükemmel olmayacaktır; çünkü aslında bu üç cisim birlikte ve aynı anda hareket etmektedir. Yine de bu adım adım ilerleyen süreçteki zaman dilimini ne kadar kısaltırsak hesapladığımız yörüngeler gerçek yörüngelere o kadar yakın olacaktır. Güneş, kendi sistemindeki gezegenlerin hepsinden de o kadar büyüktür ki kütleçekimsel etkisi baskındır ve ilk yaklaşım olarak diğer gezegenlerin etkisi ihmal edilebilir. Böylece örneğin Mars'ın yörüngesi, diğer gezegenlerin var olmadığı varsayıldığında tam bir elips şeklinde hesaplanır. Mars'ın gerçek yörüngesi, bu gezegenin hareket denklemleri için bulunan analitik çözümlerden ufak farklılıklar gösterir; ancak bu farklılıklar, Jüpiter ve Satürn gibi büyük gezegenlerin etkisiyle kolaylıkla açıklanabilir. Benzer şekilde, ayın dünya etrafındaki yörüngesi de ilk etapta çok uzaklarda olan güneşin etkilerinin ihmal edilmesi ve sonrasında düzeltme olarak eklenmesi yoluyla hesaplanabilir. Tüm gezegenleri ve onların birbirileri üzerindeki etkilerini kapsayan, hepsi birbiri ardına gelen düzeltmelerin zahmetli bir hesaplamasına girişecekseniz (ki bugün hızlı bilgisayarlar vasıtasıyla bunu yapmak nispeten kolaydır), ilgilendiğiniz gezegen ya da uydunun gözlemlenen asıl yörüngesine yakın çok iyi bir kestirime varabilirsiniz. Ne var ki istediğiniz bir gezegenin veya uydunun, gözlemlenen asıl yörüngesinde sonsuza dek nasıl hareket edeceğini tahmin etmeye dair kesin bir matematiksel çözüme *asla* ulaşamazsınız. Her zaman bir hata payı olacaktır. Ayrıca, bu üç nesne aynı boyutta (aynı kütlede) ve birbirlerine kabaca eşit mesafedeyse üç cisim problemi tamamen çözümsüzdür. Analitik çözümlerin yokluğuyla ifade edilen, doğanın "kendisinin" zaman içinde yörüngelerin nasıl bir değişim (evrim) geçireceğini bilmemesidir. Güneş Sistemindeki gezegenler için dahi, yörüngelerinin her zaman bugün olduğu şekilde kalmaması ve gerçek anlamda tahmin edilemeyecek yollara sapması ihtimali mevcuttur.

Newton bunun farkındaydı; ama dini inançları Ortodoks Kilisesi'nin öğretileriyle tamamen uyuşmasa da oldukça dini bütün bir insandı. Buna ilaveten, gezegenler aşina oldukları yö-

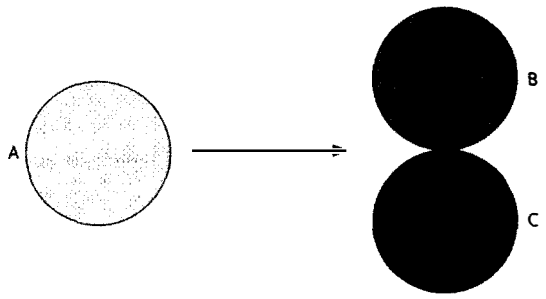
düngelerinden saparlarsa (sarmallar çizip güneşe yaklaşarak veya uzayın derinliklerine doğru uzaklaşarak) Tanrı'nın işleri tekrar yoluna sokmak için müdahale edebileceğini öne sürerek sorunu en azından kendi kafasında çözüme ulaştırmıştı. Ancak Newton'un bu yaklaşımı Leibniz'den ani bir karşılık gördü. Leibniz, Newton'un düzenli ve belirlenimci evreniyle basit bir saat arasındaki benzetmeyi alaya aldı. Newton'un Tanrı'sını, zamanı istikrarlı bir şekilde gösteren bir saat üretmekten aciz ve bu yüzden de saat bozulduğunda müdahale etmek zorunda kalan bir tasarımcı olarak tarif edip bu beceriksiz Tanrı'yı küçümsedi.

Bu yapbozun parçaları, 18. yüzyılın sonunda Fransız matematikçi Pierre Laplace (1749-1827) Güneş Sisteminin düzenini çözmüş gibi görünene kadar yerine oturtulamadı. Laplace önce Güneş Sisteminin en büyük iki gezegeni olan Jüpiter ve Satürn'ün yörüngelerini (daha önce bahsettiğimiz adım adım zahmetli işlemler vasıtasıyla) hesaplamaya ve güneşten sonraki en kuvvetli kütleçekimsel etkiyi hem birbirlerine hem de diğer küçük gezegenlere uygulamaya yoğunlaştı. Satürn'ün yörüngesi daralırken Jüpiter'inkinin ufak çapta genişlemekte olduğunu fark eden Laplace, Newton'un çalışmalarını da sekteye uğratan etkiyle karşı karşıya geldi. Sonrasındaysa Laplace bu değişimlerin, iki gezegenin birbirleri üzerindeki kütleçekimsel etkilerindeki ritmik bir değişimle ilintili olduğunu ve bu ritmik değişimlerin de güneşin etrafında Jüpiter beş tur atarken Satürn'ün iki tur atmasından kaynaklandığını keşfetti. Bu şu anlama geliyordu: Bu iki büyük gezegen her elli dokuz yılda bir birbirlerine en yakın konuma geliyordu. Laplace, Newton'un yasalarını ve iterasyon (adım adım yenileme) tekniğini kullanarak bunun tüm etkisinin, iki gezegenin yörüngelerinde her 929 yılda bir görünen değişiklerin tamamını tersine çevirmek olduğunu hesapladı. Bir diğer deyişle keşfettiği şey, Jüpiter'in yörüngesinin genişlediği ve Satürn'ünkinin daraldığı 929 yılı, Satürn'ün yörüngesinin genişleyip Jüpiter'inkinin daraldığı bir başka 929 yılın takip ettiğiydi. Laplace, Güneş Sisteminin düzenini çözdüğünü düşünerek Napolyon'a "Tanrı hipotezi"ne ihtiyaç kalmadığını ifade eden ünlü deyişini iletti:

> Önceleri evrensel kütleçekim yasaları vasıtasıyla açıklanamaz gibi gözüken bu iki gezegenin düzensizliği, artık bu yasalara en sağlam kanıtı oluşturmaktadır.

Laplace ileride göreceğimiz gibi sadece bir noktaya kadar haklıydı. Yine de, aynı tür bir kararlılık diğer gezegenler ve Güneş Sisteminin tamamı üzerinde de etkindi ve böylece 19. yüzyıldan itibaren Newton'un yasaları, Güneş Sistemi ve daha geniş anlamda evrenin, dışarıdan bir müdahaleye gerek kalmaksızın kusursuz bir saatin kararlılığı ve güvenirliğiyle işlediğini açıklamış oldu. Newton'un yasalarının başarısı, fizikçilerin birçok sorunu çözmesine yardımcı oldu ve üzerine modern bilimin inşa edildiği bir temel haline geldi. On dokuzuncu ve yirminci yüzyıllarda fizikçiler, bahsettiğimiz denklemlerin analitik çözümlerinin var olmadığı birçok durum bulunduğunun farkında olsalar da denklemler belirlenimci olduklarında bunları çözdüler; belirlenimci olmadıklarında da kestirim tekniğini kullandılar. Bu şekilde, yola getirilemeyen yap-bozlar konusunda da büyük ilerleme kaydettiler. En nihayetinde, zor yap-bozlar üzerine kafa yormadan önce kolay olanları çözmek çok daha doğaldır. Yine Newton'un denklemlerinin ötesindeki sorunlara (en azından bu gibi problemlerin mevcut olduğunu hatırlatmak adına) kafa yorup Newton'un yasalarının başka türde bir üç cisim problemi karşısında yetersiz kaldığına dikkat çeken çok az kişi vardı.

Bu problem, bilardo masasındaki üç topun çarpışmasıyla resmedilebilir. Hareketli bir top hareketsiz bir diğer topa çarparsa (veya her iki top da hareketli olsa dahi) Newton'un yasaları –topların kütlelerini, hızlarını biliyorsak ve sürtünmeyi görmezden gelmekle hesaba katmak arasında karar verdiysek– topların çarpışmadan sonra tam olarak nasıl davranacağını açıklamak için kullanılabilir. Bununla birlikte iki hareketsiz top birbirlerine temas edecek şekilde konumlandırılırsa ve hareketli olan top bu iki topa aynı anda –Şekil 1.1'deki gibi– tam ortalarından çarpacak olursa genel anlamda Newton'un yasaları, topların çarpışmadan sonra ayrı ayrı nasıl davranacağını



Şekil 1.1: *Tam elastik bir küre, birbirine dokunan iki adet tam elastik küreye aynı anda çarparsa bu üç kürenin nereye gideceğini tahmin etmek Newton'un yasalarıyla imkânsızdır.*

açığa kavuşturamaz.[5] Birbirine temas eden iki toptan herhangi biri diğerinden daha önce vuruşa maruz kalırsa, iki vuruş arasında saniyeden çok daha az bir süre farkı bulunsa bile, yasalar üç topun da nasıl davranacağını açıklamakta zorlanmaz.

Oysa bu tam eşzamanlı bir çarpışma için yetersiz kalır. Pratikte bu çarpışmanın gerçekten de eşzamanlı olma ihtimalinin çok düşük olduğu fikrinin savunulmasıyla bu zorluktan sıyrılmak mümkün olabilir. Oysaki basit bir sarkacın salınımından tutun, bir uzay aracının aya uçuşuna kadar her şeyin açıklamasında başarılı olan yasaların, halen basit durumların sonuçlarını tahmin edemiyor oluşu can sıkıcıdır.

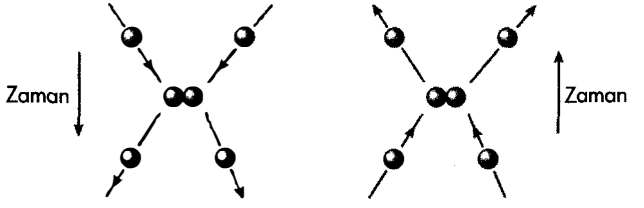
19. yüzyılda gerçek anlamda kimse bu konu üzerine eğilmedi. Herkes, hem Newton'un yasalarını hem de belirlenimci ve düzenli bir evrenin genel görünümünü ortaya çıkarmak için Galileo ve Newton'un geliştirdiği bilimsel yöntemleri uygulamakla meşguldü. Laplace halihazırdaki bu hususu, 1814'te yazdığı *Essai philosophique sur les probabilités [Olasılık Üzerine Felsefi Denemeler]* adlı eserinde şöyle özetliyordu:

> Öyle bir zekâ düşünün ki doğanın kapsadığı tüm varlıkların anlık durumlarının yanında doğayı kontrol

[5] Aynı durum, üç hareketli top aynı anda birbirleriyle çarpışırlarsa da geçerlidir; fakat bu problemi yola getirmek daha da zordur.

> eden bütün kuvvetlerin hakkında her an bilgi sahibi olsun. Bu zekâ tüm bu veriyi analize dökebilecek kadar güçlü olsaydı, evrendeki en büyük cisimlerin de en hafif atomların da hareketlerini tek bir denklemde bir araya getirebilirdi. Bu durumda belirsiz hiçbir şey kalmayacağından, onun gözünde geleceğin ve geçmişin bugünden farkı kalmazdı.

Bu zekânın çağımızdaki karşılığı bir süper-bilgisayar olurdu. Bu süper-bilgisayar evrendeki tüm parçacıkların konumlarını ve hızlarını bilen, ayrıca Newton'un yasaları ve doğadaki kuvvetleri açıklayan diğer yasaları –sadece her parçacığın gelecekteki konumunu tahmin etmek için değil, aynı zamanda nereden geldiklerinin tüm tarihçesini çözümlemek için de– hiç şüphesiz kullanabilirdi; çünkü Newton'un yasalarında zamanın yönünü açığa kavuşturan hiçbir şey yoktur. İki bilardo topunun çarpışmasını ve gezegenlerin yörüngeleri etrafındaki hareketini, kasetin geriye sarılmış haliyle gözümüzün önüne getirirsek yasaların ters yönde de işleyeceğini rahatlıkla anlayabiliriz. Yasalarda zaman okuna yer olmayışı Laplace ve diğer birçok bilim insanının, bu yasaların geçmişin ve geleceğin birbirine sıkı sıkıya kenetlendiği ve içinde özgür iradeye yer olmayan, tamamıyla belirlenimci bir dünya tarif ettiği öngörüsüne kapılmalarına neden oldu. Bu kişilerin hiçbirinin fark etmediği şuydu: Evrende herhangi bir yer ve zamanda üç parçacık arasında eşzamanlı bir çarpışma meydana gelirse bu temel sav çöker. Ben yine de bunun özgür iradenin varoluşunu kanıtlayıp kanıtlamadığını tartışmayı filozoflara bırakmayı uygun görüyorum.



Şekil 1.2 *Newton'un yasalarına göre bir çift nesne arasındaki çarpışmalar tam olarak tersinirdir. Yukarıdaki çizim, "zaman oku"nu ne tarafa çevirirsek çevirelim akla yatkındır.*

Zamanla ilgili aynı yap-boz 19. yüzyıl fiziğinin en büyük zaferlerinin birinden ortaya çıkmıştır. Bu zafer, ışığın ve elektromanyetik radyasyonun diğer çeşitlerine dair Scot James Clerk Maxwell (1831-1879) tarafından sağlanan kavrayıştır. Maxwell, elektromanyetik radyasyon tanımlamasını "mıknatıs ve elektrik yüklü nesneleri saran elektriksel ve manyetik alanlar" fikrinin babası Michael Faraday'in (1791-1867) çalışmaları üzerine inşa etmiştir. Böyle bir alan, derslikte bile gerçekleştirilecek basit bir deneyde görülebilir. Bahsedilen deneyde demir tozları, bir mıknatısın üstünde yatay vaziyette tutulan bir parça kâğıdın üstüne serpilir. Kâğıt nazikçe hareket ettirildiğinde demir tozları, mıknatısın iki manyetik kutbunu birleştirecek şekilde bir çizgi halinde dizilir ve bu tozlar manyetik alanla ilgili bu sözde kuvvet çizgilerini temsil etmiş olur. Işığın, mıknatısla ilgili bu kuvvet çizgilerinde ve zorlanan keman yayları gibi tıngırdayan elektrik yüklü parçacıklarında bir çeşit titreşimle üretilmiş olabileceği fikrini ilk dile getiren Faraday'dır. Faraday'ın matematiksel yetersizliği, bu fikri tamamen çalışan bir model haline getirememesine neden oldu ve bunu başarmak 1860'larda Maxwell'e düştü. Maxwell, o esnada bilgi sahibi olunan, ışığın davranışı dahil tüm elektriksel ve manyetik olguların şu anda Maxwell'in denklemleri olarak bilinen sadece dörtlü bir denklem kümesi aracılığıyla açıklanabileceğini gösterdi. Bu denklemlerin elektromanyetik alanların ve radyasyonun kavranışına katkısı, Newton'un yasalarının katı maddelerin kavranmasına yaptığı katkıyla eşdeğerdi. Aynı denklemler karmaşık durumlarda çok büyük zahmet gerektirse de prensipte her şeyi tanımladı ve elektromanyetik etkileşimin sonuçlarını hesaplamayı mümkün kıldı. Maxwell'in denklemleri dinamoların ve elektrik motorlarının nasıl çalıştığını, bir pusulanın neden kuzeyi gösterdiğini, birbirlerine belirli uzaklıkta bulunan (elektriğin de manyetiğin de kütleçekim gibi ters kare yasasına tâbi olduğu zaten biliniyordu) iki elektrik yükünün arasındaki kuvvetin ne miktarda olduğunu ve daha birçok şeyi açıkladı. Newton ve Maxwell, 19. yüzyılın ortalarında fizik bilimine dair bilinen her şeyle baş etmek için gereken matematiksel araç donanımını sağladılar. Maxwell'in

denklemleriyle ilgili en harika şeyse bu denklemlerin, ışığın bir tanımını kendiliğinden ortaya koyuyor olmasıydı. Denklemler, elektromanyetik olguları açıklamak için kurulmuş olsa da boşlukta ve belirli bir hızda yolculuk eden bir elektromanyetik dalganın çözümünü de kendi içlerinde barındırıyordu. Bu hız, ışığın bir elektromanyetik dalga şeklinde yolculuk ettiğine dair hiçbir şüphe bırakmayacak şekilde ışığın ölçülen (1860'larda çoktan kabaca belirlenmiş ve yakın zamanda kesin olarak ölçülecek olan) hızına tamı tamına karşılık geliyordu.

Maxwell'in denklemlerinde göze batan iki nokta vardı. Bunlardan birinin yakın zamana kadar sadece ufak bir tuhaflık olduğu düşünülürken, diğerinin fizik üzerinde ani ve derin bir etkisi olacaktı. Denklemlerin ilk göze batan özelliği şuydu: Denklemler; ışığın hızını, ölçen kişiye ya da makineye göre kaynağın nasıl hareket ettiğinden bağımsız olarak ölçüyor ve bu hızı bir "sabit" olarak veriyordu. Denklemlere göre bir feneri bana doğru tutarsanız, ikimiz de ışığın hızını sabit bir değer olan "*c*" olarak ölçebiliriz. İkimiz de sabit duruyorsak sorun yok; ama ben yüksek bir hızla bile sizin yanınızdan geçersem her ikimiz de fenerden gelen ışığın hızını hâlâ *c* olarak ölçeriz. Bu, ben size yaklaşırken de (sağduyunun etkisinde kalarak, *c* ile size göre benim hızımın toplamı şeklinde bir sonuç bulmam gerektiğini tahmin edebilirsiniz) sizden uzaklaşırken de geçerlidir (Sağduyuya göre size göre bağıl hızımın *c*'den çıkarılması gerekir). Einstein'ı 1905 yılında özel görelilik teorisini inşa etmeye iten ve bir on yıl sonra da genel görelilik teorisine geçiş yapmasına yönlendiren şey Maxwell'in denklemlerinden çıkan bu gereklilik, başka bir deyişle ışığın hızının tüm gözlemciler için –nasıl hareket ettiklerinden bağımsız olarak– sabit olması gerektiğidir. Buna rağmen bu kitapta, hareketli nesnelerin davranışı ve kütleçekimi Newton'un teorisinden daha kapsamlı açıkladığı, diğer bir deyişle "var olduğu" gerçeğini kabul etmek haricinde, görelilik teorisine değinilmeyecektir. Bu teori Newton fiziğini tersine çevirmek veya yok saymaktan ziyade Newton'un fikirlerini kapsar ve Newton'un teorisinin yetersiz olduğu durumlarda (özellikle çok yüksek hızlarda seyreden nesneler ve güçlü kütleçekimsel alanlarda bulunan

nesneler için) fiziksel dünyanın tanımını genişletir. Öte yandan örneğin dünyanın güneş etrafındaki hareketinin tanımı bağlamında Newton fiziği, yüz milyonda birlik bir ölçekte ve hatta insan ölçeğindeki olayların tanımlanmasında çok daha hassas ve hatasızdır.

Maxwell'in denklemlerinin de, özellikle atomların ve atomları oluşturan parçacıkların davranışı gibi çok küçük ölçekteki olayların tanımlanmasında kendi sınırları vardır. Bu noktada, hem elektromanyetik etkileşimlerin klâsik (Maxwell) tanımlanışı hem de parçacık etkileşimlerinin klâsik (Newton) tanımlanışı düzeltilmelidir ve kuantum fiziğinin yasaları devreye girmelidir. Kuantum etkileri (ya da en azından belirli bir kuantum etkisi) hikâyemize küçük bir rolde de olsa sonradan girecektir. Burada üzerinde durduğumuz neredeyse her şey, Newton mekaniği vasıtasıyla tanımlanabilir (ve belki de anlaşılabilir). Maxwell'in denklemleri bile sadece diğer tuhaf özelliği nedeniyle bahsedilmeye gerçekten değerdir.

Maxwell'in denklemlerinin bu diğer tuhaf yanı, bu denklemlerin de Newton'un denklemleri gibi zaman okunu barındırmıyor oluşudur. Konu, elektrik yüklü parçacıkların kendi manyetik alanlarındaki hareketleri olduğunda zamanın yönünü tersine çevirmeyi hayal etmek başımıza pek de iş açmaz. Yine her şey, Maxwell'in denklemlerinin ve Newton'un yasalarının tanımladığı fizik yasalarına uygun olarak cereyan edecektir. Ne var ki denklemlere göre, bir lambadan çıkan ışık dalgasının yayılması ile zamanın tersine çevrilmesi sonucu ışık dalgasının lambaya yakınsaması arasında bir fark yoktur. Bu olay bize ancak, bilardo masasında etrafa dağılmış topların, sürtünmeden kazanılan enerji kullanılarak tekrar düzgün bir üçgen haline gelmesi ve beyaz topa, hareket etmeye başladığı nokta olan istekanın ucuna yollayacak şekilde vurulması kadar tuhaf gelecektir. Yine de her iki ihtimal de ancak Newton'un ve Maxwell'in denklemlerinin birleştirildiği yasalarla mümkündür. Açıkça, zaman okuyla alakalı bir tuhaflık olduğu kesindir.

Zamanı, neden tercih ettiğimiz yönde gördüğümüz konusunda uzun zamandır hâkim olan standart açıklama da 19. yüzyıl fiziğinin bir diğer büyük zaferinden –ısı ve hareket

arasındaki ilişkinin tanımlanışından (termodinamikten)– doğmuştur. Bu, endüstrinin buharlı makinelerle sürdürüldüğü dönemde çok temel bir pratik önem teşkil ediyordu. Bizim bakış açımızdan termodinamik biliminin önemi, karmaşık denebilecek bir sistemde birlikte işleyen büyük miktarlardaki nesnelerin –özellikle de gaz parçacıklarının– davranışlarını tanımlamaları adına fizikçilere bir yöntem sağlamış olmasından gelir. Bu tanımlayış ortalama alma ve istatistik gerektirir; ancak büyük oranda dayandığı fikir, bir gazın, Newton'un yasalarına uygun biçimde etrafta gezinerek hem birbiriyle hem de içinde bulunduğu kabın duvarıyla çarpışan çok küçük sayısız parçacıktan (atom ve molekül) oluştuğudur. Bu –diğer bir deyişle gazların kinetik teorisi– fiziğin evrensel yasalarının, kaosun içinden nasıl bir düzen çıkardığının belirgin bir örneğini oluşturur. "Gaz" sözcüğü Flaman fizikçi Joannes (Jan) van Helmont tarafından Yunanca "kaos" sözcüğünden türetilmiştir. Bu terim (gaz) ilk olarak, van Helmont'un yazdığı ve ölümünden 4 yıl sonra oğlu Franciscus tarafından 1648'de basılan *Ortus Medicinae* adlı kitapta kullanılmıştır. "Bir kaos olarak gaz" (gazın bir kaosu temsil ettiği) fikrinin üzerinde üç yüz yıl boyunca mutabık kalındı. Bu mutabakat, İngiltere'de çalışan Maxwell ve Viyana'da çalışan çağdaşı Ludwig Boltzmann, önceleri spekülatif bir düşünceden ibaret olan kinetik teoriyi Newton'un yasalarını temel alan sağlam bir bilimsel dayanağa oturtana kadar devam etti. Örnek vermek gerekirse içinde bulunduğu kabın duvarlarına bir gazın uyguladığı basınç, gaz parçacıkları duvara çarpıp gazın hacmine geri döndükçe oluşan etki ve tepki (Newton'un üçüncü yasası) bağlamında açıklanıyordu. En basitinden, çok sayıda parçacığın söz konusu olmasından ve bu parçacıkların her saniye korkunç sayıda çarpışma meydana getirmesinden dolayı bu durum, sürekli bir basınç meydana getirir. Kibrit kutusu büyüklüğündeki bir kutudaki gazın içerdiği molekül sayısı kabaca 10^{24}'tür. (Bir diğer deyişle 10 ve yanında 23 tane 0.) Bu sayı o kadar büyüktür ki o kutunun, olduğundan 10 kat büyük veya küçük olması çok da önemli değildir. Atmosferde bulunan, deniz seviyesindeki ve 0 °C'deki tipik bir hava molekülü her saniyede yaklaşık dört milyon çar-

pışma gerçekleştirir.[6] Tüm bunlar havanın, sürekli bir ortam olduğu yanılgısını yaratır ve ayrıca –Laplace aklında ne canlandırmış olursa olsun– Newton'un yasalarına tâbi kalarak her bir molekülün izlediği yolun hesaplanması yoluyla gazın davranışını çözümleme çabasını beyhude kılar. Ortaya çıkan sorun N'nin 10^{24} olduğu bir N cisim problemidir. İstatistik de işte tam burada devreye girer.

Bir gazın (ya da diğer herhangi bir sistemin) içindeki çok sayıdaki atom ve molekülün davranışını tanımlamak için istatistiksel bir yol kullanılarak mekanik yasalarının uygulanışı, istatistiksel mekanik olarak bilinir duruma geldi. İstatistiksel mekaniğin gelişiminin arkasındaki itici güç, yalnızca deneylerde değil, gündelik yaşamda da (örneğin dışarıdan bir müdahale olmaksızın ısının daha sıcak bir nesneden daha soğuk olana doğru geçmesi) gözlemlenen termodinamik hususlarını bilimsel olarak tanımlama ihtiyacıydı. Isının sıcak nesneden soğuk olana geçmesi günlük dilde, sıcak nesnelerin soğuması olarak ifade edilir. Gerçekte, bir buz parçasını sıcak bir yüzeye yerleştirdiğimizde buz ısındıkça eriyecektir; ama sıvı haldeki suyun, dışarıya ısı verdiğinde kendiliğinden eski buz parçası haline geldiğini asla görmeyiz. Ne var ki bu olay Newton'a kalsa, başlı başına atomların ve moleküllerin hareketi ele alındığından, kendilerini üçgen halinde toplayan bilardo topları örneğindeki gibi mümkün gözükecekti. Bir başka deyişle aslında gündelik dünyada yerleşik bir zaman oku vardır. Bu yön de, termodinamik ve istatistiksel mekaniğin yasalarıyla sıkı sıkıya bağlıdır.

Bahsedilen yasalar nesnelerin gerçek dünyadaki davranışlarının gözlemlenmesiyle geliştirilmiştir. Bu gelişim süreci; elmanın ağaçtan asla yukarı değil her zaman aşağı düşüşünü gözlemleyişimizle başlayarak, bunu bir doğa yasası olarak adlandırmamızı, daha sonra nasıl ivmelendiklerini ve hangi hızla düştüklerini ölçmemizi, bu gözlemleri diğer nesnelere de yaymamızı (ay ve Mars gibi) ve eninde sonunda bu davranışı (söz konusu durumda kütleçekim yasasını) tanımlayan matematiksel denklemleri bulmamızı kapsar. Termodinamik için

6 10^{24}; 1 milyarın, 1 milyar ve 1 milyon ile çarpımına eşittir.

başlangıç noktası ısının katı maddeler içinde nasıl iletildiğinin araştırılmasıdır. Bu araştırmalar 1811'e doğru Fransa'da Joseph Fourier tarafından, çalışmalarından dolayı Fransız Bilimler Akademisi'nde ödüllendirildiği dönemde yürütüldü. Fourier ısının transferini tanımlayan basit bir matematiksel yasa keşfetti. Bu yasa der ki: Isının akışı sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır ve (tabii ki) ısı her zaman bir nesnenin en sıcak ucundan en soğuk ucuna doğru akar. Galileo'nun düşmekte olan nesnelerin ivmesi yasası kütleçekimsel teorinin gelişimi içinde ne kadar önemli bir yer tutuyorsa, bu basit yasa da termodinamiğin gelişimi içinde o kadar önemli bir yer tutar. Ayrıca kütleçekim yasası gibi Fourier'in bu yasası da evrenseldir ve aslında maddelerin neyden oluştuğuna bakmaksızın katılarla birlikte sıvı ve gazlar için de geçerlidir. Yine de (yerçekiminden kaynaklanan ivmenin aksine) farklı kimyasal maddelerin ilişkilerindeki orantı sabiti farklıdır. Isı metalde, tahtada olduğundan çok daha hızlı hareket eder ki çoğu insan bunu doğrudan karşılaştığı acılı tecrübeleri sayesinde öğrenmiştir.

Araştırma konusu olarak ısı akışına doğrudan katkısı bir yana, Fourier'in bu basit yasayı keşfi fiziksel dünyanın doğasına yönelik derin bir kavrayış sağladı. Bir insan ölçeğinde ele alınabilecek kadar büyük bir nesnenin (diğer adıyla makroskobik nesnelerin) bütün özelliklerini tahmin etmeye çalışmak atom ve molekül düzeyinde umutsuz bir çaba olurdu. Zira bütün parçacıklar arasındaki etkileşim o kadar karmaşıktır ki "doğrudan analiz"e karşı koyar ve (van Helmont'un da takdir ettiği biçimde) bu karmaşıklık bilindik anlamında "kaos"a yakın bir anlamı temsil eder. Oysa milyarlarca atom birbiriyle etkileşirken kaos her nasılsa yok olmakta veya düzgünleşmekteydi. Sonuçta da bu basit yasaya ilişkin bir düzen ortaya çıkmaktaydı. (Ya da "yeniden" ortaya çıkmaktaydı). Bunun nasıl gerçekleşebildiği hakkında hiç kimse fikir yürütemiyordu. Newton'un yasalarına uyan birkaç parçacığın –denklemleri çözmenin yolu, usandırıcı kestirim tekniklerinden geçmesine rağmen– basit bir açıklaması vardı. Birlikte çalışan çok büyük sayılardaki parçacıkların da basit bir şekilde açıklanabileceği biliniyordu; ancak bir düzeyden diğerine nasıl geçildiğini

kimse bilmiyordu. Zaten uygulamalı bir bilim[7] olarak termodinamik kendi çapında geliştirilebildiği sürece buharlı makine döneminde bunun hiçbir önemi yoktu.

Termodinamiğin gelişme süreciyse on dokuzuncu yüzyılın geri kalanının büyük bir kısmı boyunca, on yıllarca devam etti. Nihayetinde nesnelerin sıcaklık, basınç, yoğunluk ve hatta kimyasal davranışları gibi makroskobik özellikleri bağlamında nasıl davrandığına ve bu özelliklerin sisteme dışarıdan etki eden değişikliklere (basınç artışı, sıcaklık düşüşü gibi) nasıl cevap verdiğine dair açıklama sağlanmış oldu. Termodinamik bu gibi değişimleri başlı başına atom ve moleküller bağlamında tahmin etmeye çalışmasa da gerçekleşen olayların yorumlaması bu parçacıkların varlığını kabul ediyordu ve onların ortalama özelliklerinden istatistiksel yönde faydalanıyordu.

Fourier'in çalışmalarına önayak olan çalışmalar Kont Rumford tarafından 1790'lı yıllarda Bavyera'da yürütülmüştü. Zamanın İngiliz kolonisi olan Massachusettes'te dünyaya gelen Rumford (1753-1814) Bavyeralı 3. George ona Kont unvanını verene dek Benjamin Thompson adını taşıyordu. Rumford renkli çalışma hayatı boyunca askerlik, devlet adamlığı ve casusluk gibi çeşitli görevleri icra etmesinin yanı sıra tanınmış bir hayırseverdi ve bir dönem 3. George'un danışmanlığını da yürüttü. Bavyera'da ordu için yeni top üretimini denetlemeye koyulduğu günlerde Rumford ısının, bir "iş" biçimi olduğunu öne sürdü. Rumford'un topunun üretimi topun göbeğinin beygir gücüyle çalışan bir aletle delinmesi esasına dayanıyordu. Atlar çalıştıkça da delici alet ve onun deldiği boşluk gittikçe ısınıyordu. Bir buhar makinesi ısıyı nasıl işe çeviriyorsa, top delme işlemi de topun üretiminin yan ürünü olarak işi ısıya çevirmiş oluyordu.

Bütün bu fikirlerin meyve vermesi uzun zaman aldı. Kilit adımsa 1840'larda James Joule tarafından atıldı. Joule belirli miktarda suyun sıcaklığında belirli bir artış elde etmek için gerekli iş miktarını ölçmek adına yürüttüğü kusursuz deneylerle Rumford'un çalışmalarını bir adım öteye taşıdı. Deneylerinden biri kavramsal olarak gerçekten de olağanüstü basitti: Düşüş

---

[7] *Practical science* –çn.

hareketi yapan, ağırlığa bağlı bir sicim tarafından hareket verilen bir tür çark sayesinde kap içindeki su karıştırılmak suretiyle ısıtılıyordu. Joule'un bu çalışmasının yanı sıra Almanya'daki Hermann Helmholtz gibi çağdaşlarının çalışmaları, enerjinin korunumu fikrini doğurdu. Bu fikre göre enerji ne yok edilebilir ne de yoktan var edilebilirdi; sadece bir biçimden diğerine dönüştürülebilirdi. Örnek vermek gerekirse atın yediği saman, oksijenle birleşerek kaslara güç veren bir kimyasal yakıt niteliğine bürünür ve dolayısıyla at, yapması gereken iş için ihtiyacı olan enerjiyi yediği samandan sağlamış olur. Samanın içinde kimyasal biçimde depolanan enerji de temelde güneş ışığından kaynaklanmıştır vs. Enerjinin korunumu prensibi, kapalı bir sistemdeki toplam enerjinin sabit kalacağını ifade eden termodinamiğin birinci yasası olarak da ele alındı. Bu kapalı sistemle kastedilen, tıpkı sürtünmesiz düzlem gibi fizikçilerin idealleştirmelerinden biri olan ve dış dünyayla hiçbir şekilde etkileşim içinde olmayan bir sistemdir. İşin aslı, top delme örneğinde görüldüğü gibi hiçbir iş-enerji dönüşümü kusursuz değildir ve ısı her zaman bir yan ürün olarak harcanır. Sonuç olarak da devirden bir miktar enerji eksilmiş olur. Isının her zaman sıcaktan soğuğa doğru hareket etmesi sebebiyle (termodinamiğin ikinci yasası) eninde sonunda kapalı bir sistemde tüm enerji ısı haline gelecektir ve karşılaşacağımız şey, sıcaklık farklarının yavaşça ortadan kaybolduğu, ilginç hiçbir şeyin meydana gelmediği, donuk ve özelliksiz bir sistem olacaktır.

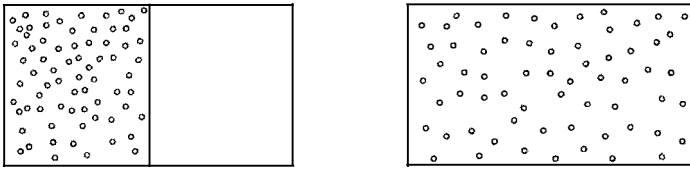
Termodinamiğin ikinci yasasının tarifi çok farklı yollarla yapılabilirdi; ancak bu yasaya yönelik ilk ayrıntılı açıklamayı 1852'de İngiliz fizikçi (ileride Lord Kelvin unvanını alacak olan) William Thomson getirdi. Thomson'un dikkat çekmek istediği önemli nokta "ısı kaybı" fikriydi. Bu fikre göre dünyamızın çalışma şekli, ısıyı işe (veya aynı anlama gelen harekete) çeviren harika bir makinenin çalışma şekliyle ifade edilebilecek olsa da bu süreçte mutlaka bir miktar ısı kaybı (aslında kayıp değil, ama evrenin tümüne yayılan ısının, sıcaklığı ufak bir miktarda artırışı) olması gerekiyordu. Bu, enerjinin korunumu prensibi ya da yasasının (termodinamiğin birinci yasasının) ötesine geçen bir husustur; çünkü günümüzde, dünyadaki (Vic-

toria[8] döneminde "dünya" ile anlatılmak istenen, şu anda bizim evren olarak adlandırdığımız şeydir) toplam enerji miktarı sabit olmasına rağmen kullanılabilir enerji miktarı sürekli azalmaktadır. Bu, fizikçilerin kapalı bir sistemdeki veya dünyadaki (veya tüm evrendeki) kullanılabilir enerji miktarını –hesaba katabilmek ve buna denklemlerinde yer verebilmek için– ölçmenin bir yolunu bulma ihtiyacında oldukları anlamına geliyordu. Bu ihtiyacın sonucu olarak da Rudolf Clausius entropi kavramını 1860'ların ortalarında Almanya'da bizlere sundu.

"Entropi" ile neyin ölçüldüğünü gözümüzün önüne getirebilmenin en basit yolu bir sistem içerisindeki düzenin miktarı bağlamında düşünmektir. Bu da en basitinden hareket ettirilebilen bir ara bölme tarafından ikiye bölünmüş bir kutu örneğini gözünüzün önüne getirmekle mümkün olabilir. Kutunun bir yarısı gazla doluyken diğer yarısı boştur; başka bir deyişle "boşluk"tur. Bu, belirli bir miktarda düzene veya yapıya sahip bir sistemdir; çünkü kabın iki yarısı arasında net bir ayrım vardır. Kabın içerisine rastlantısal biçimde mikroskobik bir robot sonda bırakırsak bu robot bize ara bölmenin hangi tarafında bulunduğunu, etrafının gaz mı yoksa boşlukla mı çevrili olduğunu test ederek söyleyebilir. Şimdi ara bölmenin kaldırıldığını düşünün. Günlük tecrübelerimizden hepimiz ne olacağını iyi biliyoruz. Gaz, kutunun içini eş dağılımlı bir biçimde doldurmak üzere yayılır. Şimdi sistem daha az düzenlidir (ya da daha düzensizdir); çünkü gaz yığınının içindeyken kutunun hangi yarısında olduğunuzu söylemeniz mümkün değildir. Gaz boşluğa doğru yayıldıkça sıcaklık da düşmüş olacaktır. Şimdi kutunun bir kenarından bir pistonla gazın tamamını iterek gazın başlangıçtaki haline geri dönmesini sağlayabiliriz. Bu sayede gaz tekrar sıkışarak eski sıcaklığına da yükselmiş olacaktır. Diğer bir yandan bunu gerçekleştirmek için pistonun bir "iş" yapması gereklidir ve sürtünme gibi etkenlerden dolayı bu işlemde ısı kaybı kaçınılmaz olacaktır. Kutu, diğer bir deyişle kapalı bir sistem eski haline döndürülmüş olmasına rağmen bu işin sonucunda evrende ısı kaybı meydana gelmiş ve bununla birlikte dünya da değişmiş olacaktır.

---

[8] Aleksandrina Victoria (1819-1901) 1837 yılından ölümüne dek Birleşik Krallık ve İrlanda'ya kraliçe olarak hükmetmiştir –çn.



Şekil 1.3 *Bir kutudaki atomlar gibi çok sayıda parçacığa baktığımızda zamanın yönü belirginleşir. Ara bölme kaldırıldığında gaz tüm kutuyu doldurmak üzere yayılır ve biz hangi durumun "önce" hangisinin "sonra" olduğunu zaman oku belirtilmeden dahi kolaylıkla söyleyebiliriz.*

Şimdi bu benzetmeyi biraz açalım. Siyah ve beyaz renklere boyanmış kareli bir satranç tahtası belirli bir miktarda düzen içerir. İki renk boya tam olarak aynı miktarda karıştırılıp tahta eş dağılımlı olarak griye boyanırsa daha düzensiz bir durum ortaya çıkar. Karıştırılan boya moleküllerini tekrar saf siyah ve saf beyaza ayrıştırabilecek hassaslıkta bir makineyi aklınıza getirebilirsiniz; ancak bu makine de yüzde yüz verimli olamayacağından işini yaparken evrenin tümüne ısı yayacaktır.

Entropi bir sistemdeki düzenin miktarını ölçmeye yarar. Düzensizlikteki artış entropinin artışına karşılık gelir. Dünyamızdan bildiğimiz üzere kapalı bir sistemin içindeki düzensizlik zaman geçtikçe artar. (Her şey gitgide tükenir.) Diğer bir deyişle entropideki kaçınılmaz artış zamanın yönünü, düzenli geçmişten düzensiz geleceğe doğrultulmuş bir oku ifade eder. Bu sürecin kaçınılmaz ve evrensel oluşu Victoria dönemi termodinamikçilerinin, evrenin sonu için yakıştırdıkları ve evrenin "ısıl ölüm"ü diye adlandırdıkları bir kara senaryo tasavvur etmelerine yol açtı.[9] Bu senaryoya göre tüm kullanılabilir enerji ısıya dönüşecek ve her şey maddelerin,

[9] Evrenin genişlemekte olduğu gerçeğinin 1920'lerin sonunda keşfedilmesi bu ve benzeri tahminleri, kütleçekimin temelde negatif enerjisi olduğunun 1940'larda farkına varılmasıysa Victoria döneminde bahsi geçen ısıl ölüm fikrini geçersiz kılmıştır. Paul Davies'in yazdığı *The Cosmic Blueprint* (Heinemann, 1987) ve benim yazmış olduğum *In the Beginning* (Penguin, 1994) adlı kitaplarda bu sarsıcı fikirler daha kapsamlı olarak tartışılmıştır.

eşit olarak dağılmış bir sıcaklıktaki yavan bir karışımından ibaret olacaktı.

Yaşam tabii ki düzensiz (veya en azından daha az düzenli) maddelerden düzen ve yapı inşa ederek bu sürece karşı geliyormuş gibi gözükür. Bir bitki –kendi yapısını inşa etmenin yanı sıra– karbondioksit, su ve diğer birkaç kimyasaldan faydalanarak güzel çiçekler yaratabilir; ancak bunu sadece dışarıdan edindiği bir enerji kaynağıyla, güneş yardımıyla yapabilir. Dünya, bilhassa da dünyadaki yaşam kapalı bir sistem değildir. Thomson, Clausius ve onların çağdaşları tarafından geliştirilen denklemlerle de gösterilebilir ki evrenin herhangi bir yerinde bir düzen kümesi varsa bu sadece başka bir yerde ortaya çıkmış bulunan *daha fazla* düzensizlik sayesinde gerçekleşebilmiştir. Buzdolabının dondurucu kısmında buz elde edebilmek için, buzdolabının çevresinde dolaştırmak suretiyle sıvı pompalayarak donmakta olan suyun "kaybettiği" ısıdan daha fazlasını üreten bir makineye ihtiyaç vardır. Buzdolabının içindeki kılcal borularda gerçekleşen soğuma süreciyle, ara bölmeyi kaldırdığımızda hayali kutumuzdaki gazın genleşmesi ve soğumasından oluşan süreç aslında birbirlerinin aynısıdır. Buzdolabının arkasında bulunan borularda gerçekleşen ısınma süreciyle, sıkıştırılan gazın eski hacmine dönerek ısınması süreci için de aynı şeyi söyleyebiliriz. Sonrasındaysa sıvı buzdolabının içerisindeki borulara akmadan önce, kaybedilen ısı havaya karışır. Bir buzdolabı kusursuz yalıtım sağlayan duvarlarla mühürlenmiş bir odada çalışır halde bırakılırsa oda soğumak yerine ısınır; çünkü buzdolabının içindeki soğuma işlemini gerçekleştiren makine "iş" yaptığından ısı açığa çıkar.

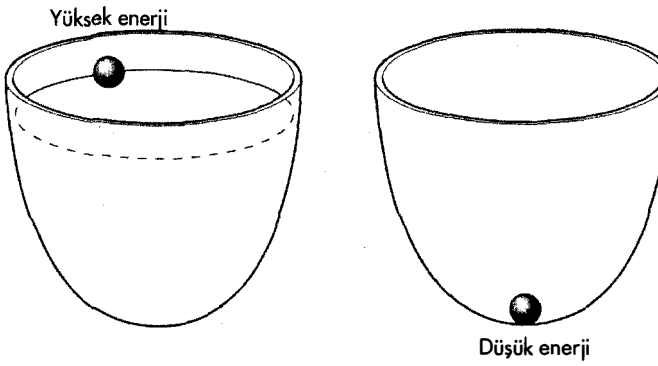
Makroskobik ölçekte, kesinlikle onaylanmış, denenmiş ve test edilmiş bilimsel yöntemlerle yürütülen deney ve gözlemler yoluyla elde edilen yasalara göre evren tersine döndürülemeyecek şekilde işler. Hiçbir şeyi eski haline geri döndüremeyiz. Oysaki termodinamik tersinmezlik, zaman okunun ve entropinin incelendiği gaz dolu ve bölmeli kutu örneğinde, makroskobik dünya ile mikroskobik dünya arasındaki karşıtlık oldukça berrak bir şekilde karşımıza çıkar. Newton'un yasalarına göre

gazı oluşturan atom ve moleküller düzeyinde (aslında mikroskobik-altı düzeyde ancak bu pek de önemsenmez) her çarpışma bilardo masasındaki topların çarpışmasına benzer. Ara bölmeyi kaldırarak gazın kutunun tamamını doldurduğunu ve ardından sihirli bir değneği sallayarak her atom ve molekülün hareketini geri sardığımızı düşünün. Tersine çevrilmiş hareket şablonunda bu olay Newton'un yasalarıyla çelişmiyordu. Diğer bir deyişle körü körüne bu yasalara uyan atomlar ve moleküller yollarını gerisin geriye takip ederek yol boyunca ne kadar çarpışma gerçekleştirdiklerine bakmaksızın kutudaki eski yerlerini alacaklardı. Gerçek dünyada, bir odanın içindeki bütün gazın aniden odanın diğer ucuna hareketlenmesi gibi davranışları içeren sistemler gözle görülemediği için büyük ve küçük ölçekler üzerinde etkin olan yasaların karşıtlığı on dokuzuncu yüzyılın sonlarında fizik için dev bir yap-boz teşkil ediyordu.

Bu yap-bozu çözmeye çalışanlar fiziksel dünya hakkında (bu kitapta görmeye başlamış olduğumuz gibi) yeni bir dil ve düşünce yöntemi geliştirmek zorundaydı. Burada üzerinde durduğumuz konunun merkezindeki kilit kavramlardan birisi çekici[10] fikridir. Bir kutunun içerisine önceden bahsettiğimiz gibi bir bölmenin kaydırılmasıyla veya kutunun bir duvarındaki delik vasıtasıyla gaz aktarıldığında karşımıza çıkacak son durum kutuya eşit olarak yayılan gazın bir denge haline gelmesi olacaktır. Bu hal sistemin sahip olabileceği maksimum entropiye karşılık gelir. Gaz kutunun içine hangi yöntemle aktarılmış olursa olsun bu son sonuç değişmez. Bir diğer deyişle gazın aktarıldığı deliğin hangi duvarda bulunduğunun veya o duvarın neresinde yer aldığının hiçbir önemi yoktur. Son denge hali (ki bu aynı zamanda minimum enerji miktarı haline denk gelir) noktasal çekici olarak adlandırılır; çünkü sistem sanki o hale çekiliyormuşçasına davranır ve eriştiğinde de sistemin o hale nasıl geldiğini kestirmenin bir yolu yoktur. (Son denge halinde geçmiş kayıtlı değildir.)

---

[10] *Attractor* –çn.

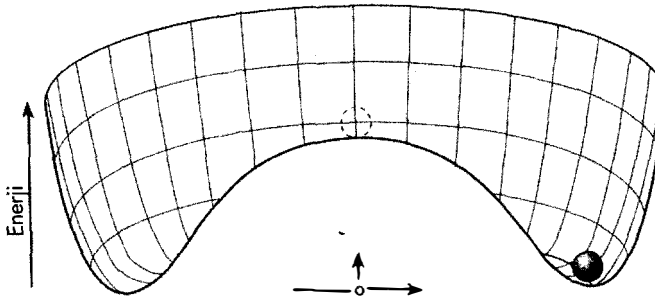


Şekil 1.4 *Kendi hallerine bırakıldıklarında ve dışarıdan enerji eklenmediğinde sistemler (kâse içindeki basit bir bilye kadar basit bir sistem bile) maksimum entropi ve minimum enerji haline inme eğilimindedir.*

Aşina olduğumuz başka sistemler de bu yöntemle açıklanabilir. Bir bilyeyi bir kâsenin içerisine yuvarladığımızda birkaç tur atan ve salınım yapan bilye son olarak kâsenin dibinde hareketsiz bir halde kalacaktır. Oysa bu kadar basit bir sistemde bile çekici o kadar da basit olmak durumunda değildir. Bu kez bilyeyi bir Meksika şapkasının kıvrık kenarından içeri yuvarlarsak bilye bu kenarın şapka çevresince oluşturduğu oluğun herhangi bir yerinde duracaktır. Oysa bu oluk boyunca bir çember oluşturacak biçimde konuşlanmış bütün noktalar –kimi zaman "Meksika şapkası çekicisi" olarak adlandırılan– çekicinin birer parçasıdır; çünkü hepsi aynı minimum enerji haline karşılık gelir. Kusursuz ve sürtünmesiz hayali bir sarkaç (diğer adıyla diğer ideal sarkaç) için ileri geri salınım hareketi bir çekicidir. Gerçek bir sarkaç söz konusu olduğundaysa sürtünme enerji kaybına yol açacağından salınım yavaşlayarak sona erecek ve sarkaç dikey pozisyonda asılı kalacaktır. Bu da bir çekici hali olarak addedilebilir. Sarkacın salınımını nasıl ayarlamış olursak olalım (soldan sağa, ileri geri veya çemberler çizecek şekilde) yeteri kadar beklediğimizde sarkaç oraya nasıl ulaştığına dair hiçbir ipucu vermeden yine aynı son haline kavuşacaktır. Termodinamik diliyle, bir sistem dengeye

ulaştığı anda başlangıç şartlarını unutmuş olacaktır. Önemli olan tek şey onun o anda nerede olduğudur.

Peki bir sistem ne zaman dengeye ulaşır? Gerçek dünyada kusursuz yalıtıcı diye bir şey yoktur; dolayısıyla gazla dolu kutumuz kaçınılmaz olarak dış dünyayla ısı alışverişi halinde olacaktır. Salınım yapan ve yavaşlayarak duran sarkaç, dengeye ulaşmakta olan bir sistem için daha iyi bir örnek gibi gözükse de bu durum sarkacın kendisiyle çarpışan hava molekülleriyle itişip kakışması anlamına gelir. Sarkacı vakumlu bir odaya koysak dahi sarkacın bir yere bağlı olması gereken ipiyle dış dünya arasındaki etkileşimin önüne geçilemez. İşin aslı şu ki yalıtılmış sistem diye bir şey yoktur (evrenin tümü hariç) ve hiçbir sistem kusursuz bir dengede değildir. Dengeye çok yaklaşılabilir –istediğimiz kadar bekleyerek daha da yaklaşabiliriz– ama gerçek anlamıyla kusursuz denge sağlanamaz.



Şekil 1.5 *Sistemlerin dengeye geldiği duruma "çekici" adı verilir.* Önceki *örnekteki çekici, kâsenin dibindeki tek bir noktadır; ancak yukarıdaki gösterimde olduğu gibi yayılı bir bölge de olabilir. Tepedeki bilye vadiye düşmek zorundadır; ama vadinin dibindeki her yer eşit oranda çekicidir.*

Bunu ileri sürerek dayanaksız bir bilgiçlik yapmadığımızı Ilya Prigogine ve Isabelle Stengers'ten bir örnek vererek gösterebiliriz.[11] Aralarındaki bağlantının nispeten dar bir boru tarafın-

[11] *Entre le temps et l'éternité*, Fayard, Paris, 1988. Kitabın yayıma hazırlandığı 2003 yılında Prigogine hayatını kaybetti.

dan sağlandığı iki kap, hidrojen sülfit ve hidrojen gazları karışımıyla doldurulup her şeyin eşit bir sıcaklıkta olacağı denge haline gelmesi beklendiğinde iki kapta da her iki gazın eş olarak dağıldığı bir karışım elde edilecektir. Oysa kaplardan birinin sıcaklığı diğerinden çok az da olsa daha sıcak tutulursa gaz karışımı ayrışmaya başlar ve sıcak kapta hafif olan hidrojen moleküllerinin sayısı, soğuk kaptaysa ağır hidrojen sülfit moleküllerinin sayısı artar. (Bu sadece hidrojen sülfit ve hidrojen molekülleri için değil, farklı molekül ağırlıklarına sahip herhangi iki gaz için de geçerli olacaktır). Böylelikle dengede meydana gelen çok ufak bir sapma kaostan düzen oluşmasına yol açmış olur. Bir enerji akışı, denge halinden uzaktayken doğru şartlar sağlanırsa kendiliğinden düzen yaratabilir. Bu bizim varlığımız açısından can alıcı bir kavrayıştır; çünkü düzenli yaratıklar olduğumuz tartışılmaz bir gerçektir ve evrenin başlangıçtaki halinin, şimdikinden çok daha az düzene sahip olduğuna dair elimizde kesin kanıtlar bulunmaktadır. Bilim insanları dengeye yakın bir sistemin genel olarak *entropi üretim oranının minimum düzeyde olduğu* bir hale çekileceğini eninde sonunda kavradılarsa da bu ancak yirminci yüzyılın ortalarına doğru mümkün oldu. Newton'un selefleri ilk olarak, onun hareket yasaları ve denklemleri vasıtasıyla rahatlıkla çözülebilecek basitlikte problemlere ağırlık vermişti. (Çünkü bunlar çözülmesi en kolay problemlerdi). Termodinamikçiler de aynı sebepten, ilk olarak dengedeki sistemler ile onları açıklamaya yarayacak denklem ve yasalara (termodinamiğin ikinci yasası gibi) yöneldiler. Söz konusu yaklaşım, olasılık bağlamında bir termodinamik anlayışının gelişmesine ve istatistiksel mekanik adı altında daha geniş bir faaliyet alanının ortaya çıkmasına yol açtı. Bu yeni çalışma alanı temel olarak gazların davranışını matematiksel yönden açıklama girişimlerinden kaynaklandı; çünkü gazlar az çok Newton'un yasalarına uygun olan molekül çarpışmaları içeren görece basit sistemlerdi. Dolayısıyla bu konuya ilişkin denklemleri çözebilmek adına bir umut vardı. Gazların kinetik teorisi (gaz bileşiminde yer alan moleküller bağlamında "kinetik" hareketi ifade eder), on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında, fikirleri birbir-

lerini destekleyen ve tamamlayan kişilerce geliştirildi. 1858'de "ortalama serbest yol" fikrini ortaya atan Clausius da bu süreçte rol oynayanlardandı. "Ortalama serbest yol" belirli bir sıcaklık ve basınçta, bir gaz molekülünün iki çarpışma arasında kat ettiği ortalama mesafe anlamına geliyordu. Clausius'un bir diğer fikrine göreyse moleküller "etkin yarıçap"a sahiplerdi ve bu sebeple küçük sert taşlar gibi davranıyorlardı. Maxwell, Clausis'in bu fikirlerini gözden geçirdi ve çarpışmada yer alan moleküllerin hızları arasındaki farklılıkları hesaba katarak bu fikirleri bir adım öteye taşıdı. Moleküllerin tüm bu özellikleri uygun biçimde kullanıldığında gazların gözlemlenen davranışlarının çoğunun görece basit denklemler vasıtasıyla nasıl açıklanabileceğini ortaya koyan da Maxwell oldu. Maxwell'in bu çalışması, her şeyi bir araya getiren ve istatistiksel mekaniğin ilk biçimini oluşturan Ludwig Boltzmann'a Almanya'da kaydettiği ilerlemelerde ilham kaynağı oldu. Josiah Willard Gibbs de Atlantik'in diğer yakasındaki ABD'de bilimin bu yeni dalının gelişimi adına büyük katkı sağladı.

Burada istatistiksel mekaniğin detaylarına inmemize gerek olmasa da size kilit bir kavram olan olasılık kavramına yönelik bir kavrayış sağlayabiliriz. Bu kavramı Boltzmann, daha önce de bahsi geçen kutudaki gaz modeliyle ilişkili çok basit bir örnek (zihinsel bir "model") kullanarak hayata geçirdi. Hatırlanacak olursa yap-boz, ortada Newton'un mekanik yasalarına aykırı bir durum bulunmamasına rağmen bütün gazın kutunun bir yarısına hareket etmeyişinden kaynaklanıyordu. Gazın bütün kutuya aşağı yukarı eşit olarak dağılmış olduğu hali özel kılan şey neydi? Ne olup bittiğine dair bir ipucu edinebilmek için ilk olarak kutunun içine yalnızca iki tane parçacık yerleştirdiğimizi düşünün. Parçacıklar birbirleriyle çarpışıp kutunun duvarlarından sekerek Newton'un yasalarıyla uyumlu bir biçimde dolanıp dururlar. Herhangi bir anda kutunun içerisinin bir görüntüsü alındığında parçacıklar nasıl konumlanmış olabilir? Kutunun her bir yarısında birer parçacığın bulunması iki şekilde mümkündür: A parçacığı soldayken B parçacığı sağdadır veya A parçacığı sağdayken B parçacığı soldadır. Her iki parçacığın da kutunun bir yarısında bulunma ihtimali de

kendi içinde ikiye ayrılır: Her iki parçacık da aynı anda kutunun ya sol ya da sağ yarısındadır.

Başka şekilde söyleyecek olursak, bu kıstasa göre kutunun içinde bulunabileceği sadece dört muhtemel durum vardır. Her durum eşit ölçüde muhtemelse (bunun aksini düşünmek için de hiçbir sebep yoktur), o halde parçacıkların solda bulunma ihtimali yüzde 25, sağda bulunma ihtimali yüzde 25 ve her iki yarıda da bulunma ihtimali yüzde 50'dir (2x%25). Bu oranlar göz önüne alındığında kutuya bir anlık baktığınızda dört olasılıktan herhangi birisiyle karşılaşmak sizi şaşırtmayacaktır.

Şimdi aynı işlemi dört parçacıkla gerçekleştirin. Kolay yoldan gitmek adına bu sefer yalnızca kutunun tek bir yarısını ele alın. Bir parçacığın bir yarıda, kalanların diğer yarıda bulunması için dört ihtimal vardır. (A, B, C ve D parçacıklarını sırayla tek başına bulunan parçacıklar olarak düşünürsek). Diğer yandan sol yarıda iki tane parçacığın bulunması altı ihtimalden oluşur (AB, AC, AD, BC, BD, CD). Şimdiden elimizdeki 4'e 6 oranıyla, her bir yarıda eşit sayıda parçacık görme ihtimalinizin, bir yarıda tek parçacık görme ihtimalinizden yüksek olduğu söylenebilir. (Sol yarıda hiçbir parçacık bulunmaması için de yalnızca tek bir ihtimal vardır.) Parçacık sayısı arttıkça oran da eşit dağılım ihtimalinin lehine önemli ölçüde yükseliş gösterir. Dilerseniz sayılarla haşır neşir olmaya devam edebilirsiniz; ama yalnızca sekiz parçacığın bulunduğu durumda tüm parçacıkların kutunun bir yarısında bulunması yalnızca bir ihtimalden ibaretken, parçacıkların iki yarıda eşit olarak dağılmış olması için yetmiş farklı ihtimalden vardır. Boltzmann'ın ileri sürdüğü şuydu: Gazların bir köşede toplaşmak yerine kutunun tamamını doldurmak için yayıldığını görürüz; çünkü bu, öbüründen ezici bir üstünlükle çok daha muhtemeldir. Yine de "öbürü" imkânsız değildir; sadece çok az olasıdır.

Burada çizmiş olduğumuz bu basit taslak, olasılık ile entropiyi ilişkilendiren bir matematiksel denklemin türevinin alınmasını içeren[12] Boltzmann'ın çalışmasının güç bela da olsa hakkını verir ve istatistiksel mekaniği yerinde bir sayı-

[12] Boltzmann bu denklemiyle (S=k.logP) öyle gurur duyuyordu ki denklemi mezar taşına yazdırdı.

sal temele dayandırır. Yine de umarım ne olup bittiği hakkında sizlere bir ipucu verebilmişizdir. Kilit nokta tabii ki gaz dolu küçük bir kutuda dahi gerçekleşen çarpışmalara kaç tane parçacığın müdahil olduğu ve sonuç olarak parçacıkların kutunun bir kenarında konumlanma ihtimallerinin bu derece az olduğudur. Tüm bu fikirler birbirini beslediğinden, ortaya çıkan söz konusu sayıların anlaşılmasının ilk olarak 1860'lara denk gelmesi de tesadüf değildir. Bu süreç bizi gerisin geriye İtalyan Amadeo Avogadro'nun çalışmasına götürür. Avogadro 1811'de, eşit hacimdeki gazların aynı sıcaklık ve basınçta eşit sayıda parçacık içerdiklerini öne sürdü. Belirli bir sıcaklık ve basınç altındaki herhangi bir gazın içereceği, birbirleriyle ve duvarla çarpışarak etrafta seken –şimdi molekül olarak adlandırdığımız– küçük ve sert topların her zaman aynı sayıda olması gerektiği fikrinin mucidi de oydu. Avogadro'ya göre bu gazın oksijen, karbondioksit ya da birkaç gazın karışımı olan soluduğumuz hava olmasının hiçbir önemi yoktu ve bu bağlamda önemli olan tek şey molekül sayısıydı.

Hiç şaşırtıcı olmayan biçimde, bu modelde ihtiyaç duyulan molekül sayısının neye göre değiştiğiyle ilgili kesin bir sonuca ulaşılması çok uzun zaman aldı. Aksine şaşırtıcı olan bunun başarılmasının daha da uzun zaman almamasıydı. Bu problemle başa çıkmanın aslında birçok yolu bulunsa da biz sadece bir tanesini açıklamakla yetineceğiz. Anlatacağımız model Avusturyalı Joseph Loschmidt tarafından 1860'ların ortasında geliştirilmiştir. Model sayesinde hesaplanabilen şey 0 °C'de ve standart atmosfer basıncındaki bir santimetreküp gazın barındırdığı –Loschmidt Sayısı olarak da bilinen– molekül sayısıdır. Loschmidt bir gazın içinde çok fazla miktarda boşluk olduğu ve her molekülün, etkin yarıçapı bağlamında belirlenen bir hacmi kapsadığı varsayımıyla işe koyuldu. Ortalama serbest yol, moleküllerin ortalama hızı vs bağlamında kinetik teoriden faydalanarak basınç hesaplanabilirdi. Gaz içinde birkaç sayıda büyük molekül bulunuyorsa uzun bir ortalama serbest yoldan, çok sayıda küçük molekül bulunuyorsa da daha kısa bir ortalama serbest yoldan bahsedilebilirdi. Modelin gerçek gaz içindeki basınç değişimiyle uyumlu olması için sadece bir

ortalama serbest yol değeri olması ve dolayısıyla tüm parçacıklar için tek bir değer bulunması gerekirdi. Loschmidt Sayısı için şimdilerde kullanılan değer $2{,}687 \times 10^{19}$'dur (10^{19} 1'in yanına 19 adet sıfır yerleştirilmesiyle elde edilen sayıdır) ve hatırlayacak olursak bu sayı, buz gibi soğuk bir günde deniz seviyesindeki havanın her santimetreküpünde bulunan molekül sayısına eşittir. Bu sayı aynı zamanda atomların ve moleküllerin ne kadar küçük oldukları hakkında da bir fikir verebilir. Şimdi gelin bunu bir perspektife yerleştirelim. Teleskopla gökyüzüne baktığımızda yaklaşık 300 milyar (300×10^9) adet parlak galaksinin yanı sıra galaksimiz Samanyolu'nun barındırdığı yaklaşık aynı sayıdaki parlak yıldızı görebiliriz. Bu iki sayıyı (yıldız ve galaksi sayılarını) birbirleriyle çarpınca elde edeceğimiz 90.000×10^{18} veya 9000×10^{19} sayısı da bize görünen evrenin tamamındaki parlak yıldız sayısını verecektir. Bunu da Loschmidt Sayısı'na bölersek yaklaşık 450 santimetreküp (yarım litreden daha az[13]) soğuk gazın neredeyse evrendeki yıldız sayısı kadar molekül taşıdığını hesaplamış oluruz. Bahsettiğimiz moleküller birbirlerine o kadar yakındır ki 460 m/s ortalama hızla meydana gelen bu çarpışmalar arasındaki ortalama serbest yol, bir metrenin 13 milyonda biri büyüklüğündedir. Böyle yüksek bir molekül sayısı konu olduğunda istatistik bize, kibrit kutusu büyüklüğünde bir kutu içindeki gazı, kutunun bir köşesinde toplu halde görmek için evrenin ömründen bile daha uzun bir süre beklememiz gerektiğini söyler.

Yine de bütün bunlar bize bu tecrübeyi yaşamamızın imkânsız olduğunu ima etmez. Boltzmann ise bunun imkânsız olduğunu kanıtlayan bir yol bulduğunu ve zaman okunu termodinamiğe bu şekilde yerleştireceğini düşünmüştü. Gel gör ki zaman Boltzmann'ı haksız çıkardı. Boltzmann, kutudaki bütün moleküllerin etkileşimlerini takip etmeyi denemedi. Onun yerine, tekil moleküllerin özelliklerinin düzgün istatistiksel ortalamasından yola çıkarak bir kutu gazın genel davranışını tanımlayan denklemler kurdu. Günlük dilde anlatacak olursak bu denklemler, gaz moleküllerinin özelliklerinin zaman içinde nasıl benzeşeceğini gözler önüne serdi. Örneğin gaz ilk olarak

[13] Bir litre 1000 santimetreküptür; 100 değil.

kutunun içine verildiğinde daha yüksek sıcaklıkta olan bazı moleküller diğerlerinden daha hızlı hareket edeceği için kutunun köşesindeki gaz, gazın geri kalanından daha yüksek bir sıcaklıkta olabilir. Hızlı hareket eden molekül yavaş hareket edenle çarpıştığındaysa iki molekülün hareket enerjisi (diğer bir deyişle kinetik enerjileri) birbirleri arasında paylaşılır ve iki molekül ortalanmış bir hızda hareket etmeye başlar. (Hızlı hareket eden bilardo topunun, kendi etrafında dönmezken sabit olanla çarpıştığını varsayınız.) Bu durumda daha sıcak moleküller soğuyacak ve soğuk olanlar ısınacaktır; ta ki kutudaki gazın tümü termodinamik dengede ve ortak bir sıcaklıkta buluşana kadar. 0 °C havadaki her molekül her bir saniyede dört milyonun biraz altında bir sayıda çarpışmaya maruz kaldığından söz konusu süreç de olabildiğince süratli ve etkin olacaktır. Boltzmann tarafından oluşturulan bu denklemler tek yönlü bir termodinamik dengeye yol açan rastlantısal ve doğal süreçleri işte tüm bu açıklığıyla ortaya koydu.

Peki neden düzenli bir dünyada yaşıyoruz? Boltzmann en sonunda herkesten daha ileri giderek bütün evrenin ısıl ölümünün zaten gerçekleşmiş olduğunu ve tümünün de bu şekilde bir dengede olması gerektiğini öne sürdü. O halde dünya gibi dengeden çok uzakta olan ve yaşamın üretilebildiği bir yer nasıl var olabiliyordu? Bu soruya cevabıysa şuydu: Teleskoplarımızla görüp araştırabildiğimiz tüm bu uzay alanı (ki 19. yüzyılın sonunda bu bölge Samanyolu Galaksisi dediğimiz yıldız adası kadardı) dengeden uzaktaki –evren ölçeğine göre– ufak, bölgesel bir dalgalanmayı temsil ediyor olmalıydı. Eninde sonunda varsayımsal gaz kutumuzda termodinamik süreçlerle denge sağlanacaktı; ancak soldan sağa giden moleküllerin sağdan sola gidenlerden sayıca fazla olduğu, diğer bir deyişle kutunun sağ yarısındaki yoğunluğun yükseldiği durumlar tesadüfî olarak ortaya çıkabilirdi. Boltzmann'a göre evrenin görünen kısmı da kendisinden çok daha büyük bir kozmos içinde bölgesel bir dalgalanmaya tâbiydi. Boltzmann bu konuya ilişkin olarak, *Lectures on Gas Theory* adlı eserinde şunları söyledi:[14]

[14] Kitabın orijinali 1896-1898'de iki cilt halinde ve Almancada yayım-

Önümüzde iki farklı resim mevcut: Ya tüm evrenin şu an çok az olası bir durumda bulunduğunu ya da bu az olası durumların süregeldiği "eon"ların[15] tüm evrenin ömrüne kıyasla çok ufak bir zaman dilimini teşkil ettiğini ve Sirius (en yakın yıldızlardan biri) ile aramızdaki mesafenin evrenin büyüklüğüne kıyasla çok kısa bir mesafe olduğunu varsayacağız. Tamamen termal bir dengede olan ve dolayısıyla ölü olan böyle bir evrende; galaksimiz gibi görece daha ufak olan bölgelere tek tük rastlamak mümkündür. Bu bölgeler ("dünya"lar da diyebiliriz) nispeten daha ufak bu zaman eonu esnemeleri içinde termal dengeden büyük bir sapma gösterir. Bu dünyalar içinde; onların, içinde bulundukları bu duruma (diğer deyişle entropiye) erişme olasılığı azaldığı sıklıkta artacaktır da. Uzayın içinde aşağı ve yukarı kavramları mevcut olmadığı gibi, evrenin tamamını göz önüne aldığımızda, zamanın iki yönü arasındaki ayrım ayırt edilemez. Ancak, nasıl biz dünya yüzeyinde belirli bir yerde "aşağı" kavramını, "dünyanın merkezine doğru" şeklinde tarif ediyorsak, kendini herhangi bir anda belirli bir zaman dilimi içinde bulan canlı bir organizma da zamanın "yön"ünü, "daha az olası bir durumdan daha olası bir duruma doğru" şeklinde tarif edebilir. Az olası durum "geçmiş", daha olası durum ise "gelecek"tir. Bu organizma aynı tanımdan yola çıkarak, evrenin geri kalanından yalıtılmış kendi küçük bölgesinin "başlangıçta" her zaman daha az olası bir durumda bulunduğunun farkına varacaktır. Bana öyle geliyor ki bu şekilde bir bakış; tüm evrenin belirli bir ilk durumdan son duruma doğru tek yönlü değişimine değinmeye ge-

---

landı. Tekrar basımı ise University of California Press, Berkeley tarafından 1964'te yapıldı.

[15] Eon sözcüğü; jeoloji, kozmoloji ve astronomide 1 milyar yıllık zaman dilimini tanımlamak için kullanıldığı gibi, çok uzun –hatta sonsuz– bir zaman dilimini tanımlamak için de kullanılır –çn.

rek kalmaksızın, ikinci yasanın geçerliliğini ve her bir dünyanın ısı ölümünü anlamamızı sağlayan tek yoldur.

Boltzmann'ın, uzayda tercihi bir yön elde etmek amacıyla kütleçekim örneğini kullanması talihsizlik olarak değerlendirilebilir. Zira bahsetmiş olduğumuz gibi; bu denli büyük ölçeklerde, entropiyle ilgili bazı geleneksel fikirlerin alaşağı edilmesine neden olan şey evrenin tümünde hâkim olan kütleçekim etkisinin ta kendisidir. Ayrıca Boltzmann'ın "tüm evrenin belirli bir ilk durumdan son duruma doğru tek yönlü değişimi" fikrini bir kenara itişi, bu fikrin günümüzde yaygınca evrenin Büyük Patlama modelinin yalın bir özeti olması bakımından ironiktir. Bilhassa Boltzmann'ın fikirleri miadını doldurmuş gibidir; çünkü artık –sadece 8,6 ışık yılı uzaklıktaki– Sirius'tan da ötesindeki evrenin özelliklerini inceleme kabiliyetine sahibiz ve bize görünür olan bu *milyar* ışık yıllık ölçekte, Boltzmann'ın değindiği eş dağılımlı ve ölü bir kozmosa rastlamamaktayız. Yine de Boltzmann'ın bu antika fikirlerine gülüp geçmek yanlış olur. Günümüzde, görünür tüm evrenin muazzam büyüklükte, hatta belki de sonsuz ve az çok eş dağılımlı bir kozmosta bulunan çok sayıda genişleyen baloncuktan yalnızca biri olduğunu ileri süren saygın kozmologlar bulunmaktadır. Boltzmann termodinamik ilkeleri temel almamış olsa bile bu fikirler bize, 8,6 ışık yılını çok büyük bir uzaklıkmış gibi değerlendirecek kadar dar görüşlü olmasını çok da alaya almamamız gerektiğini salık verir.

Ne var ki aslında tüm bunların konumuzla bir ilgisi yoktur; çünkü belirttiğimiz gibi, Boltzmann'ın savında –felsefî düşünüşünde olmasa da gazların davranışını açıklamak için kullandığı matematikte– bir hata vardır. Boltzmann birbirileriyle çarpışmak üzere olan moleküllerin birbirleri hakkında hiçbir şey bilmediğini varsayarak işe koyulmuştu. Birbirleri hakkında hiçbir şey bilmemekle kastettiği, bu moleküllerin hareketlerinin bağıntısız olmalarına ilaveten "moleküler kaos"a (burada kaos, bu kitapta daha sonra kullanılacak olan anlamda değil, günlük dildeki anlamında kullanılmıştır) tâbi olmalarıdır. Oy-

saki bu moleküller çarpışma esnasında enerji ve momentum alışverişi gerçekleştirdiklerinden, tabii ki moleküllerin izlediği yol birbirleriyle bağıntılıdır. Dolayısıyla Boltzmann en başından itibaren hesaplamalarının içine mikroskobik bir zaman okunu bilinçsizce de olsa yerleştirmişti ve şaşırtıcı olmayan biçimde hesaplamaların sonunda makroskobik bir zaman oku ortaya çıkmıştı. Oysa çarpışmaları açıklamak için kullanılan Newton'un yasalarında zaman okuna dair hiçbir emare yoktur ve bu yasalar bütün sistem tersine doğru işlese de aynı şekliyle geçerlidir. Tek bir yönde işleyip diğer bir yönde işlemeyen bir bağıntı olamaz. Başka bir deyişle Laplace'ın da katılacağı biçimde, gazın içindeki tüm moleküllerin herhangi bir andaki hızları ve pozisyonları gazın bütün geçmişini hafızalarında barındırır ve bu sayede anlarız ki her molekülün davranışı diğer bütün moleküllerin davranışlarıyla bağıntılıdır.

Boltzmann'ın savındaki hataya 1870'lerin ortasında (Boltzmann bu fikrini özgün biçimde formüle ettikten hemen sonra) Loschmidt tarafından parmak basılmıştı.[16] Bu husus Fransız bir matematikçi ve fizikçi olan Henri Poincaré (1854-1912) tarafından da ele alınarak bir üst düzeye çıkarıldı. Laplace'ın savından yola çıkarak mantıklı bir sonuca ulaşan Poincaré, sınırlı sayıda (yeter ki sonsuz sayıda olmasın) parçacık içeren bir gazınız varsa ve bu parçacıklar Newton'un hareket yasalarına harfiyen uyuyorsa o zaman yeteri kadar beklendiğinde gazı oluşturan parçacıkların kutu içindeki dağılımının –her parçacığın başlangıçtaki yön ve hızında hareket ettiği– orijinal durumuna döneceğini matematiğin tüm katılığını kullanarak kanıtladı. Burada benzetme olarak bir iskambil destesinin karıştırılmasını sunabiliriz. Başlangıç durumunuz ne olursa olsun (kartlar nasıl bir düzende olursa olsun), karıştırma işlemi ilkin başlangıç örüntüsünü bozacaktır; ancak kartları yeteri kadar uzun bir süre boyunca rastgele karıştırdığınızda eninde sonunda destenin başlangıç düzenini elde edersiniz. Başlangıç zamanımız da keyfî olduğundan iskambil destesi veya

[16] Boltzmann'ın, sonraları alelacele, dünyamızın ölü bir evrendeki bölgesel bir dalgalanma olduğu fikrini öne sürüşü bu tip eleştirilere maruz kalmış olmasından kaynaklanıyordu.

gaz dolu kutu her olası duruma tekrar tekrar gelecektir. Bu olasılıklar gazın hem kutunun bir kenarında toplandığı nadir durumları hem de kutunun içine eşit olarak yayıldığı, ancak parçacıkların ufak da olsa farklı dizilişte bulunduğu çok daha olası durumları içerir. Gazın kutu içinde bulunabileceği tüm bu durumlar Poincaré tekrarlama süresi veya Poincaré çevrim süresi adı verilen bir frekans içinde tekrar tekrar gerçekleşir. Entropi bir süre için yükselirse (Boltzmann'ın evreninin temelinde görüldüğü gibi) sonrasında gazı orijinal haline döndürmek üzere kaçınılmaz olarak tekrar düşmek zorundadır. Bu tekrarlı, çevrimsel davranış da geçmiş ve geleceğin eş bir durumu ifade ettiği Newton'un yasalarının katı uygulanışının doğrudan bir sonucudur.

Ne var ki ilgili zaman ölçekleri algımızın ötesindedir. *N* sayıda molekül içeren gaz dolu yalıtılmış bir kutu için Poincaré tekrarlar arasındaki zamanın 10^N saniye olduğunu ispatladı. Deniz seviyesi ve 0 °C'deki tek bir santimetreküplük havanın 10^{19} molekülden de fazlasını içerdiğini hatırlayınız. Bu büyüklükteki bir kap içerisindeki gazın çevrimini tamamlamasına şahit olmak için 10 üzeri 10^{19} saniye beklememiz gerekir. Büyük Patlama sonrasındaki evrenin ömrüyse sadece 10^{17} saniyedir. 17'yi 10^{19}'a bölerseniz kutudaki gazın –dış dünyadan yalıtıldığı sürece– termodinamik dengeden sapışına, evrenin bugüne kadarki ömrü süresince şahit olmamızın ne kadar ufak bir ihtimal olduğuyla ilgili fikir sahibi olabilirsiniz. Kutu sadece 52 (iskambil destesindeki kart sayısı kadar) parçacık içerseydi bile çevrim süresi 10^{52} saniye, başka bir deyişle evrenin ömrünün 10^{35} katı olacaktı.[17]

Tüm bunların ışığında termodinamik ve bilhassa da entropi artışı fikirleri istatistiksel fikirler haline geldi. İlgili parçacık sayısını veri kabul edersek gerçek dünyada entropinin artması kuvvetle muhtemeldir; ancak entropinin düşmesi de fizik yasalarına aykırı bir durum teşkil etmediğinden ihtimal dışı değildir. Bu, ilk kertede tüm fizikçilerin duymaya tahammül edebileceği bir durum değildi. Laplace'tan 75 yıl, Newton'un

[17] Çevrim süresinin evrenin süresine eşit olabilmesi için kutunun elbette ki sadece 17 parçacık içermesi gerekirdi.

Principia'yı yayımlamasındansa iki yüz yıl sonra fizikçiler şu gerçekle yüzleşmek zorundaydı: Dünya en basit anlamda belirlenimci değildi ve makroskobik sistemlerin davranışını hesaplamaya ve tanımlamaya çalışırken şans ve olasılığın göz önünde bulundurulması gerekiyordu. Yine de giderek bu fikre alışıldı ve sonrasında da bunun doğal ve hatta apaçık ortada olduğunu kabul eden nesiller yetiştirildi. Öte yandan bu fikirler ana akım bilimde kendine yer ettiği sırada Poincaré başka sorunlara eğilmekle meşguldü. Poincaré 1880'lerin sonunda Newton'un yasalarının işleyişiyle ilgili öyle şok edici bir hususu keşfetti ki bu bir insanın (İncil'e göre) yetmiş yıllık ömrünün büyük bir bölümü boyunca yasaların çıkarımlarıyla ilgili göz ardı edilmiş bir şeyler olduğu anlamını taşıyordu. Poincaré temelde Newton'un, gezegenlerin yörüngelerinin kararlığıyla ilgili endişelenmekte haklı olduğunu ve Laplace'ın da yap-bozu çözdüğünü düşünmekte hata ettiğini keşfetti. Ayrıca *N* cisim problemleri bir yana, üç cisim probleminin alışılageldik kestirim teknikleriyle çoğu zaman çözülemediğini ve –görünen o ki– Newton'un ilgili yasalarına ve mekaniğine tâbi olan basit yörüngelerin ve kütleçekimin, kaotik ve –tam anlamıyla– tahmin edilemez şekilde davranabileceğini ortaya koydu.

2

Kaosun Dönüşü

Üç cisim problemi gibi durumlara çözüm üretmek için kullanılan iterasyon tekniği bir sorun içerir. Bu teknik her zaman işe yaramaz ve işe yarayıp yaramayacağını tekniği kullanmaya başlamadan önce bilemezsiniz. İlgili diferansiyel denklemleri çözmek için kullanılan bu teknik (hatırlayınız ki bu denklemler analitik olarak çözülemez) birbirini takip eden kestirimleri barındırır. Bu kestirimin ilk adımında hesaplama sadece yaklaşık bir sonuç verirken ikinci adımda gerçeğe daha yakın bir kestirime ve şansınız yaver giderse üçüncü adımda daha da iyi bir kestirime ulaşırsınız. Bu kestirimler amaçladığınız şeye en yakın olacak şekle gelene kadar devam eder; ancak ilgilendiğiniz nesnelerin gerçek hayattaki davranışlarına tam olarak uyan cevaba asla ulaşamazsınız.

Aslında yaptığınız şey prensip olarak sonsuz uzunluktaki bir sayı serisini toplamaktan ibarettir. Matematikçiler güneşin yörüngesindeki gezegenler gibi nesnelerin davranışlarının araştırılmasıyla ilgili olup olmadıklarına bakmaksızın bu tür sonsuz serilerle ilgilenirler. Aynı zamanda, belirli bazı sayılara ulaşırken daha da iyi kestirimler yapmalarına olanak sağlayan pek çok sonsuz seri kullanırlar. Bir çemberin çevresinin çapına oranını ifade eden π sayısının yaklaşık değerine ulaşmak için

uygulanan yöntemlerden biri buna iyi bir örnektir. Şu serideki sayıları birbirine ekleyerek $\frac{\pi}{4}$ sayısına dilediğiniz kadar yakın bir sonuca bilfiil ulaşabilirsiniz:

$$1 - \tfrac{1}{3} + \tfrac{1}{5} - \tfrac{1}{7} \ldots$$

Bu kestirimde π için ulaştığımız ilk değer olan 4 (4 x 1) parlak bir sonuç değildir. İkinci kestirim olan 2,6666... ($4 \times \frac{2}{3}$) biraz daha iyi bir sonuç olmakla beraber "doğru" cevabın diğer tarafında yer alır. Üçüncü bir kestirim olan 3,46666... ise daha da yakın ve yine ilk tarafta bir sonuç verir vs. Bu bahsettiğimiz örnekte adım adım uyguladığımız kestirimler π'nin gerçek değerine her iki taraftan da yakınsayarak her defasında daha yakın birer sonuç verir. Yine de bu çok zahmetli bir uğraştır; çünkü virgülden sonraki yalnızca ilk beş haneyi bize doğru olarak veren π sayısının 3,1415937 değerine bile ancak bu dizideki ilk bir milyon terimin toplanmasıyla ulaşırız. Yeterince sabırlıysanız bu yolla π sayısını istediğiniz yakınlıkla (virgülden sonra istediğiniz haneye kadar) bulabilirsiniz.

Birçok sonsuz seriyse bu şekilde yakınsama göstermez. Örneğin tüm pozitif tam sayıları birbirine eklemek (1 + 2 + 3 + 4 + ...) sonsuza doğru ilerleyen ve sürekli daha büyük sayılara ulaşacağımız bir seriyi verir. Daha da şaşırtıcı bir biçimde, serideki her sayı bir öncekinden daha küçük olmasına rağmen tüm basit kesirleri ($1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \ldots$) toplamak da sonsuza giden bir seriyi verir. Öte yandan birbirine eklenen terimleri artırdıkça, $\frac{\pi}{4}$'ün kestiriminde olduğu gibi toplamları aşağı ve yukarı yönde zikzaklar çizen seriler de mevcuttur. Hatta bu serilerin toplamları belirli bir değere yakınsamak yerine belirli bir değerden giderek uzaklaşırlar. Şu seriyi ele alalım:

$1 - 2 + 3 - 4 + 5 \ldots$

Bu serideki peşi sıra iterasyonlar size 1, -1, 2, -2, 3, -3 gibi devam eden değerleri verecektir. Seriye ne kadar terim eklerseniz sıfır'ın her iki tarafındaki "kestirimler" sıfır'dan o kadar uzaklaşacaktır. Toplamları belirli herhangi bir yönde seyretmeyen seriler de mevcuttur. Belirli bir sonlu sayıya yakınsamayan tüm bu serilerin uzaksadığı söylenir ve sadece alelade sayılar kullanarak, değişkenler içeren seriler, diğer bir deyişle

kuvvet serileri olarak bilinen seriler elde edebilirsiniz. Bu serilere bir örnek şudur:

$$X - \frac{X^2}{2} + \frac{X^3}{3} - \frac{X^4}{4} \cdots$$

Yeterli matematiksel beceriye sahipseniz yukarıdaki seri, yörüngeler gibi şeylerin tanımlanması için size gerekli kapsamı sağlar. Bu tip sonsuz seriler, onları problem çözümünde kullanmaya yarayan teknikler geliştiren ve bu yolla kalkülüsü de geliştirmiş olan Isaac Newton'un çağından beri matematikte önemli bir yer kaplamıştır.

Bazı durumlarda bu tip bir serinin yakınsayacağını matematiksel olarak kanıtlamak serideki milyonlarca terimle hesap yapmadan dahi mümkündür. Kimi durumlarda da bir serinin uzaksayacağı ispat edilebilir. Yine de birçok durumda serinin uzaksayacağını ya da yakınsayacağını kanıtlamanın yolu yoktur. Bu tip durumlarda iyi huylu gibi gözüken bir yakınsayan seriyle çalışıyor olsanız dahi o ana kadar kaç terim eklemiş olursanız olun bir sonraki iterasyonun, beklenmedik bir sonucu karşımıza çıkarmayacağından emin olamazsınız. Bu da o ana kadar bulduğunuz cevabın belirgin biçimde –hatta belki de keskin bir biçimde– değişmesi anlamına gelir.

Bu durum on dokuzuncu yüzyılın ortasında, Güneş Sistemindeki gezegenlerin yörüngelerini hesaplamak için kestirim teknikleri kullanan astronomların içinde bulundukları durumun tıpatıp aynısıdır. Astronomlara göre bu kestirimler işe yarıyor ve tatmin edici sonuçlar veriyordu. Laplace'ın keşfetmiş olduğu gibi bu kestirimler güneşin etrafındaki iyi huylu yörüngeleri tarif ediyordu. Laplace'a göre bu yörüngeler gezegenlerin birbirleri üzerindeki kütleçekimsel etkileri hesaba katıldığında sadece düzenli ve öngörülebilir şekilde değişiyordu; ancak kimse bu hesaplamalarda kullanılan serilerin her zaman yakınsayacağını kanıtlayamamıştı. Astronomlar kestirimler işe yarıyor gibi gözüktüğü sürece bu konuda endişelenmiyordu; ama matematikçiler bunu üstesinden gelinmesi gereken bir husus olarak görüyordu. Kimse de Güneş Sisteminin kararlı olmadığını sahiden düşünmüyordu; yine de bunu ispatlamak hiç de fena olmazdı.

1850'lerde sayı teorisinin önde gelen uzmanlarından olan ve Göttingen Üniversitesinde çalışan Alman matematikçi Lejeune Dirichlet, sonsuz serilerin davranışlarına özel bir ilgi duyuyordu. Dirichlet 1858'de öğrencisi Leopold Kronecker'e, hiçbir analitik çözümü olmayan diferansiyel denklemler ailesini çözmek adına yeni bir teknik geliştirmiş olduğundan bahsetti. Gezegenlerin yörüngelerini tanımlayan denklemler (gök mekaniği denklemleri) için kullanılan sonsuz serilerin yakınsadığını ispat etmek için bu tekniği kullandığını çıtlatmış, ancak detaylardan söz etmemişti. Maalesef Dirichlet öne sürdüğü ispatın detaylarını kimseye anlatamadan 1859'un Mayıs ayında, 54 yaşında hayata gözlerini yumdu. Kronecker diğer matematikçilere Dirichlet'in öne sürdüğü şeyi anlattı; ama ne Kronecker ne de başkası söz konusu serilerin yakınsadığını ispatlayacak teknikleri kullanmayı başardı. Bununla beraber Dirichlet'in gördüğü büyük itibar ve tabii ki de özellikle gezegenlerin yörüngelerinin kararlı olduğuna herkesin inanmak isteyişi, onun başardığını öne sürmüş olduğu şeyi gerçekten de başardığından kimsenin şüphe etmemesine sebep oldu.

1880'lerin sonunda yine de Dirichlet'in yapmış olduğunu söylediği şeyi yeniden üretmeyi başaramamış olmaları matematikçilerin aklını kurcalamaya başlıyordu. Akabinde probleme topluca çözüm arama imkânı doğdu. İsveç Stockholm Üniversitesindeki matematikçiler, komite tarafından belirlenecek dört adet derinlikli sorudan birini yanıtlama iddiasındaki özgün bir matematiksel çalışma için büyük nakit ödüllü bir uluslararası yarışma düzenleyerek, kralları İkinci Oscar'ın yaklaşmakta olan altmışıncı doğum günü kutlamalarına katkıda bulunma fikrini ortaya attılar. Bu dört sorudan biri – Dirichlet'in öne sürüşünden ve kimsenin bu öne sürülen ispatı 30 yıl sonrasında bile yeniden inşa edemeyişinden esinlenerek– gezegen yörüngelerinin hesaplanmasında kullanılan kuvvet serisinin her zaman yakınsayacağına dair ispatı arıyordu. Yalın bir dille söylersek sorulmak istenen kısaca şuydu: Güneş Sistemi kararlı mıdır? Yarışmaya katılanlar arasında bu dikkate değer soruya cevap arayanlardan biri, bu süreçte dinamik sistemlerin davranışını açıklayan ve bugün hâlâ kullanılmakta olan teknikleri icat eden Henri Poincaré'ydi.

Konuya dair ilk önemli katkı olan faz uzayı fikri, on dokuzuncu yüzyılın başlarında İrlandalı matematikçi William Hamilton'un (1806-1865) yürüttüğü çalışmalar sonucunda sağlandı.[1] Hamilton, Newton'un fizik yasalarının parçacıkların iki özelliği –konumları ve momentumları (bir parçacığın kütlesiyle hızının çarpımı)– bağlamında tekrar formüle edilmesi adına bir yol buldu ve etkileşimleri kuvvet yerine momentumdaki değişimler bağlamında tanımladı. Momentum ve kuvvet fiziksel olarak tamamen eşdeğerdir;[2] ama bu yaklaşım, etkileşim halindeki parçacıklardan oluşan bir sistemin bütününün belirli kurallara göre yönetilen bir diferansiyel denklemler kümesi (Hamilton denklemi) bağlamında tanımlanması için bir yol sağladı. Bu tanımlamada konum ve momentum temel değişkenlerdir. Matematiksel olarak eş temeller üzerinde gözükseler de söz konusu miktarın zaman içinde nasıl değiştiğiyle ilgili bilgi içeren farklı denklem kümeleriyle tanımlanırlar. Tek bir parçacığın zaman içinde herhangi bir andaki hali, onun konumu ve momentumuyla ifade edilir.

Faz uzayı hikâyeye burada dahil olur. İki boyutlu bir grafik üzerinde herhangi bir noktanın konumu x ve y koordinatlarını temsil eden iki sayı vasıtasıyla tanımlanabilir. Bu x ve y koordinatları bize noktanın grafik üzerinde soldan sağa ve yukarıdan aşağıya hangi uzaklıkta olduklarını söyler. Benzer şekilde, bir parçacığın alelade üç boyutlu uzaydaki konumu, başka deyişle seçilmiş bir "sıfır" noktasından uzaklığını gösteren koordinatlar (üç adet sayı) aracılığıyla temsil edilir. Bu fikri bir parçacığın sahip olabileceği tüm olası momentumları temsil eden hayali bir uzaya taşımak hayal gücümüzü çok da zorlamaz. Momentum hız ile orantılı olduğundan ve hız da üç boyutlu bir özellik olduğundan (hız sadece sürati değil yönü de barındırır) bu hayali hız uzayındaki tek bir nokta, bir parçacığın hızının bileşenlerini üç yönde de temsil eder. Bu üç yön birbirleriyle dik açı oluşturacak şekilde seçilebilir. Sayılar x, y

---

1 "Faz" terimi tarihsel nedenlerle kullanılır ve bir ad olmasının dışında bugün bir önemi yoktur.

2 Matematiğe yatkın olanlar için; kuvvet, momentumun değişim oranı veya momentumun birinci türevidir.

ve *z* eksenlerinde okunabilir ve bu üç bileşen parçacığın toplam momentumunu gösterecek şekilde bir araya getirilebilir. İşte şimdi sadece bir matematikçinin atmayı akıl edebileceği adıma geldik. Neden bu iki bilgi kümesi –uzayı temsil eden üç boyut ile hareketi tanımlayan üç boyut– kombine edilmesin? Sonuç, bir parçacığın belirli bir andaki *hem* konumunun *hem de* momentumunun tek bir noktayla tanımlandığı hayali bir altı boyutlu uzaydır. İşte bu, tek bir parçacığın faz uzayıdır.

Neyse ki böyle bir faz uzayını gözünüzün önüne getirebiliyor olmak zorunda değilsiniz. Ne olup bittiğini tanımlayan bu denklemler görece dolambaçsız biçimde iki, üç ve çok daha fazla boyuta genişletilebilir. Denklemleri idare edebildiğiniz sürece ne olup bittiğini kafanızda canlandırmak zorunda değilsiniz. Bu duruma tek istisna, –işinize yarayacaksa– altı boyutlu faz uzayı içerisinden bir tür kesiti, onun üç boyutlu eş değeri bağlamında gözünüzün önüne getirmek olabilir. Şimdi daha da ayrıntıya gireceğimiz için bu özellikle önemlidir. Tek bir parçacığın halini tanımlamak için altı boyuta ihtiyacımız vardır. Boş bir kutuya yerleştirilen iki parçacığın birbirleriyle etkileşim halinde olduğu bir sistemi bahsettiğimiz şekilde tanımlamak için on iki boyutlu bir faz uzayına ihtiyacınız olacaktır. Oda sıcaklığındaki ve basınç altındaki bir kutu gazın hali de bir faz uzayındaki tek bir noktayla temsil edilebilir; ama şimdiki faz uzayı kutudaki parçacık sayısının altı katı kadar ve zaten epeyce yüksek olan bir önceki boyut sayısından çok daha fazla boyut içerecektir. Matematik bize prensip olarak çözülebileceğini söylese dahi böyle bir sistemin tanımında kullanılacak diferansiyel denklem sayısının büyüklüğü tabii ki bunun çözülmesini pratikte imkânsız kılar. Yine de klâsik istatistiksel mekanikte kullanılan istatistik, bir kutu gaz gibi bir sistemi bu bağlamda tanımlayan faz uzayında bulunan noktaların dağılımlarıyla ilgili olasılıkların analizini barındırır. Örneğin parçacıkların kutu içinde eş dağılımlı olduğu duruma karşılık gelen faz uzayında, tüm parçacıkların o kutunun bir ucunda olduğu hali temsil eden faz uzayındaki noktalardan çok daha fazla (ölçülebilir) nokta vardır. Ayrıca parçacıklar arasındaki momentumun eş dağılımlı olduğu hale karşılık

gelen noktaların sayısı da, parçacıkların yarısının çok hızlı, diğer yarısının da çok yavaş hareket ettiği bir momentum dağılımını temsil eden noktaların sayısından çok daha fazladır. Bu da ilk durumdaki tüm söz konusu noktaları barındıran faz uzayının çok daha büyük bir hacme ve ikinci durumda temsil edilen noktaları içeren faz uzayınınsa çok daha küçük bir hacme sahip olduğuna işaret eder.

Faz uzayını tepeler, dağlar, derin çukurlar ve yuvarlaklar çizen vadilerden oluşan bir manzara şeklinde gözünüzün önüne getirebilirsiniz. Genel bir ifadeyle Hamilton denklemi matematikçilerin çok sayıda diferansiyel denklemi çözme zahmetine katlanmadan bütün sistemin zaman içinde nasıl değiştiğini analiz etmesine olanak sağlar. Örneğin faz uzayı manzaramızın üzerine su döktüğümüzü düşündüğümüzde vadiler boyunca akacak suyun küçük girintiler içinde akmasının, büyük vadiler boyunca akmasına oranla daha az zaman alacağını görürüz. Su derin çukurlarda birikecek ve dağların tepelerinden aşağı doğru akacaktır. Hamilton denklemi bize gerçek sistemlerin faz uzayı "içerisinde" nasıl hareket ettiğini söyler ve çekimsenecekleri bölgeleri –derin vadileri ve çukurları– gösterir. Bu benzetmeyi, yağış ve buharlaşmanın faz uzayındaki karşılıklarını ele alarak genişletebiliriz. Diğer bir ifadeyle bu, parçacıkları "nehirler"den ayırarak kaçınılmaz olarak tekrar aşağı düşecekleri "dağların zirveleri"ne taşımaya karşılık gelecektir. *Tek* bir parçacığın faz uzayı içerisindeki güzergâhı zaman içinde bütün sistemin nasıl değiştiğini temsil eder ve parçacığın faz uzayının her bir kısmında harcadığı zaman miktarı faz uzayının o bölgesinin hacmiyle orantılıdır. Tıpkı kabarık bir nehrin içindeki tek bir su molekülünün kesin güzergâhını tahmin edemeyeceğimiz gibi, bu tek bir parçacığın hangi yöne gideceğini de kesin olarak söyleyemeyiz. Yine de tıpkı su molekülümüzün nehrin sınırları dahilinde kalmak haricinde fazla seçeneği olmaması gibi, bahsettiğimiz tek bir parçacığın da faz uzayı içerisinde izleyeceği belirli bir güzergâha sahip olması da kuvvetle muhtemeldir. Diğer bir deyişle parçacığın dağın zirvesine çıkıp geri dönmesi (az sayıda parçacığın izlediği ve ender rastlanan güzergâhları izlemesi) çok daha az olasıdır.

Çok basit bir örneğe geri dönelim. Salınım yapan kusursuz ve sürtünmesiz bir sarkaç için sadece bir tane ilgili gerçek uzay boyutu ve bir tane de hız uzayı vardır. Diğer bir deyişle faz uzayı iki boyutludur ve düz bir kâğıt parçası üzerine çizilebilir. Şimdi sayfa üzerinde konumu enlemesine ve hızı yukarıdan aşağıya göstermeye (yukarı yön sağa doğru, aşağı yönse sola doğru hareketi temsil edecek şekilde) çalışalım. Sarkacın ucundaki topuz sağa sola hareket ettikçe salınımın bir ucundaki hız sıfırken salınımın ortasında bu hız bir yönde maksimuma ulaşır; diğer uçtaysa tekrar sıfıra düşer ve bu süreç ters yönde işleyecek şekilde tekrarlanır. Bunu gerçek uzayda değişen konumla bir araya getirmek faz uzayında bir çember oluşturmaya karşılık gelir. Sürtünmeyi hesaba kattığımızdaysa salınım yapan sarkaç adım adım yavaşlayarak –diğer bir deyişle faz uzayında bir spiral izleyerek– duracaktır. Spiralin merkezindeki nokta da bu özel sistemin bir çekicisi olacaktır.

Faz uzayını dağlar, vadiler vs bağlamında düşünme fikri Poincaré'nin öncülük ettiği bir konu olan topolojinin çok basit bir versiyonudur. Poincaré topolojiyi faz uzayı bağlamında Güneş Sisteminin kararlı olduğunun ispatında kullandı ve esas itibariyle mekanik ve dinamikle ilişkili bir problemi, geometriyle ilişkili bir probleme dönüştürdü. Faz uzayındaki tek bir noktanın bir sistemin bütün haline tekabül ettiğini hatırlayalım. Kutudaki gaz örneğinde bu nokta (ya da bu noktaya karşılık gelen Hamilton denklemi) kutudaki her bir gaz parçacığının momentumunu ve konumunu benzersiz biçimde temsil eder. Faz uzayının içinden geçen bir güzergâhsa zaman ilerledikçe halin nasıl değiştiğini tanımlar. Oysa bu güzergâh daha önce üzerinden geçtiği bir noktaya tekrar uğrayacak olursa bu, sistemin tam olarak daha önceki bir haline döndüğü anlamına gelir. Öyleyse güzergâh Newton mekaniğinin yasalarına göre faz uzayı içinden geçen yolu tekrar izlemeli, diğer bir deyişle bir önceki güzergâhın aynısını takip etmelidir. Gaz dolu kutular için Poincaré'nin çevrimler ve yineleme fikrinin temelinde bu gereklilik yatar. Yörüngeler içinse şu söylenebilir: Faz uzayı içerisinden geçen ve örneğin üç cismin olası hallerini temsil eden bir güzergâh faz uzayında daha önce üzerinden geçtiği

bir noktaya geri döndüğünde yörüngeler –ne kadar karışık gözükürse gözüksün– periyodik olarak kendilerini tekrar etmek zorundadır. Söz konusu cisimler de aniden birbirlerinden uzaklaşmayacak veya birbirleriyle çarpışmayacaktır. Faz uzayı içerisinde, güzergâh daha önce üzerinden geçtiği bir noktanın çok yakınından geçtiğinde sistemin sonraki davranışının bir önceki davranışına çok yakın olacağını tahmin edebilirsiniz. Yine de daha sonra göreceğimiz gibi hiçbir şeye kesin gözüyle bakmasanız iyi olur.

Yarışmaya giriş sürecinde, Poincaré tüm Güneş Sisteminin davranışını topolojik olarak tanımlamaya kalkışmadı. Bunun yerine –"kısıtlı" üç cisim problemi olarak bilinen çok basit bir konuyla ilgili olarak– yörüngelere dair faz uzayının geometrik temsiline odaklanmıştı. Daha önce gördüğümüz gibi, kütleçekimle hareket eden iki cisimden ibaret bir evrende bu cisimlerin yörüngelerini tanımlamak bir sorun teşkil etmez. Newton'un da işaret ettiği ve Poincaré ile haleflerinin faz uzayındaki kapalı bir çevrim bağlamında tanımlayabilecekleri biçimde bu yörüngeler tamamen periyodik ve düzenli bir şekilde birbirleri etrafında hareket eder. Yine daha önce gördüğümüz gibi bir cisim daha eklendiğindeyse hareket analitik olarak hesaplanamayacak kadar karmaşık hale gelir. Kısıtlı üç cisim problemi, iki cismi birbirleriyle aşağı yukarı aynı boyutta, üçüncü bir cismiyse diğer ikisinden çok daha küçük bir boyutta olduğunu varsayarak bu sorunun üstesinden gelmeye çalışır. Sistem içindeki hesaplamaları kolaylaştırmak adına, büyük cisimlerin –bazen "toz parçacığı" olarak da adlandırılan– küçük cisim üzerinde güçlü kütleçekimsel etkisi olsa dahi bu üçüncü küçük cismin diğer büyük cisimlerin üzerindeki etkisi ihmal edilir. Bu problem hâlâ analitik olarak çözülebilir durumda değildir; ama şimdi tek yapılmaya çalışılan, diğer iki cismin değişen konumları çerçevesinde uygun serileri toplayarak toz parçacığının yörüngesini hesaplamaktır. Toz parçacığının diğer cisimler üzerinde her zaman az ya da çok kütleçekimsel etkisi olacağından bu imkânsız bir durum olsa da Poincaré gibi matematikçilerin ümidi şuydu: Bu yolla diyelim ki güneş, Jüpiter ve dünya; veya güneş, dünya ve ay arasındaki

etkileşimler ele alındığında Güneş Sisteminde ne olup bittiği hakkında mantıklı bir kestirime ulaşmak mümkün olabilirdi.[3]

Poincaré'nin bu önemli basitleştirici varsayımlarından biri, uygun faz uzayının sadece küçük bir kısmını ele almaktı. Aslına bakılırsa artık bir "Poincaré kesiti" olarak tanınan bu küçük kısım, incelenen güzergâhın içerisinden geçmek zorunda olduğu bir yüzeyi temsil eden, faz uzayı içerisindeki bir kesitti. Faz uzayı içerisindeki bir güzergâh bir Poincaré kesiti üzerindeki bir noktadan başlar ve o noktaya geri dönerse –Poincaré kesitindeki bu iki kesişim noktası arasında sistemin davranışının ne kadar karmaşık olabileceğine bakmaksızın– o güzergâhın kesinlikle periyodik olduğunu anlarız. Jüriyi bu yeni fikirlerine usulca alıştırmak adına Poincaré probleme geleneksel açıdan yaklaşarak başlamayı düşünmüştür. Bu geleneksel yaklaşım Güneş Sistemindeki yörüngelerin (ya da en azından, kısıtlı üç cisim problemindeki toz parçacığının yörüngelerinin) periyodik olduğunun ispatını sağlamaya çalışmak adına Poicare'nin yine diferansiyel denklemler çözmek zorunda olduğu anlamına geliyordu. Aynı zamanda, denklemlerin analitik olarak çözülememesi de serilerin toplanmak zorunda olması demekti. Poincaré sonuç olarak işi nihayetine erdiremedi. Uygun denklemleri buldu ve uygun sonsuz serileri elde etti; ancak aslında serilerin yakınsamak *zorunda olduğunu* değil de, yalnızca "*yakınsayabilecek* uygun çözümlerin var olduğunu" ispatladı. Faz uzayındaki uygun güzergâhlar Poincaré kesiti üzerinde başladıkları noktanın aynısına gerçekten de geri döndüklerinden, bunların doğru çözümler olduğunu düşündü ve ardından da bu çözümleri göstermek için yeni topolojik yaklaşımını kullanmaya devam etti.

Poincaré 200'den fazla sayfa harcayarak tüm bunları kâğıda döktü. Kâğıda dökülenlerin çoğuna jüri aşina değildi. Yine de içerdiği zekâ aşikârdı ve jürinin aradığı cevabı da veriyordu. Değerlendirme sürecininse Kral'ın doğum günü olan

[3] Aslında bu yaklaşım ayın yörüngesini hesaplamak için Amerikalı astronom George Hill tarafından on dokuzuncu yüzyılın sonlarında kullanılmış ve kısmen başarılı olmuştur.

21 Ocak 1889'a kadar tamamlanması gerekiyordu. Poincaré ödülü kazandı; ancak makalenin yayınlanmasından sonra diğer matematikçilerin bu çalışmayı uzun uzadıya incelemek için vakitleri vardı ve sonucunda Poincaré'nin bir hata yapmış olduğunu fark ettiler. "İspat" başarılı olamamıştı. Meslektaşlarının eleştirilerine cevaben yaptığı yoğun çalışmanın akabinde Poincaré, yaptığı mantık hatalarını düzelterek şimdi matematikte tüm zamanların klâsikleri arasında sayılan makalesini yeni haliyle 1890'da yayınladı. İlginçtir ki, hatalarını düzelttiğinde Poincaré, eski dille açıklamak gerekirse kısıtlı üç cisim problemindeki parçacığının yörüngesi için dahi uygun serilerin *genellikle* uzaksadığını (diğer bir deyişle kararsızlığın normal olduğunu ve devamlı kararlı yörüngelerin istisna olduğunu) ispat etmişti. Yeni geometrik yaklaşımı açısından, faz uzayındaki güzergâhın Poincaré kesiti üzerindeki belirli bir nokta üzerinden tekrarlı bir şekilde geçmesi periyodik yörüngelerin varlığını ortaya koyuyor olsa da güzergâhın, Poincaré kesitini o noktanın çok küçük bir mesafe de olsa yakınından kesmesi, sistemin bu kez tamamıyla farklı bir davranış örüntüsü izleyebileceği anlamına geliyordu. Çünkü şimdi güzergâhlar faz uzayı içerisinde çok farklı rotaları takip edecek ve aynı noktaya iki kez temas etmeden Poincaré kesitinden geçecekti. Poincaré kesiti üzerinde sonsuz sayıda geçiş noktası bulunması, faz uzayı içerisinde ilerleyen güzergâhın, başlangıç noktasına asla dönmeden sonsuz çeşitlilik ve karmaşıklık içeren yönlerde gezme ihtimali olduğuna işaret eder.[4] Kısıtlı üç cisim problemi ve daha genel olarak Güneş Sistemi ele alındığında yörüngeler prensipte aslında kusursuz periyodik değillerdi. İyi haberse şuydu: Zahmetli kestirim teknikleri ve yeterli sayıda terim içeren uygun seri-

[4] Aslında durum bundan bile daha karışıktır. Hatırlayınız ki faz uzayı alışkın olduğumuzdan daha fazla sayıda boyut içerir. Bu yüzden Poincaré kesiti (genellikle) basit bir çift-boyutlu yüzey değil, çok-boyutlu bir yüzeydir. Bu da, –homoklinik de denilen– çok daha karışık bir sonsuz ihtimaller dallanmasına sebep olur; ama buradaki amaçlarımız çerçevesinde ihtimallerin sonsuz olduğunu bilmek yeterli olacaktır.

lerin toplamının alınmasıyla yörüngeler (tam olarak periyodik olmasalar da) istenilen yakınlıkta hesaplanabilir durumdaydı. Göreceğimiz gibi bu hesaplamalar gezegenlerin, bizim zaman ölçeğimizden çok daha uzun zaman aralıkları boyunca aslında aynı yörüngeleri izleyebileceğini gösterir. Yine de bu yörüngeler daha uzun zaman ölçeklerinde (güneşin ömrü gibi) tam anlamıyla periyodik değildir. Ne var ki Poincaré'nin çalışmasında akılda kalması gereken önemli nokta şudur: Bazı koşullarda (çok sık olmasa bile nadiren de değil) başlangıç halleri birbirinin neredeyse aynısı olan sistemlerin –büyük bir süratle– tamamıyla farklı yönlerde evrilebileceğinin farkına varılmıştır.

Bunu daha iyi anlayabilmemiz için iki yol vardır: Bunlardan birincisi, üzerinden suların aktığı bir manzarayla faz uzayı arasında kurduğumuz benzetmedir. Tek bir su molekülünün faz uzayı içerisindeki güzergâhı, –ister kısıtlı üç cisim problemi kadar basit, ister tüm evren kadar karmaşık olsun– bir sistemin bütününün değişmekte olan halini temsil eder. Manzara içerisinde akıp giden geniş bir nehri gözünüzün önüne getirin. Bu nehir, sisteme karşılık gelen Hamilton denkleminin kuvvetle muhtemel bulunacağı bir bölgeyi temsil eder. Herhangi bir noktada bu nehir, tıpkı Ganj'ın ağzına benzer bir delta oluşturacak şekilde ayrışır ve karmaşık bir ağdan ibaret olan kanallara uzaksar. Nehrin akışında ilerleyen tek bir molekül sol tarafa, ona komşu olan molekül kanalların çatallanan dallarından birine yönelirken sağ tarafa, ağın başka bir dalına yönelebilir. Bundan sonra da oldukça farklı yolları izlerler. Diğer bir deyişle, sistemin birbirlerine tıpatıp benzeyen iki hali anlamına gelen, faz uzayı boyunca yan yana uzunca bir yol izleyen iki güzergâh birbirinden çok farklı hallere uzaksayabilir. Benzer bir şekilde, yüksek ve bıçak gibi keskin sıradağlar üzerine düşen bir su damlası düşünün. Su damlası sıradağların sırtının bir yanına düştüğü takdirde sistem için güçlü bir çekiciyi temsil eden derin bir okyanusa doğru akacaktır. Sırtın diğer yanına düştüğündeyse bu sefer ters yönde, sistem için eşit derecede güçlü bir çekiciyi temsil eden başka bir derin okyanusa doğru akacaktır.

Oysa bu kadar farklı son hallere yönelen bu iki güzergâhın başlangıç noktaları arasında son derece küçük bir yakınlık söz konusu olabilir.

Gündelik dünyamıza ilişkin bir örnek de bize yardımcı olabilir. Gündelik hayatımızda çoğu değişim doğrusal bir biçimde gerçekleşir. 2 kiloluk bir şeker torbasını kaldırmak için kullanmanız gereken kuvvetin, 1 kiloluk bir şeker torbasını kaldırmanız için gereken kuvvetin iki katı olması ya da bulunduğunuz yerden iki adım attığınızda kat ettiğiniz yolun, ilk bulunduğunuz yerden bir adım attığınızda kat edeceğiniz yolun iki katı olması gerektiği gibi. Şimdi, yürümenin doğrusal olmayan bir süreç olduğunu ve attığınız bu çok önemli ilk adımın ardından atacağınız her adımın sizi bir önceki adımın taşıdığı mesafenin iki katı bir mesafeye taşıdığını varsayalım. Diyelim ki ilk adım sizi 1 metre ileriye götürdü. Ardından ikinci adım 2 metre daha, üçüncü adım ise 4 metre daha vs. Doğrusal yürümeyle 11 adım sizi 11 metre ileriye götürecekken, şimdi bu doğrusal olmayan yürümeyle yalnızca 11'inci adım tek başına sizi 1.024 metre ilerletmeye yetecektir ki bu uzaklık bundan önce atılmış olan 10 adımın size sağladığı toplam mesafenin (1.023 metrenin) bir metre fazlasına karşılık gelir. Bu yürümeyle 11 adım sizi 11 metre değil yaklaşık 2 kilometre (2.027 metre) ilerletir. Doğrusal olmayan şeyler başlangıç noktalarından süratle uzaklaşırlar ve iki güzergâh da faz uzayı içerisinde çok küçük farklılık gösteren yönlerde doğrusal olmayan bir biçimde ilerlemeye başladıklarında aynı süratle birbirlerinden uzaksarlar. Poincaré, gerçek dünyadaki sistemlerin başlangıç koşullarına (dağın sırtına düşen yağmur damlası gibi) çok duyarlı olduklarını ve bu başlangıç koşullarından doğrusal olmayan şekilde uzaklaştıklarını keşfetti.

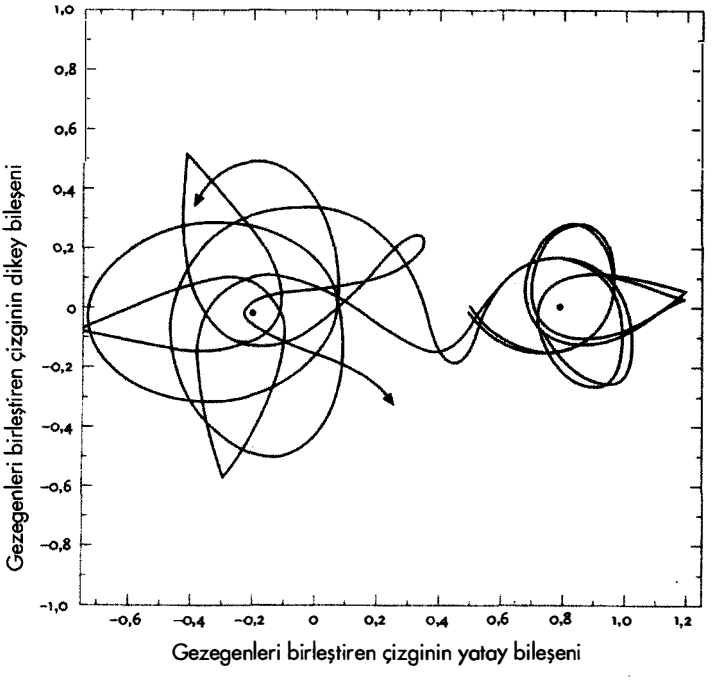
Önemli olan nokta bu durumun, benzer sistemlerin davranışını tahmin etme kabiliyetimizi sınırlandırmasıdır. Doğrusal bir sistemde, herhangi bir başlangıç özelliğini hesaplamakta ya da öngörmekte ufak bir hata yapmamız, –hesaplamalar boyunca ilerleyerek– sonuçta küçük bir hataya sebep olur. Diğer yandan doğrusal olmayan bir sistemdeyse, başlangıçtaki küçük bir hata hesaplamaların sonunda ortaya

çıkacak muazzam bir hataya yol açabilir. Doğrusal bir sistem kendisini oluşturan parçaların aşağı yukarı toplamına eşitken, doğrusal olmayan bir sistem kendisini oluşturan parçaların toplamından çok daha fazlasına ya da çok azına karşılık gelebilir. Buradan yola çıkarak Poincaré, bazı koşullar altında, başlangıç şartları hakkında sahip olduğumuz bilginin yeterli oranda doğruluk içermemesinden dolayı bir sistemin zaman içerisinde nasıl değişeceğini hesaplayamayacağımızın farkına vardı. 1908'de Poincaré, *Science et Méthode* [*Bilim ve Metod*] adlı kitabında şöyle yazdı:

> Dikkatimizden kaçan çok ufak bir sebep, kayda değer bir etkiye yol açar ve sonrasında bu etkinin şans eseri olduğunu söyleriz. Başlangıç anında doğanın yasalarını ve evrenin durumunu kesin olarak biliyor olsaydık, sonraki herhangi bir anda evrenin durumu hakkında kesin olarak bir tahminde bulunabilirdik. Yine de doğa yasaları bizim için artık sır olmasaydı bile, başlangıç durumu hakkındaki bilgimiz *yaklaşık* olurdu. Bu, takip eden durumu *aynı yakınlıkla* tahmin etmemize imkân verseydi –ki bu tek ihtiyacımız olan şeydir– o zaman olgunun tahmin edilmiş olduğunu ve yasalar tarafından yönetildiğini söylememiz gerekirdi. Ne var ki bu her zaman böyle değildir; başlangıç şartlarındaki küçük farklılıklar son olguda muazzam farklılıklara yol açabilir. Öncekindeki küçük bir hata, sonrakindekinde çok büyük bir hataya yol açacaktır. Tahmin imkânsız hale gelir ve o şans eseri olguyla karşı karşıya geliriz.

Diğer bir deyişle Laplace prensipte haklı olmasına rağmen onun belirlenimci evreni pratikte ileri yönde de geri yönde de hiçbir zaman tahmin edilemeyecekti.

Kitabın aynı cildinde Poincaré kendine özgü hava tahmini örneğini kullanarak konunun ayrıntısına indi:



Şekil 2.1 *Üç cisim problemi. Küçük bir "uydu" kendisinden daha büyük iki "gezegen"in yörüngesinde dönüyorsa uydunun güzergâhının başlangıç koşullarındaki ufak bir değişiklik, kısa zamanda yörüngesinde büyük bir değişikliğe yol açar. Başlangıç koşullarını asla bilemeyecek olmamız da yörüngenin tahmin edilemez olduğu anlamına gelir. Bu görüntü, buna benzer iki güzergâhı dönmekte olan koordinat sistemi içinde gösterir; böylece iki gezegen hareketsiz gözükür.*

Meteorologlar neden hava durumu hakkında herhangi bir kesinlik içeren tahminde bulunurken bu denli zorluk yaşarlar? Neden yağmur ve hatta fırtınalar şans eseri gerçekleşiyor gibi görünür ve bunun sonucunda bazı insanlar bir güneş veya ay tutulması için dilenmeyi saçma bulurken çoğu insan yağmur veya güzel hava için dua etmenin doğal olduğunu düşünür? Muazzam karışıklıkların genellikle atmosferin kararsız bir dengede olduğu bölgelerde ortaya çık-

> tığına şahit oluruz[5]. Meteorologlar dengenin kararsız olduğunu, bir yerlerde bir hortumun oluşacağını söyleyebilecek, ancak kesin olarak nerede oluşacağını söyleyemeyecek konumda olduklarını çok iyi görürler. Verili herhangi bir noktada, bir derecenin onda biri oranındaki bir değişiklik; hortumun tamamen başka bir yerde oluşmasına, yol açacağı yıkımın şiddetinin artmasına ve bu yıkımın etki edeceği bölgelerin değişmesine sebep olur. Derecenin bu onda birlik değerinin farkında olsalardı önceden bu değişiklikleri bilebilirlerdi; ancak gözlemler ne yeterince kapsamlı ne de yeterince kesindi. İşte bu nedenle her şey şansın müdahalesinden kaynaklanıyormuş gibi görünür.

Geriye dönüp baktığımızda bu örnek çok dâhiyane bir ileri görüşün ürünüydü. Fiziğin düzenli yasalarının, gündelik dünyadaki kaotik gözüken davranışlara nasıl yol açtığını tanımlamaya yönelik çabalarıyla Poincaré, çağının çok ilerisinde bir bilim insanıydı. Hatta Poincaré'nin bu fikirlerinin tekrar gündeme gelerek ana akım bilimin bir parçası haline gelmesi için aradan on yıllar geçmesi gerekti. Yaptıkları hava tahminlerinin neden genellikle tutmadığını anlamak için ve bu tahminleri geliştirmek üzere meteorologların sarf ettiği çabaların sonucunda bu fikirler tekrar gündeme geldi. Burada cevabı aranan kritik soru, başlangıç gözlemlerinin ne oranda kapsam ve kesinlik içermesi gerektiğiydi. Çığır açan İngiliz bilim insanı Lewis Fry Richardson'un çalışması bu probleme yaklaşmak açısından iyi bir zemin oluşturuyordu. Çağının ilerisinde olarak değerlendirilebilecek bir diğer insan olan Richardson, gerekli araçların (bilhassa yüksek hızlı elektronik bilgisayarların) dahi bulunmadığı 1910'larda bilimsel hava tahmininde başarı sağladı.

Richardson (1881-1953) geniş bir yelpazeden oluşan ilgi alanına sahip olmakla birlikte kesinlikle basmakalıp bir mete-

---

[5] Kararsız bir denge, çizdiği noktanın üzerinde dengede duran bir kalem gibidir. Poincaré'ye göre, böyle bir durumda kalemin düşeceğini biliriz; ama hangi tarafa düşeceğini tahmin edemeyiz.

orolog da değildi.[6] Bir çiftçinin oğlu ve Quaker[7] olan Richardson, I. Dünya Savaşının patlak verdiği dönemde İskoçya'daki Eskdalemuir Meteoroloji Gözlemevinde yönetici konumundaydı. Dini inançlarından ötürü savaşta yer almasa da gönüllü olarak cephe hattı yakınlarında ambulans şoförlüğü yaptı. Bu dönemde Richardson boş zamanlarını ilk sayısal hava "tahmini"ni üretmek adına zahmetli aritmetik hesaplamalarla boğuşmaya ayırmıştı. Aslında bu "tahmin" bilindik anlamdaki tahmin değildir; çünkü Richardson belirli bir günün belirli bir saati hakkında topladığı bir yığın saf hava verisini, girilen bu verilerin geçerli olduğu andan altı saat sonra Avrupa üstünde gözlemlenecek olan hava örüntülerinin ana hatlarını hesaplamak için kullanıyordu. Bu hesap işe yarasaydı bile altı saat sonrasının "tahmini"ni yapmak aylar alacaktı. Yine de 1920'li yıllarda Richardson için önem teşkil eden şey zaten, matematiksel kestirimlerin ve fizik yasalarının bu amaçla kullanılabilecek olmasının ispatlanma ihtimaliydi.

Bu projenin ilham kaynağı, Richardson'dan on dokuz yaş büyük olan ve on yıl öncesinde böyle bir tekniğin hava tahmininde kullanılmasının prensipte mümkün olabileceğini ileri sürmüş olan Vilhelm Bjerknes'in çalışmasıydı. Hesaplamaya başlamak için gerekli olan başlangıç koşulları yeterli hassasiyette bilindiği takdirde, havayı tanımlayan denklemlerin tahmin yürütmek için yeterli ölçüde biliniyor olacağını ileri süren de Bjerknes'ti. Modern hava tahminciliğinin merkezinde yer alan bu hava tahmini yaklaşımının altında yatan fikir, dünya yüzeyinin üzerinden yukarıya –havaya– doğru devam eden bir noktalar örgüsü çizerek atmosferin sıcaklık, basınç gibi özelliklerinin ölçülmesiydi. Noktaların sıklığının artması, atmosferin o anki haline ait matematiksel modelin doğruluğunun da artması anlamına geliyordu. Ardından, örgünün her noktasındaki şartların, komşularının etkisi (daha sıcak noktalardan daha soğuk noktalara ısı akışı, daha yüksek basınçlı bölgeler-

---

6 Konumuzla hiç ilgisi olmasa da, aynı zamanda tiyatro ve sinema oyuncusu Ralph Richardson'un da amcasıydı.

7 Quaker, Hristiyanlığın bir mezhebi olan Religious Society of Friends [Dostların Dinî Derneği'nin] üyelerine verilen addır –çn.

den daha alçak basınçlı bölgelere esen rüzgâr, konveksiyon [ısı taşınımı] vs) altında nasıl değiştiğini ortaya koymak için fizik yasalarını uygulamak geliyordu.[8] Bu tekniğin, gezegenlerin yörüngeleriyle ilgili yap-bozu çözmek için gerekli olan tekniklerle benzerliği apaçık ortadadır ve sağduyumuz bize noktaların daha sık olduğu daha iyi bir örgü kullanmanın başarı şansımızı artıracağını söyler. Örgüdeki noktaların arasında kalan yerlerdeki koşullar ara değerler bulma [enterpolasyon] yoluyla –söz konusu yeri çevreleyen örgü noktalarındaki koşulların uygun bir ortalaması alınarak– basitçe hesaplanır. Beklenti, örgünün sıklığını ve kullanılan nokta sayısını sürekli artırmanın, tekniğin işe yaraması halinde varılacak sonucun hassasiyetini de –prensipte– giderek artıracağı yönündeydi. Neticede Richardson'un tahmininin doğruluktan oldukça (umutsuzca) uzak olduğu ortaya çıksa da Richardson bu sonuca pek de şaşırmadı; çünkü (mevcut verilerin ve hesaplamalar için gerekli zamanın sınırlı olması nedeniyle) Avrupa'daki havayı tüm incelikleriyle temsil etmesini beklemenin gerçekçi olmayacağı kaba bir veri noktaları örgüsü kullanmak zorunda kalmıştı. Ne de olsa o an için önemli olan, hesaplamaların sonuçları gerçek dünyayla uyuşmasa bile havanın nasıl değişebileceğini hesaplamak adına o tekniği kullanmış olmasıydı.

Batı Cephesinde hizmet ettiği sırada Richardson, *Weather Prediction by Numerical Process* [*Sayısal İşlemlerle Hava Tahmini*] adlı kitabına başlayacak derecede bu teknik konusunda hevesliydi. 1917'de savaş sebebiyle meydana gelen bir hengâmede kitabın elyazması halindeki tek kopyası kayboldu; ancak birkaç ay sonra bir kömür yığınının altından çıktı. Kimse bu kopyanın oraya nasıl gittiğini anlayamadı; ama Richardson, elyazmasının bulunması sayesinde kitabını tamamlamayı başardı. 1922'de yayınlanan kitap, hava durumu tahminlerinin geleceğiyle ilgili kendi meşhur öngörüsünü

---

8 Hava örüntülerinin bir çizelge üzerinde incelenmesine ve ilgili fizik anlayışının basit biçimde kullanılmasına dayanan, aynı zamanda iniş ve çıkışların önümüzdeki birkaç saat içinde nasıl hareket edeceğini tahmin etmek için sezgilerle tecrübeyi harmanlayan geleneksel "sinoptik" hava tahminiyle bu yaklaşımı mukayese edebilirsiniz.

içeriyordu. Hesaplamaların aylar (en azından 7 saat) sürmesi nedeniyle Richardson –bu, matematikçiler için ne kadar tatminkâr bir buluş olsa da– altı saat sonrasına dair tahmin yürütmenin hiçbir pratik yönü bulunmadığının farkındaydı. Dolayısıyla Richardson, okurlarının, her biri mekanik bir hesap makinesiyle (elektronik cep hesap makinesinin atası olan görkemli bir toplama aletiyle) donatılmış 64.000 insan "bilgisayar"ı içeren bir "Tahmin Fabrikası"nı kafalarında canlandırmalarını istiyordu.[9] İnsanların her biri, futbol stadyumu gibi bir amfi tiyatroda problemin ayrı birer safhası üstünde çalışıyor olacak ve hepsi de operasyonların merkezinde (diğer bir deyişle sahnede) bulunan bir tür matematiksel maestro tarafından yönetiliyor olacaktı. Bu matematiksel maestro da yanıp sönen ışıklar veya pnömatik [hava basıncıyla çalışan] borular vasıtasıyla gönderilen mesajlarla iletişime geçiyor olacaktı. Bu tabii ki bilimsel bir fanteziydi; çünkü bunca insanın hareketlerini bu yöntemle irtibatlandırmak hiçbir zaman mümkün olmayacaktı. Richardson'un kendisi de şöyle yazmıştı:

> Belki de gelecekte bir gün, bu hesaplamaları havadaki gelişmelerden hızlı hale getirmenin maliyeti, bu bilginin elde edilmesiyle insanlığın sağlayacağı tasarruftan az olacak. Gelgelelim bu bir hayalden ibaret.

Ne var ki Richardson bu hayalin gerçeğe dönüştüğünü neredeyse görecekti. Otuz yıl içinde –ölmeden hemen önce– elektronik bilgisayarların icat edilmesi, tamı tamına aynı işin makineler vasıtasıyla yapılabilmesinin önünü açtı. Bu tek makine, Richardson'un hayal ettiği 64.000 insandan oluşan bilgisayarın ve hatta daha da fazlasının yerine geçecekti. İlk başarılı sayısal hava tahmininin böyle bir makine tarafından yapılabilmesi 1950 yılında mümkün oldu. Yine de makinenin tahmine ulaşabilmesi için gereken süre gerçek atmosferin evrilmesinden daha uzundu.

---

9 Muhtemelen her bir insan tek bir noktalar örgüsü verisi üzerinde çalışabilirdi.

Richardson'un kendisi de hiç şüphesiz 1920'ler için bu sayısal tahminleri olabildiğince ileri götürdüğünün farkında olarak başka şeylerle uğraşmaya koyulmuştu. 1920'den 1929'a kadar Londra'daki Westminster Öğretmen Okulunun fizik bölümünde başkanlık görevi üstlendi ve akabinde de emekli olduğu 1940'a kadar Glasgow'daki Paisley Teknik Okulunun müdürlüğünü yaptı. Bu süre zarfında psikoloji de okudu ve emekliliğinden hem önce hem de sonra psikoloji ve silahlı çatışmanın nedenleri üzerine kitaplar yazdı. Bu kitapları ve Quaker inancı göz önünde bulundurulduğunda, kendisi henüz hayattayken sayısal hava tahmininin gerçekleşmesini mümkün kılan hesaplama tekniklerindeki muazzam gelişimin kaynağının, II. Dünya Savaşı esnasında şifre çözücülerinin yaptığı çalışmalar olması ironiktir. 1950'lerin başında Richardson'un hayalleri gerçekleşiyormuş ve daha iyi tahminler için tek ihtiyaç duyulan şey olarak daha hızlı bilgisayarlar ve daha iyi örülmüş gözlem örgüleri kalmış gibi gözükse de on yıl sonra bir adam bu varsayımın ayağını kaydıran kanıta rastladı. Hatta bu adam, atmosferin halini derecenin onda biri hassasiyetinde bilirsek bir kasırganın neden *orada değil de burada* olacağını açıklayabileceğimizi düşünen Poincaré'nin bile son derece iyimser olduğunu gösterdi.

Edward Lorenz, 1959'da Massachusettes Teknoloji Enstitüsünde (MIT) çalışan 32 yaşında bir matematiksel meteorologdu. Atmosferin herhangi bir andaki halini tarif etmeye yarayan tam bir denklemler kümesini kâğıda dökemeden dahi, Lorenz prensipte böyle denklemlerin –ne kadar mantıksız ve gerçek dışı olursa olsun– atmosferin herhangi bir halini başlangıç koşulu olarak tarif edebileceği fikrine sahipti. Yine de böyle bir hale karşılık gelen bir simülasyon kurulduğunda, atmosfer modelinin görece az sayıdaki kararlı hal biçimlerinden birinin içine doğal süreçlerle sürüklenebileceğini de biliyordu. Bu haller 1950'lerde meteorologlar tarafından kullanılan terminolojide yer almasa da bizim şimdilerde çekici olarak tanımladığımız hallerdir. Matematiksel hava tahmininin öncüleri, doğrusal denklemlerle çalışmak doğrusal olmayanlarla çalışmaktan daha kolay olduğundan ve bir yerden de başlamaları

gerektiğinden doğrusal teknikleri kullanmışlardı. Lorenz on iki adet doğrusal olmayan denkleme dayanan çok basitleştirilmiş bir atmosfer versiyonunun –fizikçilerin bazen "oyuncak" modeller olarak adlandırdıkları– bilgisayar modelini geliştirerek bir adım daha attı. 1959'da halihazırdaki bilgisayarlar çok basit olduğu için bu modelin de çok basit olması gerekiyordu. Lorenz büyük bir masa boyutunda ve sadece 4032-bit sözcük hafızasına sahip, bir diğer deyişle bugün kullandığımız dijital saat veya çamaşır makinesinin içindeki çipten bile daha güçsüz bir makine kullandı. Doğrusal tahmin tekniklerinin kusursuzdan çok uzak olduğunu gösteren Lorenz simülasyonların özündeki davranış biçimi üzerinde çalışmaya devam etti.[10]

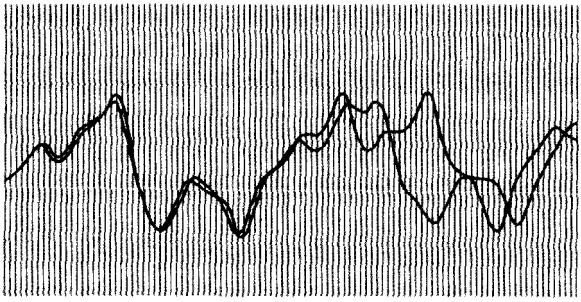
Tıpkı zamanın bilgisayarlarınınn gücü gibi, çıktı cihazlarınınki de kısıtlıydı. Renkli yazıcılar veya düz ekran monitörler mevcut değildi. Lorenz'in bilgisayarının çıktısı basit bir sayı listesinden oluşuyordu ve Lorenz, bu sayıları üç ondalık haneye yuvarlaması için bilgisayarını programlamıştı. Bu sayede çıktı sayfasının bir satırına on iki adetlik bir sayı kümesi sığabilecekti. Model, altı saatlik simülasyon adımları vasıtasıyla ilerliyor ve bir günün tahminini bir dakika içinde simüle ediyordu. İşi iyice detaylandıran Lorenz her satırda yalnızca bir ya da iki değişken için detayları çıkartacak şekilde makineyi programladı. Değişkenin değerini, sembol ile sayfanın tepesi arasındaki mesafe temsil edecekti. Bu sayede bu noktalar üzerinden bir çizgi çizerek değişkenin değişen değerini (örneğin rüzgârın yönünü) grafiksel biçimde göstermek mümkündü. Sevindirici tesadüfle de bu noktada karşılaşıldı.

Lorenz daha önceden yürütmüş olduğu simülasyonun bir kısmına ikinci kez göz atmak istedi. En baştan başlamak ve bilgisayarın, ilgilendiği aralığın seviyesini yakalamasını beklemek yerine Lorenz simülasyonu geleceğe doğru genişletti. Lorenz, yürüttüğü eski simülasyonun ortasından aldığı sayı kümesini kâğıttan okuyarak yeni başlangıç parametreleri olarak sisteme girdi. Ardından da kahvesini yudumlayarak makinenin çalışmasını izlemeye koyuldu. Yaklaşık bir saat sonra makine iki aylık bir oyuncak hava simüle etmişti ve bu bir sa-

[10] *bkz.* Edward Lorenz, *The Essence of Chaos.*

atin sonunda da süreci kontrol etmek için makinenin başına gelen Lorenz şunu fark etti: Çıkan yeni sayılar, daha önce yürüttüğü simülasyondaki aynı "gün"lere karşılık gelen sayılarla hiçbir benzerlik göstermiyordu. İlk olarak bilgisayarın hatalı olduğunu düşündü; ama iki çıktıyı dikkatli olarak karşılaştırdığında yürüttüğü ikinci işlemin, ilk işlemin karşılık gelen kısmıyla aynı şekilde başladığını fakat ilkinin diğerinden gittikçe daha fazla saptığını fark etti. Sapmalar, simülasyonun her dört günü için hataların ikiye katlanacağı şekilde –diğer bir deyişle doğrusal olmayan şekilde– kendini gösteriyordu.

Lorenz kısa bir süre sonra ne olup bittiğinin farkına vardı. Girmiş olduğu sayılar çıktıdan aldığı ve virgülden sonra üç hanesi olan sayılardı; ancak bilgisayarın içerisinde sayılar virgülden sonra altı hane olacak şekilde hesaplanıyordu. Örneğin Lorenz'in 0,506 olarak girdiği sayı, ilk işlemde aslında 0,506127 idi. Model başlangıç koşullarına o kadar duyarlıydı ki %1 'in onda birinin çeyreği kadarki bir değişiklik, iki işlemin kısa bir süre sonra birbirinden tamamen uzaksamasına sebep olmuştu. Gerçek atmosfer de başlangıç koşullarına bu kadar duyarlıysa birkaç gün sonraki havayı tahmin etmek için sayısal tahmin teknikleri kullanmanın hiçbir faydası yoktu. Lorenz, keşfini 1960'ta Tokyo'da gerçekleştirilen bir bilim toplantısında gösterişten uzak bir biçimde sundu. İzleyen yıllarda bu fikirlerini geliştirmeye yöneldi; ama çalışmasının tamamı, daha sonra değineceğimiz gibi, çok sonrasına dek gereken takdiri görmedi. Hava tahmini açısından Lorenz gerçek atmosferin başlangıç koşullarına sahiden de çok duyarlı olabileceğini göstermeyi başardı. Lorenz gerçek havanın karmaşıklığı hakkında yalnızca ipucu veren, ama "küçük değişikliklere olan duyarlılık" gibi kilit bir özelliği ortaya koyan basit bir matematiksel konveksiyon modeli kullandı. Bunu, sular içindeki bir manzaradan ibaret olan faz uzayı modelimiz bağlamında gözümüzün önüne getirebiliriz. Faz uzayı içerisinde yer alan ve eşit güçte çekicileri temsil eden iki derin havuz düşünün. Bu iki havuz, bir kum bankı tarafından ikiye ayrılmış; ancak kum bankının üzerindeki çok ince bir su tabakası tarafından aralarındaki bağlantı sağlanmış olsun. Faz uzayı içerisindeki

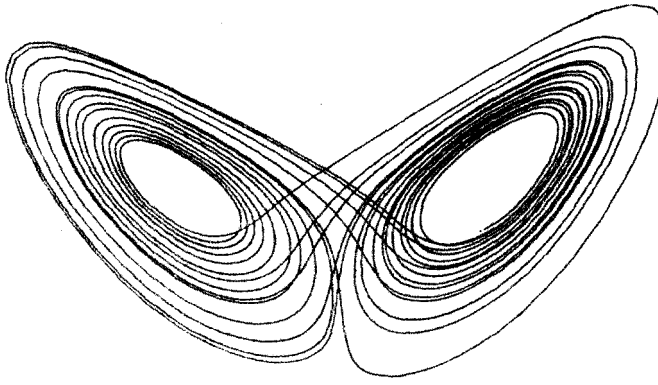


Şekil 2.2 *Edward Lorenz –tıpkı üç cisim problemindeki uydunun yörüngesinde olduğu gibi– hava özellikleri (örneğin sıcaklık) hakkındaki tahminlerin de neredeyse birbiriyle aynı koşullardan başlamalarına rağmen nasıl da uzaksadıklarını keşfetti.*

tipik güzergâhlar, havuzların birinde dairesel biçimde dönüp duracak; ancak nadir görülen bazı güzergâhlarsa kum bankının üzerinden diğer havuza geçecektir. Bu diğer havuzda da dairesel hareketler yapacak olan bu ender görülen güzergâhlar daha sonra tekrar ilk havuza geçecektir. Lorenz'in keşfinin püf noktası şudur: Bir noktanın faz uzayındaki konumunu tam olarak bilmeden, o nokta üzerinden geçen güzergâhın ne zaman bulunduğu havuzu terk edip diğerine geçeceğini tahmin etmek imkânsızdır. Bu yüzden bir halden diğerine geçiş rastlantısal biçimde gerçekleşiyor gibi gözükmektedir. Biraz farklı bir perspektiften söyleyecek olursak, kum bankının üzerinde gezinen güzergâhlar ufak sapmalara çok elverişlidir ve dışarıdan gelen ufak bir dürtü, sistemi ilk havuza yönelen bir güzergâhtan tekrar diğer havuza doğru yönelen güzergâha kaydırmaya yetecektir. Hava tahminlerinin, yalnızca sonraki on-on dört gün için isabetli olmasına (bir anlamda kısıtlanmasına) ve gerçek havanın kararlı bir halden diğer bir kararlı hale hiç beklenmedik biçimde geçmesine neden olan işte bu tip bir sürecin iş başında olmasıdır.

Lorenz'in dikkat çektiği ve kaosun modern kavranışının temelinde yatan konu başlangıç koşullarının *kesin olarak* belirlenmesi problemidir. Havanın (ve diğer karmaşık sistemlerin) başlangıç koşullarına olan bu duyarlılığı, Lorenz'in 1972'de

Washington'da bir toplantıda sunduğu makalenin başlığından sonra ("Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas?")[11] zaman zaman "kelebek etkisi" olarak adlandırılmaya başladı. Bu benzetme, tamamen ciddiye alınmamalıdır; çünkü gerçek dünyada bu ölçekte yer alan ve bireysel katkıları bulanıklaştıran çok sayıda süreç vardır. Dolayısıyla, Texas'taki bir hortumun nedeni olarak Brezilya'daki bir kelebeğin kanatlarını çırpışını göstermek (veya hortumun oluşmamasının nedeni olarak Çin'deki başka bir kelebeğin kanatlarını çırpışını göstermek) pek mümkün değilse de bu, "kaos" için çarpıcı bir metafor sağlar. Lorenz tarafından keşfedilen çift havuzlu çekici, bir kâğıt üzerinde (ya da bir bilgisayar ekranında) grafiğe döküldüğünde ortaya çıkan örüntü tesadüfen bir kelebeğin kanatlarına benzer. Bu çekici –Lorenz tarafından "kelebek çekicisi" olarak adlandırılsa da– Lorenz çekicisi olarak bilinir ve görüntünün aslında neyi temsil ettiğini bilmeyen insanlar için dahi kaosa dair en alışılmış ve en çarpıcı görüntüdür.



Şekil 2.3 *Lorenz (kelebek) çekicisi*

[11] "Brezilya'da Bir Kelebeğin Kanat Çırpışı Texas'ta Fırtınaya Neden Olur mu?" Bu makalenin ilk basılı hali, Lorenz'in kendi kitabı *The Essence of Chaos*'ta [*Kaosun Özü*] mevcuttur.

Öyle gözüküyor ki hava zaman zaman genelde olduğundan daha kaotiktir. Bugünlerde meteorologlar sayısal simülasyonları çalıştırdıklarında gözlem örgülerinden tek bir tahminin hammaddesi olarak veriyi birebir almakla yetinmezler. Onun yerine, gözlemlerin doğasında var olan hatalar ve belirsizliklerin önemli derecede sorun teşkil edip etmediğini anlamak için çoğu zaman başlangıç koşullarında ufak değişiklikler yaparak her tahmini defalarca yürütürler. Tüm tahminlerin aşağı yukarı aynı olduğu ortaya çıkarsa tahminlerin genel örüntüsünün güvenilir olduğuna karar verilir. Hava sisteminin, faz uzayındaki derin havuzlardan birinde dönüp durduğu şeklinde de bu durumu gözünüzün önüne getirebilirsiniz. Meteorologlar zaman zaman aynı tahminleri, başlangıç koşullarındaki küçük farklılıklarla tahminleri yürüttüklerindeyse birkaç gün sonrası için hava durumuna dair çok farklı "öngörüler" elde ederler. Bu durumda havanın –faz uzayı içerisindeki kum bankı üzerinde gezinen güzergâhlara denk biçimde, çok kaotik bir halde olduğu ve tahminlere güvenilemeyeceği sonucu çıkar. Televizyondaki tahmincilerin bazen, başka zaman olduklarından çok daha kendilerinden emin olmalarının nedeni budur. Bir tahmincinin kederli biçimde kabul ettiği gibi: "Beklenmedik bir şey yapmadığı sürece, hava durumunu kesin olarak tahmin edebiliriz."[12]

Bu tip tüm sayısal işlemlerde büyük önem taşıyan iterasyon tekniğini kullanarak kendi cep hesap makinenizle de kaosu iş başında görebilirsiniz. $2x^2$-1 gibi basit bir ifadeyi alın. x için 0 ile 1 arasında, birkaç ondalık haneye sahip bir değer seçin (örneğin 0,2468). Bu sayıyı x olarak alın ve sonucu bulun. Daha sonra, çıkan sonucu x'in yeni değeri olarak kullanın ve sonraki iterasyon için işlemin içine yerleştirin. Bu yolla, basit bir yasayı izleyen ve tamamen belirlenimci bir süreç tarafından üretilmiş, tesadüfî sayılar dizisine benzer bir dizi elde edersiniz. Şimdiyse sadece son ondalık hanesi ilk sayınızdan farklı bir sayıyla (örneğin 0,2469 ile) başlamayı deneyin. Hesap makinesinin tuşlarına sürekli basacak kadar sabırlıysanız

[12] Ian Stewart tarafından, *Does God Play Dice*? [*Tanrı Zar Atar mı?*] adlı kitapta alıntılanmıştır.

veya işi sizin için yapacak basit bir bilgisayar programı yazabilirseniz ilk birkaç iterasyonun akabinde tamamen farklı bir tesadüfî sayılar dizisiyle karşılaşacaksınız. Buna rağmen, iki durumda da geri-bildirim süreci söz konusu olduğundan her sayı kesin olarak bir önceki sayı tarafından belirlenir; diğer bir deyişle sayıların örüntüsü tamamen belirlenimcidir. Bu yalnızca Lorenz'in gözlemlediği türde bir şeydir. Farklı hesap makineleriyle aynı şeyi deneyerek farklı "cevaplar"la karşılaşmanız sizi şaşırtmasın, çünkü hesap makinelerinin sayıları yuvarlama şekli birbirlerinden farklıdır.

Daha farklı türde bir davranışla karşılaşmanız da mümkündür. İlk ifadeye çok benzeyen x^2-1 ifadesini ele alalım. Başlangıç yapmak adına x için (0 ile 1 arasında) herhangi bir değer seçtiğinizde, örüntü bir süre sonra 0 ile -1 arasında gidip gelen kararlı bir hale yerleşir. Bu duruma "iki periyotlu periyodiktir" denir çünkü sistem bu örüntüye gelip yerleştiğinde –nereden başlamış olursanız olun– başladığınız yere dönmek iki adım gerektirecektir. Başladığınız yere dönmeniz için gerekli olan adım sayısının daha fazla olduğu, periyodik davranış gösteren başka sistemler de mevcuttur ve bunlar da nereden başlandığına bakmaksızın, başlanılan yere dönmek için gerekli adım sayısının hiçbir zaman değişmediği sistemlerdir. Basit bir yasa, bir çekiciye yakınsayan periyodik bir davranışı verirken, ilk yasaya çok benzer gibi gözüken diğer bir yasa, başlangıç koşullarına duyarlı olan "rastlantısal" bir davranışı verebilir. Bu tarz bir şeye ilgi duyuyorsanız daha derin bir araştırma yaparak[13] tek bir değere yakınsayan ve orada tıkanıp kalan iterasyonlara rastlayabilirsiniz. Basit birer çekici olan bu sistemler bazen "bir periyotlu" olarak tanımlanırlar; çünkü sizi başladığınız yere götürmeye sadece bir adım yeter. Kimi zaman rastlantısal gözüken, kimi zaman da tüm basitliğine rağmen çok daha anlaşılması güç ihtimaller hakkında ipucu veren iki periyotlu periyodik örüntülerle karşılaşabilirsiniz. Tüm bu davranış örüntüleri; bir musluğun su damlatışı, vahşi hayvan

[13] Franco Vivaldi'nin, Nina Hall tarafından düzenlenen *The New Scientist Guide to Chaos* adlı kitaba yaptığı katkıdan bir fikir edinebilirsiniz.

popülasyonlarının değişme biçimi ya da borsadaki iniş çıkışlar şeklinde gerçek dünyamızda da çeşitli biçimlerde tezahür eder. Aslında kaos ve karmaşanın ortaya çıkmasının altında yatan basitliği bulmuş olduk: Dünyanın çalışmasını sağlayan faktörler; basit yasalar, doğrusal olmama, başlangıç koşullarına duyarlılık ve geri-bildirimdir. Gerçekten de karmaşık olan şeylere değinmeden önce, başlangıç noktamız olan yörüngesel gezegenler hikâyemizi tamamlamak yararlı olacaktır.

Hava tahmininin de Güneş Sisteminin uzun vadeli özelliklerinin de kavranmasının kilidi, uzun sayısal entegrasyon alma işlemlerinin göreçe çabuk şekilde üstesinden gelebilen makul hızda elektronik bilgisayarların gelmesiyle açıldı. Güneş Sisteminin şu an kaos dediğimiz şeyin buyruğunda olduğunu Poincaré prensipte ispat etmişti. Oysaki dünya gibi gezegenlerin pratikte uzun bir süre boyunca kararlı yörüngeleri takip ettiği, şu an olduğu gibi o *zaman da aşikârdı. Aksi takdirde za*ten bu tip şeyler hakkında duyduğumuz merak bu noktada olmazdı. Güneş Sistemi içerisindeki kaosa el atmak için izlenmesi gereken yol, daha çok –iki büyük nesnenin kütleçekim etkisi altındaki küçük bir nesneden (ya da bir dizi küçük nesneden) oluşan– kısıtlı üç cisim problemine benzeyen sistemleri ele almaktı. Güneş Sistemindeki en büyük nesneler güneş ve Jüpiter gezegenidir ve bunların kütleçekim etkileri altında bir küçük nesneler ailesi bulunur. Bu nesneler Mars ile Jüpiter'in yörüngeleri arasında bir yerde güneşin etrafında dönen ve asteroidler olarak bilinen yüz binlerce kaya benzeri cisimdir.

Güneş Sistemindeki gezegenler bu asteroid kuşağıyla ayrılmış iki aile oluştururlar. Güneşe daha yakın olan dört adet gezegen (Merkür, Venüs, dünya ve Mars) kaya gezegenlerdir. Güneşe daha uzak olan dört büyük gezegen (Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün) ise gaz yapılı gezegenlerdir.[14] Bu ayrımın sebebi açıktır: Gezegenlerin oluşumu esnasında genç güneşin

[14] Tarihsel nedenlerden ötürü, Plüton olarak bilinen cisim de hâlâ gezegen olarak adlandırılmaktadır; ama bu nesne aslında sadece Neptün'ün yörüngesinin ötesinde bulunan buzlu ve donmuş cisimler kuşağının en büyük mensubu ve Güneş Sisteminin oluşumundan kalma bir enkazdır.

ısısı, gaz halindeki maddeleri Güneş Sisteminin iç kısmından uzaklaştırmıştı. Dış bölgelerse gazın dört büyük gezegen üzerinde birikmesine yetecek kadar serindi. Asteroid kuşağının kökeni de günümüzde artık bir sır değildir. Hem genç yıldızları çevreleyen, toz disklerinden oluşan maddelerin hem de bilgisayar modellemelerinin bize işaret ettiğine göre gezegenler, toz zerreciklerinin birbirine yapışmasıyla, giderek daha büyük tanelerin ve kaya parçacıklarının oluşumu sonucunda ortaya çıkmıştı. Mars ve Jüpiter arasında kalan bölge içinse şu söylenebilir: Jüpiter'in kütleçekimsel etkisi, bu süreci –tamamlanmasına izin vermeyecek şekilde– sekteye uğratarak bütün halinde tek bir gezegenin oluşmasını engelledi. Son simülasyonların işaret ettiğine göre Jüpiter, Güneş Sisteminin bu kısmına kütleçekim açısından hükmetmeye başlayacak büyüklüğe eriştiği sırada Mars büyüklüğünde (dünyanın büyüklüğünün onda biri kadar) belki de altı veya yedi tane nesne oluşmuştu bile. Ne var ki bu nesneler birbirlerine eklenerek büyük bir gezegen oluşturmak yerine, Jüpiter'in etkisi sebebiyle birbirleriyle şiddetli bir biçimde çarpışarak parçalara ayrıldı ve bunun sonucunda da asteroid kuşağı ortaya çıktı. Mars ise bu çarpışmadan tek sağ kalandı.

Asteroidlerin oluşumuna dair bu ayrıntılı model ancak 1970'lerin sonlarında geliştirildi. Caltech'te bir doktora öğrencisi olan Jack Wisdom yeni bir sayısal teknik ve elverişli olan en iyi bilgisayarı kullanarak asteroidlerin o günkü yörüngelerini incelemeye karar verdi. Asteroidler küçük ve belirsiz olduklarından on dokuzuncu yüzyılda ancak keşfedilmişti. Gözlemlenen asteroidlerin sayıları arttıkça da, yörüngelerinin asteroid kuşağı boyunca eşit aralıklı olmadığı ve bu aralıklarda aslında boş yörüngeler anlamına gelen boşlukların da bulunduğu netlik kazandı. Astronom Daniel Kirkwood tarafından 1860'ların sonunda dikkat çekilen bu boşluklar Kirkwood boşlukları olarak adlandırıldı. Bu yörüngeleri özel kılan şeyin ne olduğu daha en başından belliydi: Bunlar Jüpiter'in yörüngesiyle belirli "rezonanslar"a denk geliyordu. Yine de Wisdom (ve bilgisayarı) ortaya çıkana dek, bu salınım yapan yörüngelerden nasıl uzak durulduğu tamamıyla açık değildi.

Hepimiz çocukluğumuzda salıncağa binerken rezonansı tecrübe etmiş ve kullanmışızdır. Rezonans, görece küçük bir çaba karşılığında büyük bir getiri elde etmenin bir yoludur ve bu çabayı en doğru anda uygulayarak ve sistemi gitmek "istediği" yöne doğru iterek yapılır. Salıncağın gittikçe daha da uzun bir yayı izlemesi için salıncağa uyguladığımız az miktardaki "itme"nin zamanlaması, tam olarak ayarlanmalıdır. Aynı şekilde, kendi yörüngesinde ilerleyen bir asteroid, –Jüpiter ile güneş arasında– Jüpiter'in yanından geçtiğinde Jüpiter de ona bir dürtme uygular. Bu dürtmeler çoğu yörünge için hemen hemen rastlantısaldır ve her yörünge için farklı zamanlarda meydana gelir. Bu, bir salıncak üzerinde ayakta dururken ileri geri küçük sallanmalar yapmanıza benzer. Dolayısıyla ortaya çıkan etki büyük olmaz. Salınım yapan yörüngelerse farklıdır. Bir asteroidin güneş etrafında izlediği yörüngesinin, Jüpiter'inkinin tam iki katı uzunluğunda olduğunu farz edersek, asteroid, Jüpiter tarafından uygulanacak dürtüye her zaman yörüngesinin aynı kısmında maruz kalacaktır. Tıpkı doğru andaki itişin salıncağı giderek daha da yükseğe çıkarması gibi, dev gezegenin etkisi de yörüngeyi bozabilir. Yörünge geleneksel anlamda kararlı olsaydı, bu durum sorun teşkil etmeyecekti ve küçük bir saptırma yörüngenin az miktarda sapmasına ve sonrasında eski şekline dönmesine (Laplace'ın incelediği Jüpiter ve Satürn'ün yörüngelerindeki uzun vadeli değişimlerdeki gibi) neden olacaktı. Oysa yörünge saptırmalara duyarlı bir yörüngeyse, rezonans, asteroidi hemen hemen dairesel olan yörüngesinden çabucak saptırarak çok daha eliptik bir yörüngeyi izlemesine yol açabilir. Bu eliptik yörünge yine de Jüpiter'le olan rezonans noktasına aynı düzenlilikte geri döner. Wisdom'un bulup 1982'de yayınladığı da buydu: Asteroid kuşağındaki –özellikle de Jüpiter'le 3:1'lik rezonansa yakın olan– yörüngelerde iş başında olan kaos.

Gelgelelim bu bile Kirkwood Boşlukları yap-bozuna tam bir çözüm değildi; çünkü asteroidleri bu boşluklardan çıkaran bir tedirgeme[15] asteroidlerin eliptik yörüngelerini eski hallerine döndürüp onları boşlukları dolduracakları şekilde değiştire-

[15] *Perturbation* –çn.

rek tam zıt yönde de kolaylıkla işleyebilirdi. (Lorenz tarafından keşfedilmiş olana benzer çift loblu çekiciyi hatırlayınız.) Wisdom bu yap-boz parçasına getirilen çözümün, kaos sebebiyle Kirkwood Boşluklarından çıkan asteroidlerin Jüpiter'in etkisi altında –dünyanınki de dahil olmak üzere– iç gezegenlerin yörüngeleriyle kesişen başka yörüngelere doğru hareket ettiğinin farkına varılmasıyla ortaya çıktığını ileri sürdü. Güneş Sisteminin uzun geçmişi boyunca bu asteroidlerin çoğu, iç gezegenlerden biriyle çarpışmaları sonucunda ilgili denklemlerden tamamen çıkartılmışlardı. Dolayısıyla da boşlukları dolduracak başka asteroid bulunmamaktaydı. Ayın ve Güneş Sisteminin tüm iç gezegenlerinin yıpranmış yüzeylerinde bu tip darbelerin çoğunun izlerini görmek mümkündür. Dünya üzerinde gerçekleşen bu tip bir darbeyse, büyük ihtimalle yaklaşık altmış beş milyon yıl önce dinozor çağına son verip biz dahil tüm memelilerin çağını başlatmıştır. Bu da var oluşumuzu, asteroid kuşağında geçerli olan kaosun etkilerine borçlu olduğumuza ve medeniyetimizin de aynı kaosun etkileri sonucunda sona erebileceğine ürpertici biçimde işaret eder.

Ne olursa olsun dünyanın, aniden güneşe yaklaşan veya uzayın derinliklerine dalan bir yörüngeye oturmasıyla medeniyetimizin sonunun gelmeyeceğini bildiğimizden içimizi rahat tutabiliriz. 1982'den itibaren bilgisayarlar daha iyi ve daha hızlı hale geldi. Matematikçilerse daha da marifetli programlar icat ettiler ve böylelikle Güneş Sisteminin geleceğinin (veya muhtemel geleceklerinin) derinliklerine daha net bakabilir duruma geldiler. Uzay bilimlerindeki muadilleri gibi bu araştırmacıların da projeleri için çetrefilli kısaltmalar ve cinaslı isimler bulmaktan çok büyük keyif alır gibi bir halleri vardır. (LONG-STOP ve Digitary Orrery gibi.) Bu çalışmaların bazıları günümüzden yüz milyonlarca yıl ötesini konu alır. Gezegenlerin yörüngeleri teknik anlamda kaotik olsa da bu çalışmalar bize –Kirkwood Boşluklarındaki asteroidlerin durumunun aksine– gezegenlerin (dünyamız da dahil olmak üzere) esas yörüngelerinden herhangi birinin, güneşin kalan yaklaşık beş milyar yıllık ömrü boyunca sert bir değişime uğrama ihtimalinin yok denecek kadar az olduğunu ortaya koyar. Öte yandan

bu hesaplamalar dünyanın ya da diğer herhangi bir gezegenin yörüngesini öngöremez ve başlangıç koşullarına oldukça kısıtlı biçimde de olsa duyarlıdır. Örneğin Paris'teki Bureau des Longitudes'de Jacques Laskar tarafından geliştirilen bir model, dünyanın en az iki yüz milyon yıl (sözü edilen sayısal entegrallemenin limiti) boyunca aslında aynı yörüngeyi izleyeceğini ortaya koydu. Yine de dünyanın konumunu belirlerken entegral alma işleminin başında yapılan on beş metrelik bir hata aynı model için iterasyonun her adımında on beş metrelik birer "hata" olarak kalmaz ve doğrusal olmama durumu sebebiyle yüz milyon yıl sonrası için o kadar büyük bir belirsizliğe ulaşır ki dünyanın kendi yörüngesinde nerede bulunacağını söylemek imkânsız duruma gelir. Hata, dünyanın yörüngesinin çevresi büyüklüğüne –diğer bir deyişle 950 milyon kilometreye– ulaşmış olur. Tıpkı Lorenz'in basit hava tahmini modelininkine benzer, her sayısal entegrallemede bulunan yuvarlama hataları (kâğıt kalem veya elektronik bilgisayar kullansanız bile seçmek zorunda olacağınız virgülden sonraki hane sayısı tercihi) hesaplamanın sonucunu etkiler.

Bunun bir sonucu da dünyanın (ya da herhangi başka bir gezegenin) önümüzdeki 100 milyon yıl boyunca izleyeceği yörüngesini hesaplamak için böyle bir model kullandıktan sonra hesaplamayı tersine çevirdiğinizde başladığınız noktaya geri gelemeyeceğinizdir. Sistem yeterince kararlıysa faz uzayında başladığınız noktaya yakın bir yere geri dönersiniz; ama tüm söyleyebileceğiniz, ilgili gezegenin –aşağı yukarı– güneş etrafındaki aynı yörüngede kalacağıdır. Newton'un yasalarına tâbi olan nesnelerin, tersinir güzergâhları takip etmesi gerektiğini düşünmemiz salık verilmişse de hesaplanan bu güzergâhlar tersinmezdir. Bu, hesaplamalar insan elinden çıktığı sürece evren hakkındaki düşünüş biçimimizi çok da değiştirmez. Dünya gibi gezegenler ele alındığında bilgisayardaki yuvarlama işlemini değiştirsek bile belirli bir sayıdaki ondalık haneden sonrası için, hesapladığımız yörünge (veya faz uzayı içindeki güzergâh) –kesin olarak değişecekse de– çok da değişmez. Bir önceki hesapladığımız yörüngeyle neredeyse tamamen aynı başka bir yörünge elde ederiz. Başlangıç koşullarında ufak de-

ğişiklikler yaparak hesaplamayı her tekrar edişimizde benzer bir yörünge elde ederiz. Tüm yörüngeler hem gerçek uzaydaki hem de faz uzayındakiyle hemen hemen aynı bölgeyi işgal eder ve böylece yörünge kaotik biçimde bir ihtimalle diğeri arasında dolansa da insanlarla ilgili zaman ölçeğindeki ihtimaller yelpazesinin dışına çıkmaz. Bu bir çeşit kısıtlı kaostur. Bu durum bazen, dönen rulet tekerleğine atılan topun mevcut bölmelerden birine yerleşene kadar geçen süreçteki davranışına benzetilir. Krupiyenin işini düzgün yaptığını varsayarsak aslında top kaotik bir biçimde sekerek dolanır; ama bu sekmeler tekerleğin çerçevesi içindeki "yörüngeler"le kısıtlıdır. Daha basit ve gündelik başka bir benzetmeyle anlatacak olursak bu durum, sabahları giyeceği çorabı seçmekte zorluk çeken birisinin bu zorluğun üstesinden gelmek için dolabında sadece yeşil renkli çorap bulundurması gibidir. Aynı kişi her gün çekmeceden rastgele iki çorap seçebileceğini bilir ve bu iki çorap da –farklı ayrıntılara sahip olsa bile– yeşil olacaktır. Gözlerini kapatsa dahi çekmeceden kırmızı bir çorap seçemez.

Hikâyemizin genel akışından biraz sapacak olsak da temas etmemiz gereken bir nokta var. Güneş Sisteminin iç gezegenlerinin, bilhassa da Venüs'ün geçtiğimiz birkaç bin yıl içinde yörüngelerini çarpıcı biçimde değiştirdiğine ve bu değişikliklerin bir dolu antik mit ve efsanelerde anlatıldığına inanan insanlar mevcuttur. Bu inanç, söz konusu antik mitlerin hayali biçimde yorumlanışının yanı sıra yörüngesel dinamiklerle momentum korunumu yasası gibi temellerin kavranamamış olmasından kaynaklanır. Maalesef kimi saygıdeğer astronomların, Güneş Sistemindeki kaos hakkında bu tip fantezileri besleyecek yöndeki demeçleri dolayısıyla Venüs'ün şu anki yörüngesine henüz yerleşmiş olduğunun kaos teorisiyle "açıklandığının" veya "ispatlandığının" ileri sürülüşüyle karşılaşabilirsiniz. Oysa böyle bir şey söz konusu değildir. Bu hesaplamalar ileriye olduğu gibi geriye dönük de yapılabilir ve tıpkı Venüs'ün halihazırdaki yörüngesiyle (çorap örneği bağlamında kırmızı değil yeşil çorapla) aynı tür örüntüyü ortaya koyar. Venüs'ün, örneğin MÖ 5.000.000 yılı 4 Temmuz günü yörüngesinde tam olarak nerede olduğunu söyleyemesek de o zamanlar ne tür bir yörünge için-

de olduğunu gayet emin bir biçimde söyleyebiliriz. Venüs'ünkinin ya da herhangi başka bir yörüngenin –atalarımızın diğer Afrikalı maymunlardan kopuşu ile günümüz arasındakinden bile fazla zamanı kapsayan– geçtiğimiz beş milyon yıl içerisinde çarpıcı bir yörünge değişikliği yaşamış olma ihtimali yoktur. Hiç kuşku yok ki kimse Venüs'ü, yörüngesini değiştirip gökyüzünde başıboş biçimde gezinirken görmemiştir.

Gezegenleri bir kenara bırakmadan önce, kaosun yalnızca yörüngeleri etkilemediğini söylemek gerekir. Gezegenler eksenleri etrafında döner (dünyanın kendi ekseni etrafında bir tur atması yirmi dört saat alır) ve güneşin kütleçekimi sebebiyle bu hareketi yalpalayarak yapar. (Tıpkı bir topacın dönerken, dünyanın kütleçekimi sebebiyle yalpalaması gibi.) Dönme periyodu ve yalpalama periyodu arasında rezonanslar oluşması mümkündür ve bunlar faz uzayının sağ kısmında, gezegenin yan yatma açısında ani ve kaotik bir değişime yol açabilir. Örneğin gezegenin yaptığı dönme hareketi adım adım yavaşlar ve sonuç olarak sistem faz uzayının hassas bir bölgesine girerse bu değişim gerçekleşebilir. Günümüzde, dünyanın ekseninin dikeyle (güneş ve dünyayı birleştiren bir çizgiye göre) olan açısı 23 derecedir ve havanın mevsimsel döngüsünün nedeni budur. Öte yandan büyük ayımız ise dünyanın yana yatıklığında gerçekleşebilecek şiddetli değişimlerin önüne geçen bir dengeleyici olarak karşımıza çıkar. Dengeleyici rolü oynayan büyük bir uyduya sahip olmadıklarından Mars ve diğer iç gezegenler için durum farklıdır. (Mars'ın –ele geçirilmiş asteroidler olarak düşünülen– iki ufak uydusu bu rol için tamamen yetersizdir.) Mars'ın ortalama yatıklığı 24 derece olarak göze çarpsa da bilgisayar simülasyonları bu ortalamanın en az ±20 derecelik büyük bir değer aralığında şiddetli değişiklikler yapabildiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte Mars'ın şimdiki kurak yüzeyinde kurumuş nehir yatakları gibi gözüken şekiller bize bu gezegenin geçmişte şiddetli iklim değişiklikleri geçirdiğine dair doğrudan kanıt sağlar. Bu sert iklimsel olaylar, Mars'ın donmuş kutup bölgesinin güneşe doğru eğildiği ve bu eğilme sonucunda ortaya çıkan olağanüstü yaz ısısının, donmuş karbondioksit veya sudan oluşan kutup bölgesinin yeterince

ısınarak buharlaşmasına veya erimesine neden olduğu geçmiş dönemlerle pekâlâ ilintili olabilir. Venüs ve Merkür'de de muhtemelen bu tip bir yalpalanma meydana gelmiştir. Ne var ki bu gezegenlerde gözle görülür benzer izler bulunmamaktadır; çünkü Merkür'de atmosfer yoktur ve Venüs'ün yüzünün altüst olmuş olmasının yoğun volkanik faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Dünyanın kararlılığı tüm bu anlattıklarımız sayesinde korunmaktadır. Çok uzun vadedeyse gel-git kuvvetleri nedeniyle dünyadan uzaklaştıkça ayın etkisi de azalacak, uzak gelecekte gezegenimizin eğikliği de kaotik –hatta belki de aniden 90 dereceye kadar erişecek şekilde– değişikliğe uğrayacaktır. Bunun sonucunda da –her altı ayda bir durum tersine dönmek üzere– yazın bir kutup bölgesinde şimdiki ekvator sıcakları yaşanırken diğer kutupta sert ve kara bir kış hüküm sürecektir. Çizilen bu tablonun bildiğimiz yaşam için pek de ideal olduğu söylenemez. Dolayısıyla var oluşumuzu Güneş Sistemindeki kaosa borçlu olma ihtimalimize rağmen (dinozorların sonunu getiren asteroid çarpmasını hatırlayınız) dünyanın eğikliğinde ayın varlığı sayesinde görülen değişim kaosun *yokluğundan* kaynaklanır ve bu da dünyada kararlı denebilecek iklimsel koşullar altında milyarlarca yıl boyunca yaşamın evrilmesine imkân kılmıştır. Yine de hikâyede heyecan verici bir nokta daha vardır. Dünyayla bağlantılı büyük bir uydu olan ayın bu heybetiyle nasıl var olduğuna yönelik elimizdeki en iyi önerme şudur: Güneş Sistemi tarihinin ilk evrelerinde, kaosun işleyişiyle yörüngesinden sapan ve asteroid kuşağına ait, Mars boyutunda bir nesne dünyayla çarpışarak eriyik maddeler saçılmasına neden olmuş ve bu maddeler daha sonra uzayda ayı meydana getirmişti.[16]

Güneş Sistemini incelemeyi sonlandırmadan önce dikkatinizi çekmek istediğimiz son bir noktanın (ki belki de en önemlisinin) da üstünde durmakta fayda var. Bir gezegenin yörüngesini hesaplamak adına bir sayısal entegralleme kullanmanız ve bu hesaplamayı tersine çevirmeniz halinde başladığınız noktaya geri dönmeyeceğinize az önce değinmiştik. Hesap-

[16] *bkz.* John ve Mary Gribbin, *Fire on Earth.*

lanan güzergâhlar tersinmezdir. Ayrıca, hesaplamaları insan eliyle yaptığımız sürece, Newton'un yasaları prensipte hâlâ tersinir olduğundan evreni ele alma şeklimizin bununla çok da değişmeyeceğini de söylemiştik. O halde evren nasıl bu "hesaplamaları yapmaktadır?" İlgili tüm (her parçacığın konumu ve momentumu gibi) özellikler hakkında kesin bilgileri saklayabilecek kusursuz bir (canlı veya elektronik) zekâyı tıpkı Laplace gibi hayal edebilir ve akabinde ilgili hesaplamaları kusursuz biçimde gerçekleştirebilirsiniz. O zaman bu hesaplamalar elbette tersinmez olur. Peki kusursuzluğu sağlayabilmek için kaç adet ondalık hane kullanmamız gereklidir? Kusursuz bilgisayarımızın hafızası ne büyüklükte olmalıdır?

Bu ilk bakışta cevaplanması imkânsız bir soru gibi gözükür; ancak sayıların doğasına ilişkin çok basit bir cevap bulunduğunu görürüz. Çoğumuz sayılardan bahsederken 1, 2, 27, 44, 196 gibi tam sayıları düşünürüz. $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{3}{4}$ gibi basit kesirlere de alışkınızdır. Günlük yaşantımızda bunların ötesine gidilmez. Ondalık hanelerle bile, yalnızca para söz konusu olduğunda haşır neşir oluruz ve bu da yalnızca iki ondalık haneyle sınırlıdır. 17,46 £'un "on yedi sterlin kırk altı peni"ye tekabül ettiği fikrine hepimiz aşinayızdır. Oysa diğer sayıların gerçek anlamda bir sonsuzluğu mevcuttur; ama günlük yaşantıda bunu hiç göz önünde bulundurmayız. Daha kötüsü, aklımıza getirebileceğimiz herhangi iki sayının arasında da sonsuz sayı bulunur. Ondalık haneler açısından bu apaçık ortadadır. 1 ve 2 tamsayılarını ele alalım. 1 ve 2 arasında, tek ondalık hane içeren bir sayı kümesi bulunmak zorundadır (1,1, 1,2 ...1,8, 1,9). O sayıların da her birinin arasında bir tane daha ondalık hane içeren bir sayı kümesi vardır (1,11, 1,12, 1,13... 1,18, 1,19). O sayıların da her birinin arasında da... Neyse, siz olayı zaten anladınız. Ele aldığınız iki sayıda kaç tane ondalık hane bulunursa bulunsun bu mantığa göre o iki sayının arasında sonsuz sayı vardır. 247,8503468295667 ve 247,8503468295668 gibi iki sayı için veya bu kitabı, hatta tüm evrendeki kitapları kaplayacak kadar uzun ama sadece son hanesi farklı olan iki sayı için de aynı durum söz konusudur.

Yalnızca matematiksel bir meraktan ibaret olsaydı bu önemsiz sayılabilirdi. Örneğin bazı sonsuzlukların (bazı sonsuz seriler gibi) iyi huylu olduğunu ve basit yollarla temsil edilebileceğini biliyoruz. Örneğin $\frac{1}{3}$ kesiri, sonsuz sayıda ondalık hane içeren bir ondalık sayıya karşılık gelir: 0,3333333... Oysaki evrendeki tüm kitapları sıkıcı 3 satırlarıyla doldurmaktansa bu sayı basit ve kompakt bir biçimde yazılabilir. Farklı ondalık sayı ifadeleri de kompakt şekilde gösterilebilir. Örneğin 0,675486754867548 ondalık sayısı "67548 hanelerini alıp sonsuza dek tekrarla" yazılarak tanımlanabilir. Rahatlıkla idare edilemeyecek denli büyük bir şeyi bu kadar kompakt bir şekilde tüm hatlarıyla tanımlamak kimi zaman algoritma olarak adlandırılır ve sözle veya basit matematiksel bir ifadeyle gösterilebilir. Bu kompakt yöntemle gösterilebilen ifadeyeyse "algoritmik olarak sıkıştırılabilir" denir. Oysa ondalık sayı fikrini hiç öne sürmemiş olan Antik Yunanlar bile algoritmik olarak sıkıştırılabilir olmayan bazı sayıların var olduğunu ve bunların kompakt şekilde yazılamayacağını biliyorlardı. Daha da kötüsü, çoğu sayı bu kadar basit bir şekilde yazılamaz.

Basit şekilde yazılabilen sayılar kesirlerdir. Kesirler bir tamsayının diğerine olan $\frac{4}{3}$ veya $\frac{29847}{65109}$ gibi oranlarıdır. (Tamsayılar dahi bir anlamda orandırlar ve $\frac{2}{2} = 1$, $\frac{8}{4} = 2$ biçiminde yazılabilirler.) Yunanlar bu sayıları oran [*ratio*][17] içerdiklerinden rasyonel sayılar olarak adlandırdılar. Diğer yandan –emsallerinin en ünlüsü π olmak üzere– iki sayının oranı biçiminde asla yazılamayacak sayılar da mevcuttur. Dolayısıyla bu sayılar irrasyonel sayılar olarak adlandırılır ve yalnızca, tekrar etmeyen rakamlardan oluşan sonsuz bir zincir olarak ifade edilebilir.[18] Ondalık sayı kavramından yoksun olan Yunanlar konuyu bu şekilde ele almasalar da bu tip irrasyonel sayıların varlığının farkındaydılar. Ayrıca çoğu sayının irrasyonel olduğunun da farkındaydılar! İşte bu, bir sistemin faz uzayındaki mutlak konumunu belirlemeye çalıştığımızda görebileceğimiz

---

[17] Rasyonel [*rational*] sözcüğü, oran [*ratio*] sözcüğünden türetilmiştir –çn.

[18] Sık sık π'nin kestirimi olarak kullanılan $\frac{22}{7}$ şeklindeki rasyonel ifade gerçek π değil, sadece onun ***kestirimidir.***

gibi, kaosun ve Newton'un (ya da Laplace'ın) tersinirlik kavramının kalbine isabet eder.

"Sistem" çok küçük olabilir (bir kutunun içerisinde kütleçekim etkisi altında dolanan tek bir parçacık örneğindeki gibi). Parçacığın hali, onun konumu ve momentumuyla belirlenir ve hatırlayalım ki Newton, parçacığın, tüm kütlesi kendi merkezinde matematiksel bir noktada toplanmış gibi davranacağını ispatlamıştı. Sistemin faz uzayındaki konumunu belirlemek için "tüm" yapmamız gereken o noktanın konumunu ve parçacığın momentumunu belirlemektir. Problemi daha da basitleştirmek adına öncelikle konum üzerinde yoğunlaşalım. Parçacığın düz bir çizgi üzerinde hareket ettiğini –belki de kütleçekim etkisiyle düştüğünü– farz ederek bu basitleştirmeyi sağlayabiliriz. Şimdi yapmamız gereken tek şey parçacığın konumunu bu çizgi üzerinde belirlemek olacaktır ki bu da hayal edilebilecek en basit fizik problemidir. Ne var ki bazı nadir durumlar haricinde çözümün imkânsız olduğu ortaya çıkar. Parçacığın A ve B noktaları arasında bir yerde olduğunu bildiğimizi farz edelim. A ve B arasındaki mesafenin *tam olarak* kaçta kaçının parçacık tarafından kat edildiğini bilmemiz gereklidir. Mesafenin $\frac{1}{3}$'ü veya $\frac{98}{317}$'si veya diğer herhangi rasyonel kesirlik bir bölümü söz konusuysa ortada bir sorun yok; ancak rasyonel sayılarla gösterilen her nokta çiftinin arasında irrasyonel sayılarla gösterilen sonsuz sayıda nokta vardır ve bu noktaların da her biri, kompakt bir biçime sıkıştırılamayacak şekilde sadece sonsuz rakamlar zinciriyle gösterilebilir. Örneğin parçacık A ve B noktaları arasında $\frac{1}{\pi}$ kadar ilerlemişse bu gösterimin içereceği hassasiyet, ifadede kullanacağımız ondalık hane sayısıyla orantılı olacaktır. Öte yandan gösterimi *kesin olarak* yapmak istediğimizde, sonsuz sayıda rakamı kâğıda dökmemiz gerekecektir. Ayrıca, bu yalnızca düz bir çizgi üzerinde hareket eden tek bir parçacık için geçerlidir! Başlangıç koşullarına yeterli ölçüde duyarlı olan bir sistemde, kaç adet hane kullanırsak kullanalım –Lorenz'in keşfettiği üzere– sistemin tüm geleceğinin, kullanmayıp da bir kenara attığımız o bir sonraki hanenin değerine önemli ölçüde bağımlı olabilmesi her zaman mümkündür.

Bu, *tek* bir parçacığın halini belirlemek için sonsuz hafızaya sahip bir bilgisayara ihtiyaç duyulduğu anlamına gelir. Hiçbir bilgisayar evrenden büyük olamaz ve evreni "var olan her şey" olarak tanımladığınızda bu, evrenin davranışını bütün detaylarıyla taklit edebilecek tek sistemin evrenin kendisi olduğuna işaret eder. Evren Laplace'ın düşündüğü gibi tümüyle belirlenimci olsa ve tüm gelecek şu anki halinin içinde saklı olsa bile geleceği bilmenin evrenin evrilmesini izlemenin haricinde hiçbir yolu yoktur. Bizim özgür iradeye sahip olup olmadığımıza bakmaksızın evren, özgür iradeye sahipmişizcesine davranır ve gerçekten önemli olan da sadece budur. Evren kendi geleceğinden bihaberdir ve en hızlı simülatörü de yine kendisidir.

Peki ya tersinirlik ve zaman oku? İnsanlar zevzekçe evrendeki (ya da gaz dolu bir kutudaki) zamanı tersine işletmek için "sihirli bir değnek sallayarak" tüm parçacıkların hareketini tersine çevirmekten bahsediyorlardı. Ne var ki şu an bu imkânsız gözüküyor. Sinyaller ışıktan hızlı hareket edemiyorken evrendeki tüm hareketlerin *eşzamanlı olarak* nasıl tersine çevrilebileceği hakkında derin sorulara yol açan görelilik teorisi gibi kurnazlıkları ve "eşzamanlı" ile kast edilen şeyin evreni nereden gözlemlediğinize bağlı olarak anlam değiştirebileceğini bir kenara bırakacak olsak bile tek bir parçacığın dahi hareketini tam olarak tersine çevirmek imkânsızdır. Bu kesin tersine çevirme işini yapmak için (hareketin, bir an için rasyonel sayılarla tanımlandığı çok nadir durumlar haricinde) ilk olarak onun mevcut halini tüm sonsuz ondalık haneleriyle belirtmemiz gerekirdi. Bu, prensipte imkân dahilinde değildir ve bu imkânsızlık sadece insani yetersizliklerden kaynaklanmaz. Bu, kaosun kaçınılmaz olduğu bilgisini bize sunan bir ikramdır. Evreni –prensipte– tüm detaylarıyla tahmin etmek *mümkün değildir*; kaldı ki zamanı –prensipte– tersine çevirmek de aynı oranda *imkânsızdır*.

Bu bölümde sunulan fikirler evrenin karmaşıklığının üzerinde kurulu olduğu temelin –derinlerdeki basitliğin– ta kendisidir. Şimdi bu temelin üzerinden, evrenin karmaşıklığının ve yaşamın kendisinin kaostan nasıl doğduğunu incelemeye

geçebiliriz. Kaos ve fraktallerle zaten haşır neşirseniz bir sonraki bölümü atlayarak 4. Bölüme geçebilirsiniz; ancak kaosun kendi diyarına kısa ama nefes kesici bir gezinti yapmak ve bununla bağlantılı olarak, kaosun incelenmesinde *vazgeçilmez* hale gelen fraktal teorisini irdelemek için üçüncü bölümü es geçmemenizi umuyoruz. Bizi yaşamın kendi sınır bölgesine götüreceğinden bu, düşündüğünüz kadar da yabana atılacak bir şey değildir ve tartışmamızın son amacı yaşamın oluşumunu anlamaktır.

3

Düzenden Doğan Kaos

Şu anda bahsettiğimiz kaos türü, diğer bir deyişle yirmi birinci yüzyıl bilim insanlarının kaostan kastı, antik düşünürlerin sözünü ettikleri kaostan veya gündelik hayatımızda kullandığımız kaosun anlamından farklıdır. Bu ikinci tür kaos prensipte bile tamamen rastlantısal ve öngörülemezdir. Bizim burada değindiğimiz kaos ise tamamen düzenli ve belirlenimcidir. Her evresi –prensipte– tamamen öngörülebilen kesintisiz bir neden-sonuç zincirinde birbirini takip eden aşamalardan meydana gelir. Pratikte tek sorun ne olacağını, gerçek zamanda olayların meydana gelişinden evvel detaylı olarak tahmin etmenin imkânsızlığıdır. Buna dair klâsik bir örnek türbülans üzerine yapılan çalışmalardan verilebilir. Türbülans birçok yerde karşımıza çıkar; ancak en basit örneklerden biri olan "debinin[1] artması sonucu suyun akışının değişme şekliyle" bu konunun önemine değinmek mümkündür.

Basit modelimizi, yüzeyinden büyük bir kaya parçasının yükseldiği, usulca akan bir nehri hayal ederek oluşturabiliriz. Nehirde akan su bölünerek kayanın etrafından dolanır ve diğer tarafta sorunsuzca tekrar bir araya gelir. Böylece suda yüzen

[1] Akarsu yatağının herhangi bir kesitinden 1 saniyede geçen su miktarı –çn.

ufak dal parçalarının bu "akış çizgileri"ni izlediğini görürüz. Nehrin yukarı kısmında yağmur söz konusuysa akış hızı artar ve bu sırada en az üç belirgin değişim yaşanır. Daha önce muhtemelen bunlara şahit olmuş, ama önemleri hakkında hiç kafa patlatmamışsınızdır. İlk olarak akış güçlendikçe kayanın arkasında küçük girdaplar oluşur. Bu anaforlar yerlerinde kalır ve akıntı boyunca sürüklenen küçük bir dal parçası bunlardan birinin içinde hapsolup uzun süre dönüp durabilir. Bu, –bir sistemin, bir çeşit girdabın çevresini uzun bir süre dolaştığı– Lorenz çekicisi örneğindeki faz uzayında görülen davranış şekline çok benzer. Faz uzayında bu tip çekiciler limit çevrimi olarak bilinir; çünkü sistem başlangıcını nerede yapmış olursa olsun bir limit dahilinde tekrarlayan belirli davranış örüntüsüne çekimsenecektir.[2] Yaklaşık olarak (ancak açıklayıcı) bir şekilde, kayanın arkasındaki her anaforu bir "limit çevrimi" olarak adlandırabiliriz.

Bir sonraki aşamada akıntı boyunca akan suyun hızı arttıkça, kayanın arkasında anaforlar oluşur, ancak yerlerinde kalmazlar. Kendiliklerinden (ya da akış tarafından) bulundukları yerlerden ayrılarak akıntı yönünde uzaklaşırlar ve kısa bir süre boyunca akışın içinde çözünene dek varlıklarını sürdürürler. Bu esnada kayanın arkasında yeni anaforlar oluşur ve akabinde bunlar da yerlerinden ayrılarak kendi sıralarını savmış olurlar. Bu kez de bir dal çırpısı, bu burgaçların birisine kapılabilir ve anafor yok olana dek dönüp durarak akıntı boyunca sürüklenebilir.

Suyun akışı, akış hızı artmaya devam ettiğindeyse, kayanın arkasında anaforların oluştuğu bölge giderek küçülür ve anaforlar neredeyse oluşur oluşmaz dağılarak görünüşte sadece düzensiz dalgalanmaların, diğer bir deyişle türbülansın meydana geldiği hafif dalgalı bir yüzeye sebep olur. Son olarak akış yeterli hıza ulaştığında, kayanın arkasındaki bölgede düzene dair hiçbir ize rastlanmaz. Anafor oluşumu ortadan kalkar ve kayanın arkasında kalan suyun yüzeyinin

[2] Doğrusunu söylemek gerekirse bir limit çevrimi, faz uzayında kapalı bir döngüye karşılık gelir. Bizse bunu, işimizi kolaylaştırması açısından Lorenz çekicisinin tek bir lobu olarak düşüneceğiz.

tamamı bozulur. Düzen de yerini öngörülemeyen kaotik harekete bırakır.

Ayrıntılarıyla açıklayacak olursak türbülans, düzenden kaosa doğru giden rotanın iki kritik özellik içerdiğini belirtir. İlk söylememiz gereken şey, bir şeylerin değişmekte olduğudur. Bahsini açmaya gerek bıraktırmayacak denli aşikâr gözükse de bunun, tüm hikâyenin merkezinde yer aldığını belirtmeliyiz. Buna benzer bir sistem kimi koşullar altında basit yollarla açıklanabilirken, kimi diğer koşullar altında kaos çerçevesinde açıklanabilir ve bu ikisinin arasında da ilginç şeylerin (bu durumda, anaforların "doğuşu"nun) meydana geldiği karmaşık bir bölge mevcuttur. Bu sistemde tek bir şey –bir parametre– değişim gösterir; o da suyun aktığı hızdır. Bu tek bir parametrenin değerini kritik bir noktanın üstüne taşımak kaosun başlamasını da beraberinde getirmeye yeter. İkinci olarak da kaosla düzen arasındaki karmaşık ara evre süresince anaforların kayanın arkasında yok oluşunu ayrıntılı olarak ele aldığınızda çok ilginç bir şeyle karşılaşırsınız. Bu keşif ayrıntıya yönelik itinalı bir dikkati gerektirse bile olup bitenlere dair örüntüyü etraflıca görme niyetinde değilseniz yüksek düzeyde teknik araç gerece de ihtiyaç duymazsınız. Leonardo da Vinci bu konuya yarım bin yıl önce dikkat çekmişti. Kayadan ayrılıp akıntı yönünde ilerleyen bir girdabın öylece kaybolmadığına işaret eden da Vinci, onun daha küçük girdaplara, ardından daha da küçük girdaplara ayrıştığını söylüyordu. Ona göre bu adeta sonsuz bir çatallanma süreciydi. Kaosa giden yolda, sonsuz küçük bir ölçekte işleyen sonsuz sayıda tercih yer alıyor gibidir. (En azından konu türbülans olduğunda bu böyledir.) Benzer herhangi bir şeyi başka bir yerde de iş başında görmemiz mümkün müdür?

Yanıt elbette "evet"tir. Benzer bir şeyi iş başında gördüğümüz bir diğer yer –yine su akışının söz konusu olduğu– musluktan su damlaması olayıdır. Musluk kapalı olarak başlanıp ardından hafifçe açıldığında alttaki lavaboda –sıkıcı bir davulcunun monoton temposuyla yankı yapan– istikrarlı bir damlama sağlamak kolay olacaktır: Tıp, tıp, tıp, tıp... Bu, bir periyotlu bir ritimdir. Musluğu biraz daha açtığınızda siste-

min iki periyotlu bir ritme büründüğünü görmek ve işitmek hâlâ oldukça basittir. (Bunu ben bile yapabilirim.) Bu sefer kısmen daha yetenekli bir davulcuyu dinliyormuş gibi olursunuz: Tıp-tıp, tıp-tıp, tıp-tıp, tıp-tıp... Musluğu daha da açtığınızdaysa işler giderek ilginçleşmeye başlar ve ardından tamamen karman çorman olur. İkinci periyodun ardından gerçekleşen ilginçlikleri tespit etmek oldukça zordur. Evimdeki bir musluğu, dört-zamanlı bir vuruş işittiğime kendimi ikna edebileceğim bir noktaya kadar açabiliyorum: Tıp-ı-tı-*tıp*, tıp-ı-tı-*tıp*, tıp-ı-tı-*tıp*, tıp-ı-tı-*tıp*... Bu, dört periyotlu bir ritimdir. Ne var ki dürüst olmak gerekirse bu ritmin sırf duymak istediğim şeyin o ritim olmasından kaynaklanıp kaynaklanmadığı konusunda emin değilim; çünkü kontrolü dikkatlice sağlanan koşullar altında yapılan deneylerin bu sonucu ortaya koyduğunu önceden de biliyorum.[3] Söz konusu süreç periyot katlama olarak adlandırılır ki bunun sebebini tahmin etmek güç değildir. Yine de bu süreç sonsuza kadar süremez. Kritik bir noktada (musluğun açılması ele alınırsa, çok yakın bir zamanda) sistem kaotikleştikçe, yinelenen periyot katlamalar (yinelenen çatallanmalar) çözülmesi güç ve görünürde rastlantısal olan bir damlama örüntüsü ortaya çıkarır. Musluğu daha da açtığımızda damlalar birleşerek düzgün bir akış oluşturur. Biraz daha açtığımızdaysa akış, türbülanslı ve dağınık bir görüntü çizer. Şu an için buradan daha ileri gitmeyelim; ancak türbülans konusuna tekrar döneceğiz.

Kaosa giden periyot katlamalı rotaya yönelik en iyi örnek, bilimin tamamen farklı bir alanından gelir ve kaosa yönelik çıkarımların ne kadar temel ve yaygın olduğu hakkında bize ipucu sunar. Lojistik denklem olarak adlandırılan çok basit bir denklem bulunur. Bu denklem bir canlı türü popülasyonunun bir nesilden diğerine nasıl değiştiğini açıklamak konusunda

---

[3] Bu bölümü yazıya döktükten hemen sonra, sağanak yağmur diner dinmez alışverişe çıktım ve nalbur dükkânında kuyrukta beklediğim sırada, pencerenin dışındaki bir yağmur oluğundan su damladığını fark ettim. Dörtlü kümeler halinde düştüğünü apaçık görebildiğim damlalar kaldırıma çarptıklarında şaşırtıcı bir şekilde tam olarak tıp-ı-tı-tıp ritmini tutturuyordu.

işe yarar. Gayet basit biçimde bu konuya değinebiliriz. Sonraki bahara yeni bir nesil dünyaya getirmek amacıyla yumurtalarını bıraktıktan sonra tüm yetişkin popülasyonunun kış ayında öldüğü bir böcek türünü ele aldığımızı varsayalım ve x sayıda birey içeren bir popülasyonla başlayalım. Yeni nesildeki bireylerin sayısının (hayatta kalarak sırası geldiğinde üreyecek bireylerin sayısının), açılacak yumurtalara ve açılacak bu yumurtaların sayısının (doğum oranının) da kaç adet yumurtlamanın gerçekleşmiş olduğuna bağlı olduğu apaçık ortadadır. Dolayısıyla ortalama olarak her böcek B kadar yumurtlarsa yeni nüfus Bx kadar olacaktır. Yemek bulamayıp açlıktan ölmüş ve yavrulayamamış olan böceklerin bu hesaba katılmadığını da söyleyelim. Bu ölüm oranı popülasyonun ilk büyüklüğüne bağlıdır. (Birey sayısı ne kadar fazlaysa her bireyin yeterli besin bulması da o kadar zor olacaktır.) İşi daha da basite indirgemek adına nüfus için bir üst limit belirleyip (bir gül ağacının yaşam alanı sağlayabileceği yeşil sinek sayısı açısından düşünüldüğünde bu gayet mantıklıdır) asıl nüfusu bu sayıya bölersek x'in tanımladığı değerin her zaman 0 ile 1 arasında kalmasını sağlamış oluruz. Yapılan bu işleme yeniden normalleştirme adı verilir. Şimdi prematüre ölüm oranını hesaba katmak için Bx büyüme faktörünü yeni bir terimle çarpabiliriz: (1-x). Nüfus çok düşükse (sıfıra ne kadar yakın olursa olsun) neredeyse tüm bireyler hayatta kalır ve besine ulaşır. Dolayısıyla büyüme oranı (1-x) de neredeyse tam olarak Bx'e eşittir. Öte yandan nüfus çok yüksekse x 1'e, (1-x) ise 0'a çok yakındır. Bu durumda çoğu birey açlıktan ölmekten veya avcılara yem olmaktan kurtulamaz. Bu iki uç ihtimal arasında, doğum oranını temsil eden B'nin kesin değerine bağlı olarak nüfus –bir nesilden sonrakine– artabilir ya da azalabilir. B'nin farklı değerleri için nüfusun nasıl değiştiğini aşağıdaki ifadenin iterasyonuyla görebiliriz:

$$x \text{ (sonraki)} = Bx(1 - x)$$

x(sonraki) burada bir sonraki neslin nüfusuna karşılık gelir. Denklemin sağ tarafının çarpımını aldığımız takdirde Bx - Bx^2 ifadesini elde ederiz. Bu ifadedeki x^2 teriminden dolayı bu sürecin doğrusal olmadığı ve iterasyon yoluyla geri-bildirim içerdiği kanısına varırız.

B'nin 1'den küçük olması, popülasyonun bir nesilden sonrakine kendisini yeniden üretemeyeceği anlamına gelir. Her erişkin birey, ortalama olarak 1'in altında yavru bırakarak evrimsel bir felakete davetiye çıkartır ve başladığınız x değeri ne olursa olsun eninde sonunda popülasyonun nesli tükenecektir. B'nin 1'den büyük olması durumunda ilgi çekici birtakım şeyler meydana gelir ve bir bilgisayar, hesap makinesi, hatta kâğıt kalem kullanarak B ile x'in farklı değerleri için bu ilginç şeyleri araştırabilirsiniz. 1950'lerden itibaren çevrebilimciler de tam olarak aynı şeyi yaptı. Çevrebilimciler lojistik denklemin farklı versiyonlarını kullanarak çeşitli canlı türlerinin gerçek popülasyonlarının davranışına ışık tutabilecek modeller bulmaya çalıştı. (Lojistik denklemin bu versiyonları, popülasyonun avlanmaya maruz kalmasını veya iki farklı popülasyonun besin için birbirleriyle girdikleri rekabeti kapsayacak yönde kolaylıkla uyarlanabilir versiyonlardı.) Oysaki büyük oranda halihazırdaki hesaplama imkânlarının yetersizliğinin getirdiği sınırlamadan ötürü çevrebilimciler, en ilginç ihtimalleri derinlemesine incelemek yerine denklemden yapılabilecek daha çok düzenlilik içeren çıkarımlar üzerinde yoğunlaşmayı yeğlediler. (Tıpkı hidrodinamikçilerin türbülansı görmezden gelmeleri ve küçük burgaçlar düzenli biçimde kayanın arkasında oluştukları ve oradan ayrıldıkları zaman nehrin bulunduğu hale yoğunlaşmaları gibi.)

B 1'den büyük ve 3'ten küçük olursa bu basit lojistik denklemde bir çekici yer alır. Başladığınız popülasyonun sahip olduğu x değeri ne olursa olsun (x için 0 ile 1 arasında herhangi bir değer) yeterli sayıda nesil sonrasında bu değer, sabit bir nüfus teşkil edecek biçimde dengeli bir düzeye yerleşecektir. B artırıldığında yerleşilmiş olunan bu tam değer hafifçe yükselir. B'nin 3'e yakın (ancak 3'ten küçük) değerleri içinse muhtemel olan maksimum nüfusun $\frac{2}{3}$'üne karşılık gelecek şekilde değer 0,66'ya yerleşir. Aynı değer düşük bir düzeyden başlayıp yükselerek 0,66'nın üstüne çıkabilir ve birbirini izleyen nesiller için çekiciye gittikçe yaklaşarak 0,66'nın iki tarafında zikzaklar çizebilir. (Kitabımızın ikinci bölümünün başında bahsedilen, π için yapılan kestirim gibi). Diğer yandan bu de-

ğer yüksek düzeyde başlayıp 0,66'ya doğru alçalabilir ve aynı şekilde zikzaklar sergileyebilir. Yine de yeteri kadar iterasyon uygularsanız daima 0,66'ya yerleşir. B'yi daha da büyüttüğünüzde iniş çıkışlar daha şiddetli olur ve çekiciye yerleşilmesi de uzun sürer; ancak B, 3'ten küçük olduğu sürece en nihayetinde çekiciye yakınsayacaktır. Öte yandan B 3'e eriştiğindeyse farklı şeyler meydana gelir.

B 3'ten büyük bir değere ulaşır ulaşmaz örüntü değişime uğrar. Bu sefer yeteri kadar iterasyon yapıldığında popülasyon –birbirini takip eden nesillerde– iki farklı sabit düzey arasında gidip gelir. Tek bir çekici ikiye ayrılmış (çatallanmış) ve periyot, 1'den 2'ye katlanmıştır. Gerçek popülasyonları ele alarak bunu kavramak mümkündür. Bir yıl içerisinde bütün besinini tüketen büyük bir popülasyon söz konusudur. Bunun sonucunda birçok birey yavrulayamadan açlıktan ölür. Dolayısıyla yeni neslin popülasyonu küçük olacak ve her birey bolca besin bularak yumurtlayabilecektir vs. Tüm bunları, B'nin 3'ün altından başlayarak 3'ün üzerine çıkan değerlerini ele alan bir grafikte göstermek istediğinizde, tek olan çekicinin çatallanması sonucunda diyapazona (ses çatalına) benzer bir şekille karşı karşıya kalırsınız.

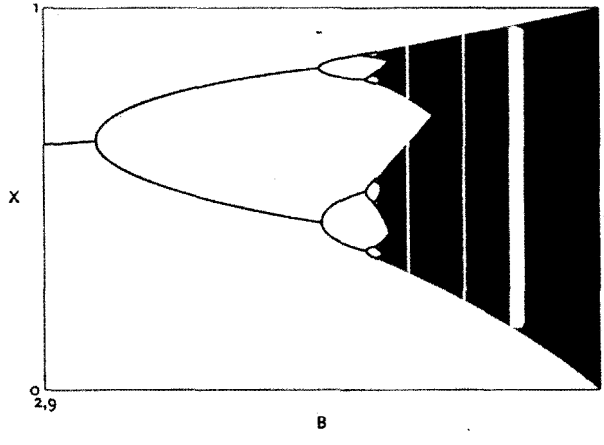
Hesaplamalar yapıldıktan sonra bu süreç sözle veya şekillerle anlatılacak denli kolay bir hale gelmiş olur. Asıl zahmet gerektiren hesaplamaların yapılmasıdır. B'nin yalnızca tek bir değeri için tüm iterasyonların hesaplamasını yapmak bile fazlasıyla sıkıcıdır. Üstelik kritik değer olan 3'ün civarında olup biteni yakından incelemek istiyorsanız B'nin biraz farklı çok sayıda değeri için yine çok sayıda iterasyon yapmanız gerekir. B artırıldıkça genel davranış örüntüsünün nasıl değiştiği detayı açısından lojistik denklemi ilk incelemeye alan kişi Avustralya doğumlu ve sonradan bir çevrebilimci olan fizikçi Robert May'dir. 1970'lerin başında Princeton'da çalışan May, 30'lu yaşlarının sonlarında, artık fikirlerini fizik ve matematikten biyolojiye uyarlamasına yetecek çok doğru bir birikime sahip hale gelmişti. Elektronik bilgisayarların yükselen hız ve gücünü kullanmanın da tam yeri ve tam zamanıydı. B 3'e eşit olduğunda meydana gelen çatallanmanın keşfedilmiş ol-

masından hareketle, atılması gereken bir sonraki adım aşikâr biçimde B daha da artırıldığında ne olacağını görmekti. Sonuç hayrete düşürücüydü. 3,4495 değerinde diyapazonun her iki ucu da çatallanıyor ve dört farklı nüfus arasında inip çıkan (dört periyotlu) bir sistem üretmiş oluyordu. B 3,56'ya eşit olduğunda her bir çekici ikiye ayrılıyor ve nüfus sekiz farklı düzey arasında gidip geliyordu. 3,596'da bir diğer katlanma on altı muhtemel nüfus düzeyi ortaya çıkartıyordu. Bu noktada, bu basit belirlenimci kurala tâbi olan gerçek bir canlı popülasyonunu incelemekte olan herhangi bir biyolog, bir nesilden diğerine bu düzeylerde sıçramalar yapan nüfusların görünürdeki kaotik dalgalanmalarının içerisinde bir düzen görmekte hayli zorlanırdı. Fark etmişsinizdir ki B'nin değeri artırıldıkça çatallanmalar birbirlerine giderek yaklaşmaktadır ve May'in ilk çalışmasının geliştirilmesiyle ortaya çıkana göre 3,56999'da nüfusta mevcut çekici sayısı sonsuza ulaşır. Bunun anlamı şudur: Nüfusun yıldan yıla nasıl değiştiğini inceleyen bir kimse, tam belirlenimci bir kaosla karşı karşıya kalır.

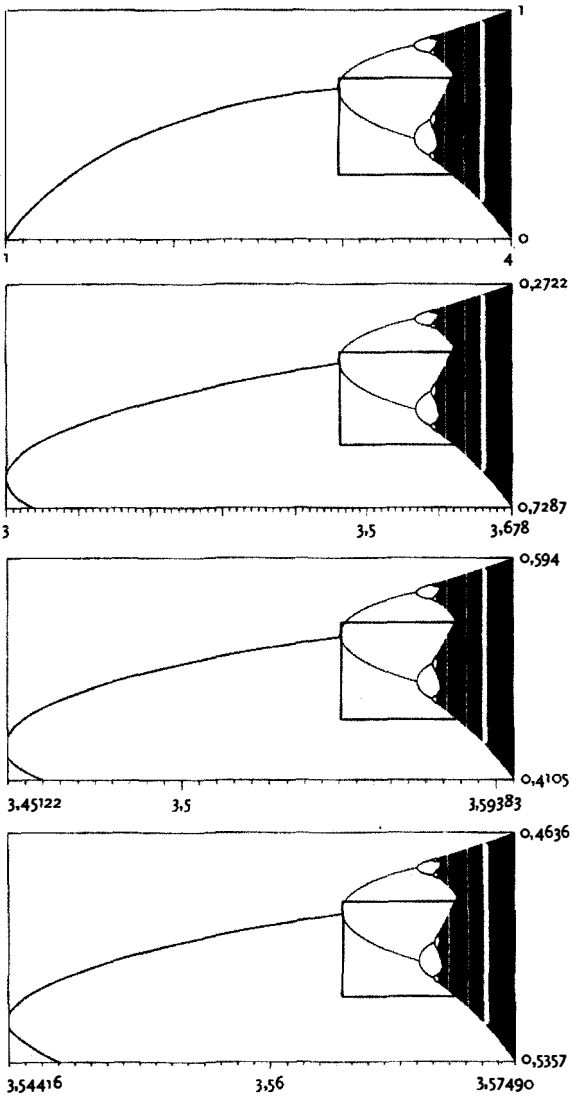
Hatta mesele bu kadarla da sınırlı kalmaz. B'nin 3,56999'dan büyük değerleri için çoğu zaman kaos söz konusu olsa da kaosun yarattığı kafa karışıklığı içerisinde net bir pencere gibi açılan, düzenin tekrar sağlandığı, B'nin değerlerine ait küçük bir yelpaze bulunur. Örneğin B 3,8'den birazcık büyük veya 3,9'dan birazcık küçük olduğunda sistem, B 3'ten küçük olduğunda görülen davranışa benzer şekilde kararlı bir hale yerleşir. Öte yandan B yavaşça artırıldığında, tıpkı B'nin 3'ün hemen üzerindeki değerleri için görülen örüntüdeki gibi yine tekrarlanan çatallanmalar (periyot katlamaları) görürüz. Bir süre sonra, önceki tüm aşamaların aynılarından geçeriz ve kaosla yeniden karşılaşırız. Ne var ki karşılaştığımız örüntü ilk örüntüye gerçekten de çok benzerdir ve ondan tek farkı daha küçük bir ölçekte yer almasıdır. Kaosun bu yeni ve daha küçük ölçekli versiyonu içerisinde, tıpkı 3,8 ve 3,9 arasında bulduğumuz düzenin açtığına benzer bir pencere vardır. Bu pencere içerisinde de bütün bu örüntü yine tekrar eder. Giderek küçülen ölçeklerde aynı davranış örüntüsü devam eder ve bu tekrarlanma, adeta iç içe geçmiş sonsuz sayıdaki Rus mat-

ruşka bebeği gibi sonsuza dek sürer. Bu "örüntü içinde örüntüler" açık bir sebeple kendine benzer olarak değerlendirilir. Düzenin orta yerinde kaos, öte yandan kaosun orta yerindeyse düzen vardır. Bütün bunların, çevrebilimi ve biyolojinin çok ötesinde çıkarımları olduğunun farkına varan May, disiplinler arası bilimsel bir dergi olan (ve yaygınca okunan) *Nature*'da 1976'da yayımladığı makaleyle yaptığı keşiflere dikkat çekti. Bu, tam da farklı bilim insanlarının yürüttüğü, çeşitli olgular üzerindeki bağımsız çalışmaların bir araya gelerek kaos teorisini yarattığı döneme denk geliyordu.

Biz "kaos" terimini, sözünü ettiğimiz davranışı tanımlamak için kullandık; ama sözcüğün kullanılışı söz konusu dönemden hemen sonra başladı. (Gerçekten de tüm bunlar meydana gelirken kaos, kendi anlamını buldu ve yaygın olarak kullanılmaya başlandı.) Edward Lorenz 1960'ların başında kendine ait kaos keşfini gerçekleştirdiği sırada, meteoroloji bağlamında çalışmalar yürütüyordu. Keşfini gayet doğal olarak, meteorologların katıldığı toplantılarda açıkladı ve meteoroloji dergilerinde yayımladı. (Ana makalesi "Deterministic Nonperiodic Flow" ["Periyodik Olmayan Belirlenimci Akış"] 1963'te *Journal of the Atmospheric Sciences*'da yer buldu.) Ne var ki keşfi çabucak kavrayabilecek matematikçiler, fizikçiler ve hatta biyologlar



Şekil 3.1a *Feigenbaum diyagramı, kaosa giden periyot katlama rotasına dair açıklayıcı bir örnek oluşturur.*



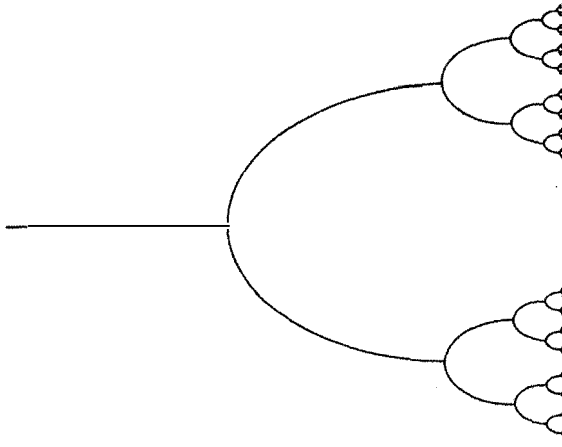
Şekil 3.1b *Feigenbaum diyagramının önemli bir özelliği kendine-benzer olmasıdır. Diyagramın küçük bir kısmının doğru oranda büyütülmüş ölçeği, orijinal diyagramla tamı tamına aynı görünüşe sahiptir.*

meteoroloji dergilerini okumuyorlardı ve bu dergileri okuyan meteorologlarsa düzenden nasıl kaos yaratıldığından ziyade havadaki kaosun (günlük anlamıyla) içinde nasıl düzen bulunabileceğiyle çok daha ilgiliydiler. Şimdi bundan on yıl sonrasına gidelim. 1941 doğumlu bir matematikçi olan James Yorke aynı günlerde, Maryland Üniversitesinde bilim insanlarının farklı bölümlere ayrışmasına yol açan engelleri kısmen de olsa kırmaya çalışmak için özellikle kurulmuş olan Fizik Bilimi ve Teknoloji Enstitüsü adlı disiplinler arası bir kurumda çalışıyordu. Yorke'un Maryland Üniversitesindeki meslektaşlarından birisi olan Alan Faller meteoroloji departmanında görev yapıyordu ve Lorenz'in 1963 tarihli makalesini okumuştu. Yorke'un, Faller ile sohbetlerinden birinde ona periyodik-olmama hakkındaki kendi çalışmasından bahsetmesi üzerine, Faller ona makaleyi gösterdi ve daha sonra Yorke'un enstitünün içinde dağıtacağı kopyalarını çıkarttı. Makalenin hem meteoroloji alanı dışında da geçerlilikleri olması gereken derin bir gerçeği içermesinden hem de bunu gerçek, fiziksel bir sistemin davranışı açısından ifade ediyor oluşunun temeldeki matematiği fizikçilere daha erişilebilir kılmasından dolayı Yorke makaleyi okur okumaz değerinin farkına vardı. Matematikçiler Lorenz'in basit bilgisayar programındaki sayıların davranışını çağrıştıracakları biçimde sayılarla on yıllarca oynamışlardı; ama Lorenz'den önce kimse bu tip matematiksel soyutlamalar ile gerçek dünya arasında bir bağ kurmamıştı. O dönemde Lorenz'in kendisinin de, bu anlayışla fiziksel terimlere çevrilebilecek, soyut gözüken ne kadar matematiksel çalışma yürütülmüş olduğundan haberi yoktu. Oysa Yorke bunu yapan birini tanıyordu. Berkeley California Üniversitesine yaptığı bir ziyareti sırasında 1963 tarihli makalenin bir kopyasını, uzmanlık alanında ödüllü çalışmalara imza atan bir topolog olan ve aynı zamanda dinamik sistemlerle de ilgilenen Stephen Smale'a verdi. Ardından Smale, matematik topluluğuna yaymak üzere makalenin birçok kopyasını çıkardı. Sır su yüzüne çıkmıştı; ama hâlâ adı da konulmamıştı. Bu esnada tarih, Yorke ve meslektaşı Tien Yien Li'nin "Period Three Implies Chaos" ["Periyot Üç Kaos İçerir"] başlıklı makalesinin yayımlandığı 1975'ti.

Li ve Yorke'un ortaya koyduğu şuydu: Diferansiyel denklemlerin belirli aileleri için, periyodu üç olan yalnızca bir çözüm bulunuyorsa, hem tüm muhtemel periyotları içeren sonsuz sayıda periyodik çözüm hem de sonsuz sayıda periyodik olmayan çözüm bulunmak zorundadır. Bugün kaos dediğimizde kastettiğimiz şey tam olarak bu değildir. Lorenz'in kendisi de Li ve Yorke'un keşfini, denklemlerde kaotik olmayan periyodik çözümlerin de yer almasından dolayı "kısıtlı kaos" olarak adlandırmayı tercih eder. Bu tür bir sistemin periyodik bir halde olması kuvvetle muhtemeldir. Diğer taraftaysa, Lorenz'in "tam kaos", çoğu fizikçinin yalnızca "kaos" olarak adlandırdığı durumlarda, periyodik çözümler bulunmasına rağmen sistem çok büyük ihtimalle kaotik rejime girecektir. Yine de terminoloji 1975'ten sonra evrilmiş olmasına rağmen, Li ve York'un makalesinin, modern anlamıyla bilimsel bir terim olarak "kaos"u –bilmeyerek de olsa– tanıtan ilk örnek olduğu yaygınca kabul edilir.

Dolayısıyla 1970'lerin ikinci yarısında, May'in lojistik denklemi araştırdığı sırada bulduğu davranış çeşidini tanımlamak için kullanılacak bir sözcük mevcuttu. Bütün bunlar büyüleyici görünebilir; ancak bu davranış çeşidinin tek bir biyolojik tür için dahi zar zor gerçekçi bir temsil oluşturan basit bir lojistik denklemde geçerli olmakla kalması dürüst olmak gerekirse matematikçiler dışındakilerin pek de ilgisini çekmeyecekti. Öte yandan May'in çığır açan buluşunu takip eden birkaç yıl içinde, New Mexico'da Los Alamos Ulusal Laboratuvarında çalışmakta olan Mitchell Feigenbaum 1970'lerin ortalarında buradan yapılabilecek çok daha geniş çıkarımlar olduğunu ortaya koymuştu. Feigenbaum (1945–) kaosa giden periyot katlama rotasının lojistik denkleme özgü bir özellik olmadığını, iterasyona ilişkin sürecin bir ürünü olduğunu ve sistemin de bu ürün aracılığıyla kendisine geri-bildirim uyguladığını ortaya koydu. (Bu sistem; bir hayvan nüfusu, elektrik devresindeki bir osilatör, salınımlı bir kimyasal tepkime veya [prensipte] ekonomideki iş çevrimi bile olabilir.) Önemli olan şey, sistemlerin "özgönderimsel" olması gerektiğiydi ve böyle olmaları durumunda kaosa giden rotanın aynısını –aşağı yu-

karı değil, *tam olarak*– takip ediyordu. Feigenbaum, May'in çalışmasını ele alarak periyot katlamaları arasındaki mesafelerin B'nin kaosa giden rota boyunca artması esnasında nasıl giderek kısaldığına göz attı ve bunun sonucunda bir adımın büyüklüğüyle bir sonrakinin arasında sabit bir oran olduğunu buldu. Oranın üç ondalık haneli değeri 4,669:1'dir ve hangi ardışık adımlar arasında olduğu gözetilmeksizin sabittir. Sizi kritik bir noktaya git gide yaklaştırdığı ama ona hiçbir zaman ulaştırmadığından bu davranış örüntüsü geometrik yakınsama olarak adlandırılır. Feigenbaum, baktığı tüm özgönderimsel sistemlerde periyot katlanması, çatallanma ve aynı geometrik yakınsamayla karşılaştı. Üstelik bu yalnızca aynı yakınsama çeşidi olmanın da ötesinde, –aynı 4,669:1 oranını içeren– tam olarak aynı geometrik yakınsamaydı. Feigenbaum, evrensel bir gerçeklik bulmuş ve bu hesaplamalardan çıkan gizemli 4,669 sayısına kendi ismini verme şerefine erişmişti.[4]



Şekil 3.2a *Feigenbaum diyagramında görülen kendine-benzer dallanma türünün basitleştirilmiş gösterimi.*

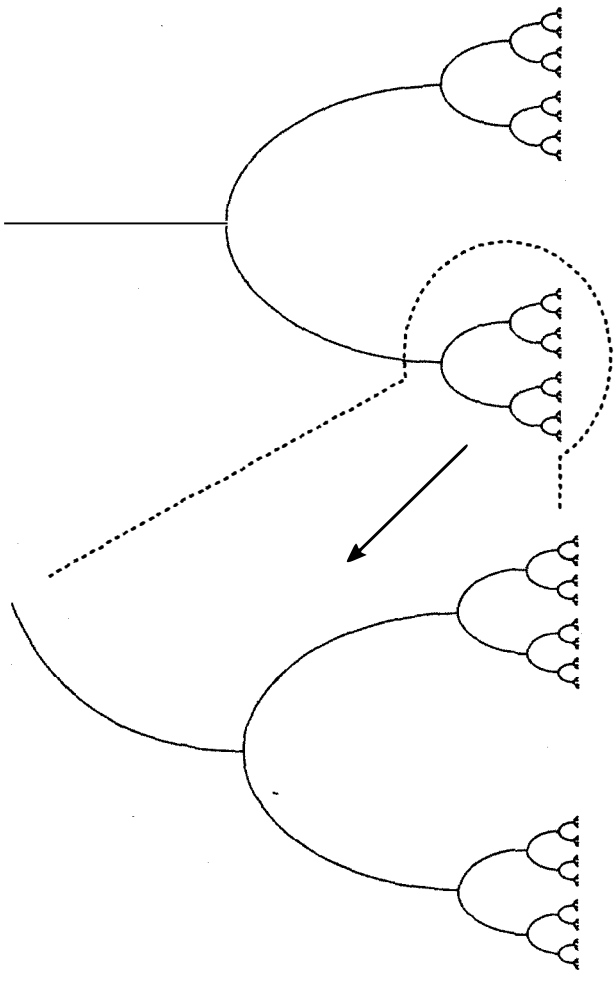
[4] Feigenbaum sayısı aslında π ve diğer birçok sayı gibi irrasyoneldir ve birkaç tane daha ondalık hane ilave edilip 4,6692016090 şeklinde yazılabilir.

Tam da basitlikten kaosa geçiş sırasında bütün o ilginçliklerin meydana geldiği, kaosa giden periyot katlama rotasına dair verilebilecek daha birçok örnek olsa da burada fazla derine inmemize gerek yok. Bunun yerine, damlayan musluk ve nehirdeki girdaplara geri dönerek neler döndüğünü görmeye başlayabiliriz. Girdaplar da çatallanmaların etkilerini barındırır. Neler olup bittiğine Leonardo'nun baktığından çok daha detaylı bir biçimde bakacak olursak türbülansı, birbirine eklenen düzenli periyodik çevrimlerin giderek artan sayısının bir sonucu olarak düşünebiliriz. (Bunu ilk olarak 1940'larda yapan kişi Rus fizikçi Lev Landau'ydu.) Basit bir girdabın içerisinde hareket, basit bir çekicinin etrafındaki bir döngüye benzer; diğer bir deyişle limit çevrimine karşılık gelir. Atılması gereken bir sonraki adım, faz uzayında bir noktanın bir çemberi izlediğini, bu çemberin merkezininse daha büyük bir çemberi izlediğini göz önüne getirmektir.

Bunun sonucunda ortaya çıkan çekici bir torus[5] olacaktır. Bu, bir bisiklet lastiğinin iç lastiğine veya eski tarz bir can yeleğine benzer bir şekildir. Nokta, küçük çemberin çevresinde düzenli biçimde döndüğü sırada küçük çember de büyük çemberin çevresini düzenli biçimde izlediğinde sistemin halini temsil eden noktanın düzenli ve tahmin edilebilir şekilde izleyeceği yol, tıpkı kıvrık bir yayınkine benzer. Tipik biçimde, faz uzayındaki iki periyodik hareket birbirleriyle etkileşime girer ve tekrar eden bir ritmin içinde hapsolurlar.

Türbülansa giden yolda giderek karmaşıklaşan ilerideki davranış aşamalarını çok sayıda boyutu olan "toruslar" bağlamında açıklamak matematiksel açıdan anlaşılır olacaktır. Bir limit çevrimi iki boyutta yer alan tek boyutlu bir çekicidir. Bir yüzeyse üç boyutlu bir faz uzayı içerisinde yerleşik iki boyutlu bir çekicidir. Mantıklı olarak sıradaki adımda, dört boyutlu bir faz uzayında yerleşik üç boyutlu bir çekici vasıtasıyla açıklanan bir davranış örüntüsü yer alması gerekliyse de gerçek dünya bu rotada daha ileri gitmez. Hemen sonraki adımda

[5] Üç boyutlu uzayda bir çemberin, aynı düzlemde yatan ama çembere değmeyen bir doğru etrafında döndürülmesiyle elde edilen torus, bir yüzeydir –çn.



Şekil 3.2b *Kendine-benzerliğin basitleştirilmiş gösterimi.*

türbülans oluşur. Burada sistemin halini temsil eden nokta torusun iki boyutlu yüzeyinde kalmakta, ancak torusun yüzeyinde çok daha karışık biçimde, faz uzayındaki bir noktadan ikinci bir defa asla geçemeyecek bir yolu izleyerek dolanmaktadır. (Çünkü geçseydi, sistem periyodik olacak ve davranış tekrarlanacaktı.) Dolayısıyla temsili nokta da kendi üzerinden

geçmeyecektir. Tipik biçimde, orijinal üç cisim probleminde de aksettiği gibi, faz uzayındaki üç veya daha fazla periyot, tekrarlayan bir ritme hapsolmaz ve bunların birleşik etkisi, kısıtlı üç cisim problemindeki küçük parçacığın yörüngesinden daha öngörülebilir değildir. (Buna rağmen, *tamamen belirlenimci* olduğunu üstüne basarak veya çok sık söyleyemeyiz.) Sistemi tanımlayan noktanın faz uzayındaki güzergâhı, sonlu bir yüzeyin etrafında kendi üzerinden bir daha geçmeyen ve karmaşık bir biçimde sarmalanmış sonsuz uzun bir çizgiye karşılık gelecekti. (Burada, daha sonra kısaca ele alacağımız bir güçlük daha söz konusudur.) Paris'te çalışan Belçikalı David Ruelle ve Hollandalı meslektaşı Floris Takens, 1971'de yayımladıkları bir makalede bu varlığı "tuhaf çekici" olarak adlandırdı.

Fraktallerin hikâyeye dahil olduğu yer işte burasıdır. İleride de göreceğiz ki bunlar da isimlerini kaos gibi 1975'te almış ve yine kaos gibi, bu tarihten önce de kıymetleri yeterince bilinmeden uzun süre bilim camiasında gözükmüşlerdir. Şimdi fraktaller olarak adlandırdığımız varlıklar on dokuzuncu yüzyıl sonlarında matematikçilerin şaşkınlığı (ve hatta korkusu) eşliğinde keşfedildi. O dönemde fraktaller, anormal sapkınlıklar, –ana akım matematiğin düzenli dünyasına uymayan "canavarlar"– olarak değerlendiriliyordu. Onların tuhaflıklarını tüm ayrıntılarıyla ortaya koyan bir örneğe bakarak bunun nedenini anlamak mümkündür.

1890'da Giuseppe Peano (1858-1932), bir düzlemi tamamen dolduracak bir eğrinin nasıl oluşturulduğunu açıkladığı bir makale yayımladı.[6] Bu, matematikçi olmayan biri için çok da dehşet verici değildir. Yine de bir düşünün: Bir düzlem iki boyutludur; uzunluğu ve genişliği vardır. Bir çizgiyse tek boyutlu bir varlıktır. Uzunluğu vardır; ama genişliği yoktur. Peano, bir çizginin eğilip bükülerek, kendisini hiç kesmeden düzlemin her noktasından nasıl geçirilebileceğini gösterdi. Tek boyutlu bir çizgi, iki boyutlu bir düzlemi tamamen dolduruyordu! Düzlem üzerindeki tüm noktalar tek bir çizgi üzerinde yer alıyorsa düzlem nasıl "gerçekten" iki boyutlu olabilir? Dahası da

[6] Sadece bir yıl sonra David Hilbert (1862-1943) da aynı keşfi gerçekleştirdi.

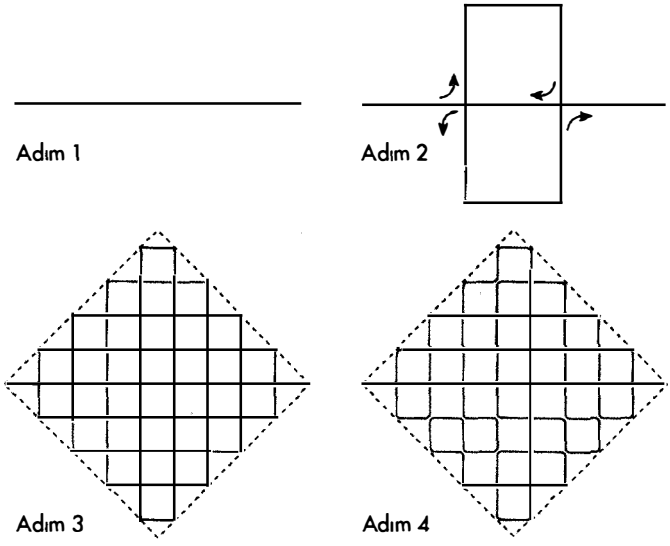
var: Düzlemi kare olarak ele aldığınızda Peano Eğrisi, düzlemi tuğlalar gibi dolduran bir küçük kareler kümesinin ana hatlarını takip eder. Her bir küçük karenin içinde eğri, benzer bir "tuğlalar" kümesini takip eder vs. Örüntü kendine-benzerdir ve sonsuza dek sürer. Peano Eğrisi sonsuz uzundur; ancak içinde bulunduğu sonlu bir alan ile sınırlıdır. Bu "boşluk dolduran" eğriyle ilişkili açık bir benzetme, türbülanslı bir sistemi tanımlayan, faz uzayındaki torusun çevresine sarmalanmış çekicidir. Oysaki 1890'lı yıllarda bunlar bilinmiyordu. Bu tip varlıkları açıklamada kullandığımız dil, New York'taki Yorktown Heights'ta, IBM'in Thomas J. Watson Araştırma Merkezinde çalışan Benoit Mandelbrot tarafından en nihayetinde 1970'lerde geliştirilecekti.

1924 Varşova doğumlu Mandelbrot, yeni bir bilim dalının kurucusu olmasını sağlayan çok zengin bir özgeçmişe sahipti. Ailesiyle birlikte Fransa'ya taşındı ve 1944'teki Kurtuluşun ardından Paris'te çalıştı. Princeton'daki İleri Araştırmalar Enstitüsü ve Caltech'teki deneyimleri sonrasında 1955'te Fransa'ya dönen Mandelbrot, artık yerleşeceği Yorktown Heights'a taşınmak üzere 1958'de ABD'ye geçti. Mandelbrot, Peano Eğrisi gibi bir cismin –bu durumda 1 ile 2 arasında bir yerde bulunan– ara boyuta sahip olduğu tanımlamasının yapılabileceğinin farkına vardı. Düzgün bir çizgi hâlâ tek boyutlu, bir düzlemse hâlâ iki boyutlu bir cisimdi. Ne var ki matematik, tıpkı her rasyonel sayı arasında sonsuz sayı olduğu fikrini kabul etmek zorunda kaldığı gibi, tam sayı boyutlu olmayan, ara boyutlu varlıkların var olduğu fikrini de kabul etmek durumunda olacaktı. Bu tip bir varlığın boyutu tam sayı değilse kesirli olmak zorundadır. Mandelbrot bu varlıkları tanımlayacak sözcükle ilgili olarak, "Fraktal sözcüğünü 1975'te, Latin dilinde kırık (parçalanmış ve düzgünsüz) bir taşı tanımlayan *fractus* sözcüğünden türettim" demiştir.[7] Bunu dilerseniz aynı Latince kökene sahip "*fractional*"[8] sözcüğünün bir kısaltması olarak düşünebilirsiniz.

---

7 Mandelbrot'nun bu katkısını Nina Hall tarafından derlenmiş *The New Scientist Guide to Chaos*'ta görebilirsiniz.

8 *Fractional* sözcüğü İngilizce'de kesirli anlamına gelir –çn.



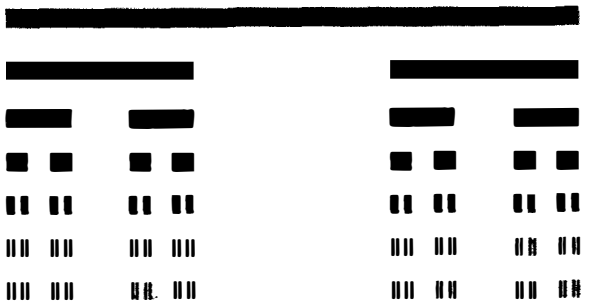
Şekil 3.3 *Peano Eğrisi: Kendisinin bir yüzey olduğunu düşünen bir çizgi.*

1975 öncesinde on yıllar boyunca korkunç matematiksel canavarlar olarak bilinen başka üç fraktal daha mevcuttur ki tüm bunların kaosla olan ilişkisine geçmeden önce bunlarla ilgili bilgi edinmek daha doğru olur. Bu üç fraktalin en eskisi (diğer bir deyişle bunların matematikçiler tarafından ilk keşfedileni) 1883'te Alman matematikçi Georg Cantor'un (1845-1918) keşfettiği Cantor Kümesidir.[9] Peano Eğrisi, bir çizgiden de öte ve bir düzlem "olmaya çalışan" bir çizgidir. Cantor Kümesiyse bir çizgiden daha azı ve bir nokta "olmaya çalışan" bir çizgidir. Bir Cantor Kümesinin nasıl oluşturulacağını açıklamak basittir. Üç eşit parçaya bölünmüş düz bir çizginin 3'te 1'lik parçalarından ortadakini silin. Bunu yaparken çizgi üzerindeki tam üçte bir ve üçte ikilik mesafede bulunan noktaları silmeme-

[9] Bu küme, zeki ancak geri planda kalmayı tercih eden Dublin doğumlu matematikçi Henry Smith (1826-1918) tarafından evvelce keşfedilmişti ve Cantor'un bundan haberi yoktu. Smith'in vefatının ardından keşfin üstünün örtülü kalması, kümeye Cantor'un adının konması sonucunu doğurdu.

ye dikkat edin. Şimdi elinizde, her biri başlangıçtaki çizginin üçte biri uzunlukta olmak üzere, çizgilerle eşit uzunluktaki bir boşluk tarafından ayrılmış iki çizgi kalmış oldu. Tüm çizgiler silinip düzgün bir örüntü içerisinde yerleşmiş ve aralarında boşluklar bulunan sonsuz sayıda nokta kalana dek bu yönteme iterasyon uygulayın. Karşı karşıya kaldığınız şey 0 ile 1 arasında ara boyuta sahip bir fraktal olan Cantor Kümesidir. Bu, tıpkı *Alice Harikalar Diyarında* adlı masaldaki Cheshire kedisinin giderek kaybolan sırıtışı gibi, ilk çizginin bir tür hayaletidir. Ne kadar basit (ve görsel olarak etkileyicilikten uzak) olsa da Cantor Kümesinin öne çıkan özellikleri onu kaos meselesinde önemli bir yere oturtur. Bu özelliklerden biri, kaosun kilit öğelerinden biri olan iterasyon (geri-bildirim) sayesinde ortaya çıktığıdır; diğeriyse kendine-benzer olduğudur. İterasyon aşamamızdan (elimizde dört çizgi kaldığı andan) itibaren her aşamada Cantor Kümesi, kendisinin tamı tamına aynı, üçte bir oranında küçültülmüş iki kopyasından oluşur. Cantor Kümesiyle ilgili söylenmesi gereken bir şey daha vardır: Kaosa giden periyot katlama rotasını temsil eden çatallanma şemasına geri dönersek, kaosun devreye girdiği tam o noktada (kimi zaman Feigenbaum Noktası olarak adlandırılan, çatallanmalar arasındaki daima-azalan aralıkların yöneldiği limitte), kaos devreye girmeden önceki sürecin son adımında, çatallanma ağacının tüm dallarına ait uçların tamamı bir Cantor Kümesi meydana getirir. Bu, fraktaller ve kaos arasındaki derin ilişkinin varlığına dair ipucu teşkil etmekten de öte bu ilişkiye tamamıyla ışık tutar.

Cantor Kümesi Benoit Mandelbrot'nun kendisine ün kazandıran çalışmasında izlediği yollardan biri olduğundan, fraktallerin tarihinde de önemli bir yere sahiptir. Mandelbrot, sözcüklerin bir metnin içindeki dağılımı, büyük ve küçük şehirlerin ülke çapında dağılımı ve borsadaki iniş çıkışlar gibi her çeşit zaman-değişimli ve mekân-değişimli olgu ve örüntüye ilgi duyuyordu. IBM'de araştırmacı olarak çalışmaya başladıktan kısa bir süre sonra Mandelbrot, şirket için pratik anlamda büyük önem taşıyan bir problemle uğraşmaya koyuldu. Şimdiki gibi o zaman da veriler bilgisayarlar arasında telefon



Şekil 3.4 *Cantor Kümesi. Metinde anlatıldığı gibi her çizginin üçte birlik parçalarından ortadakinin silinmesiyle, sonsuz sayıda nokta içeren ancak toplam sıfır uzunluktaki bir toz kümesiyle karşılaşırsınız.*

hatları vasıtasıyla iletiliyordu ve bu işle ilgilenen mühendisler, hatlardan çıkan gürültülerden, bazı verilerde bozukluk yaratmaları nedeniyle rahatsızlık duyuyordu. Telefon hatlarının asıl icat edilme amacı olan konuşma sesleri için bu sorun oluşturmasa da (konuşma esnasında bir cızırtı meydana geldiği takdirde sesinizi yükseltebilir veya söylediğinizi tekrarlayabilirsiniz) o erken dönemde veri iletimi önemli ölçüde hasara uğruyordu.[10] Mühendislerin verdikleri ani tepki aslına bakılırsa gürültüyü bastırmak amacıyla bağırmaya benzer biçimde, sinyalin gücünü artırmak oldu; yine de hâlâ zaman zaman meydana gelen rastlantısal bir gürültü patlamasının bir parça verinin silinmesine şahit olunmuyor değildi.

Rastlantısal ve öngörülemez olmasına rağmen bu gürültünün patlamalar şeklinde ortaya çıkıyor gibi gözükmesi tuhaftı. Aktarımların hatasız olarak gerçekleştiği oldukça uzun zaman aralıkları olabiliyor ve bunları, tekrarlı gürültü patlamaları içeren aralıklar öngörülemeyecek biçimde takip edebiliyordu. Mandelbrot problemi incelediğinde, örüntünün kendinebenzer olduğunun farkına vardı. Sessiz bir aralık hiç gürültü içermezken, gürültülü bir aralıkta her zaman biri sessiz, diğeri gürültü patlamaları içeren daha kısa aralıklar yer alıyordu. Bu

[10] Bu tür bir problem dijital veri iletimi yoluyla büyük ölçüde giderilse de söz konusu dönemde henüz analog sinyaller kullanılıyordu.

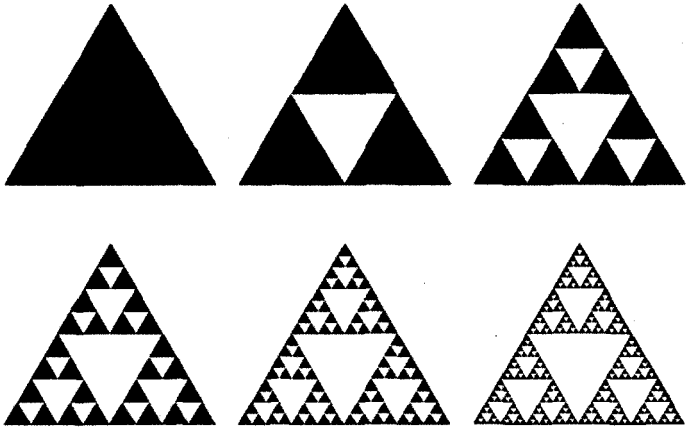
daha kısa gürültülü aralıklar içerisinde de örüntünün tümü –Mandelbrot'nun söyleyebildiği kadarıyla, sonsuza dek– yineleniyordu. Bununla beraber Mandelbrot, gürültülü aralığın uzunluğunun sessiz aralığın uzunluğuna oranının her ölçek için aynı olduğunun farkına vardı. Aslında aktarım sistemindeki gürültü patlamalarının dağılımı Cantor Kümesindeki noktaların dağılımıyla aynıydı. Bu, IBM'deki mühendisler için pratik çıkarımların belirmesi anlamına geliyordu. Keşif, sistem daima gürültülü olacağından, sinyallere takviye yapmak için daha da para sarf etmek yerine, hataları tespit ederek mesajların bozuk kısımlarını tekrarlamaya yarayacak teknikler geliştirmeye ağırlık vermenin daha anlamlı olacağına işaret ediyordu. Aynı zamanda, esasında rastlantısal olan hatalara, verimsizce (tellere sürtünen ağaç dalı gibi) fiziksel bir sebep arama görevinden kurtulan insanlar (örüntüye uymayan, dolayısıyla muhtemelen sahiden de fiziksel bir sebepten doğmuş olan gürültülerin kaynağını bulmak da dahil olmak üzere) daha üretken işlere koyulabilecekti. Mandelbrot, bir insan teknolojisi içinde kaosun iş başında olduğunun farkına varılan ilk örneklerden birini bulmuş ve onu en başından, henüz ne kaos ne de fraktallerin adı konmuşken fraktallerle ilişkilendirmişti.

Bu kitabı hazırlarken yerel bir haber gözümüze çarptı. Habere göre, Mandelbrot'nun dikkatini kaosa yönelten sürecin bir benzeri, civardaki bir köyde gerçekleşiyor olabilirdi. Köylüler bir önceki yıl tekrar tekrar meydana gelmiş güç kesintilerinden dert yanıyordu. Elektrik tedarikçisi şirketinse her güç kesintisi için kusursuz derecede mantıklı birer açıklaması bulunuyordu. Bunlar, bir kuğunun enerji hava hattına dalması, fırtına sebebiyle ağaçların tellere dolanması, yıldırım düşmesi gibi gerekçelerdi. Yine de köylüler sistemde bir hata olduğu konusunda diretiyordu. Güç dağıtım ağında bir yerlerde böyle birtakım yerel afetlerin zaman zaman gerçekleşmek zorunda olduğunu şimdi kaos teoremi bize söyleyebilse de bunların nerede ve ne zaman gerçekleşeceğini söyleyemez. Bu da kesintilerden etkilenen insanları yeterince tatmin etmeyecektir.

Rastlantısal süreçler, kaos ve fraktaller arasındaki bağlantılara açıklık getirmek için bir başka matematiksel canavara

bakabiliriz. Bu seferki canavarımız, Polonyalı matematikçi Waclaw Sierpinski (1882-1969) tarafından matematik dünyasına 1916'da tanıtılan ve Sierpinski Contası olarak bilinen yapıdır. Bir Sierpinski Contası oluşturmaya yönelik talimatlar basit ve tekrarlanan bir iterasyon içerir. Bir kâğıt parçası üzerine çizili (ya da günümüzdeki gibi bir bilgisayar ekranında temsil edilmiş) olan içi karalanmış bir eşkenar üçgeni ele alın. İşin doğrusu bu üçgen *eşkenar* olmak zorunda değildir; ama gözünüzde canlanması açısından böylesi daha faydalıdır. Şimdi, üçgenin kenarlarının orta noktalarını birleştirerek üçgenin ortasında ters şekilde duracak başka bir üçgen oluşturun. Sonra bu yeni üçgeni silin ve etrafı üç adet düz siyah üçgenle çevrili ters bir beyaz üçgen oluşturun. Atılacak sıradaki adımı tahmin ediyorsunuzdur: İşlemi her küçük siyah üçgen ve bundan sonra oluşacak daha da küçük dokuz siyah üçgen için (prensipte sonsuza dek) tekrarlayarak devam edin. Karşı karşıya kalacağınız şey, kendine-benzer olduğu açıkça görülen bir varlık ve yine 1'le 2 arasında bir boyuta sahip bir fraktal olan Sierpinski Contasıdır. (Fraktal boyutların nasıl ölçüldüğüne az sonra değineceğiz.)

Sierpinski Contasını oluşturmak için uygulayabileceğiniz aynı basitlikte ancak sabır gerektiren bir yöntem daha vardır. Bunun için tüm yapmanız gereken, bir kalem kuşanıp bir kâğıt parçası üzerine bir eşkenar üçgenin köşelerini temsil eden üç nokta işaretlemek ve sonrasında dürüst ve basit bir zar atışıyla 1, 2 veya 3 sayılarından birisini rastgele seçmek. Zarın altı yüzü olduğundan 4'ün 1'i, 5'in 2'yi, 6'nınsa 3'ü temsil ettiğini kabul edebilirsiniz. Üçgeninizin köşelerini 1, 2 ve 3 diye tanımlayın. Şimdi kâğıdınızın üzerinde seçeceğiniz herhangi bir noktayı başlangıç noktası olarak işaretleyin ve zarı atın. 1 ya da 4 gelirse başlangıç noktanız ile 1 olarak tanımlamış olduğunuz nokta arasındaki mesafenin tam ortasına bir nokta yerleştirin. Zar 2 ya da 5 gelirse başlangıç noktanız ile 2 olarak tanımlamış olduğunuz nokta arasındaki mesafenin tam ortasını işaretleyin. 3 ya da 6 gelirse aynı işlemi başlangıç noktanız ve 3 olarak tanımlamış olduğunuz nokta için uygulayın.

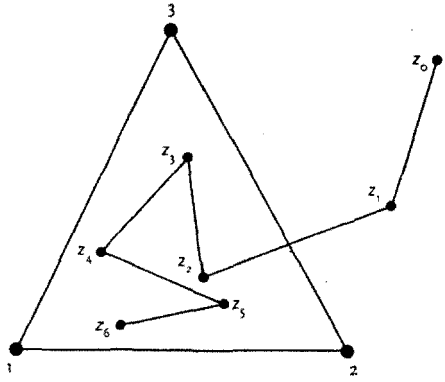


Şekil 3.5 *Sierpinski Contası.*

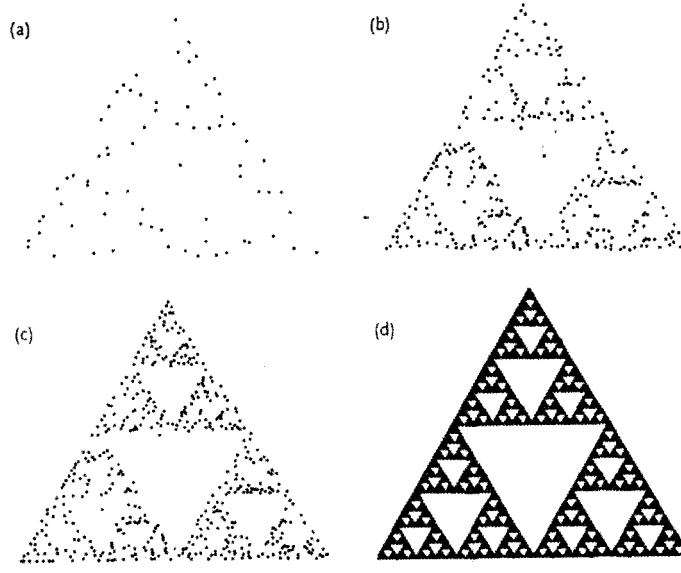
İşaretlemiş olduğunuz yeni noktayı yeni başlangıç noktanız olarak kabul edip yeniden zar atın ve bunu tekrarlayın ve tekrarlayın, tekrarlayın, tekrarlayın. İlk birkaç noktadan sonra kâğıt parçası üzerinde oluşan noktalar örüntüsü, bir Sierpinski Contası şeklini çok yavaşça ortaya çıkarır. Çok basit bir kurala dayanan tamamen rastlantısal bir iterasyon işlemi, fraktal bir örüntü oluşturmuş oldu. Bu özel işlem için çekici görevini sahiden de Sierpinski Contası üstlenir. Oysa iterasyondaki ilk adımlar tam olarak contanın üzerinde değildir; contanın üzerinde olmayan bir yerde başlayıp conta tarafından çekildikçe ona doğru hareket eder. Çekicinin bir fraktal olması, Ruelle ve Takens'ın diliyle onu "tuhaf çekici" yapar. Bu fraktaller günlük yaşantımızda karşılaştığımız (üçgen, elastik bant gibi) nesnelerden belirgin biçimde farklıdır. Yine de, bu birkaç başlangıç noktası haricinde, oyuna nereden başlarsanız başlayın Sierpinski Contasıyla karşılaşırsınız. Oysa bu oyunu (benzer biçimde basit iterasyon kurallarından birçok ilginç örüntünün üretilebildiği ve kimi zaman kaos oyunu olarak adlandırılan oyunun basit bir versiyonunu) oynamaya niyetiniz varsa size iki uyarımız olacak. Bunlardan ilki, Sierpinski Contasına benzer bir şeyi görene dek atmanız gereken birkaç yüz adım oldu-

ğundan, sabırlı olmanızdır. İkinciyse rastlantısallıktan ödün vermemenizdir; ancak yalnızca rastlantısal sayılar kullandığınızdan emin olacak kadar iyi bir programcıya sahip değilseniz bilgisayar kullanmak konusunda ısrarcı olmayın. Maalesef, bilgisayarlardaki rastlantısal sayı üreticileri her zaman gerçekten de rastlantısal olmayabilmektedir; ama elbette yeterince becerikliyseniz bu sorunun da üstesinden gelebilirsiniz.

Bu tür basit bir kural doğrultusunda bir kâğıt üzerinde (sayılarınızın rastlantısal olduğundan eminseniz bir bilgisayar ekranında) rastlantısal biçimde tekrarlayan nokta işaretleme fikrine dayandığı sürece, kaos oyununda değişiklikler yaparak eğrelti otu ve ağaç gibi canlılara hayret verici derecede benzeyen fraktal görüntüler elde edebilirsiniz. İlginizi çekiyorsa, buna ilişkin matematiksel içeriği Heinz-Otto Peitgen, Hartmut Jürgens ve Dietmar Saupe'nin *Chaos and Fractals* adlı kitabında bulabilirsiniz. Canlıların gelişerek karmaşık biçimlere aynı bu yolla ulaştığını söylemiyoruz; ancak burada bizi bağlayan nokta, çok basit bir kuralın tekrarlanarak uygulanışıyla bu denli karmaşık gözüken sistemlerin üretilebilmesinin veya açıklanabilmesinin mümkün olduğudur. Her canlı varlığın her bir hücresindeki DNA'da saklanan bilginin, o bireyin nasıl inşa edildiğini tanımlayan bir "taslak" içerdiğine dair genel bir kanı mevcuttur. Ne var ki bu aslında zayıf bir benzetmedir. Gerçek bir taslak, canlının sisteminin içindeki her şeyi ve bunların nasıl bir araya geldiğini detaylı biçimde tasvir eden bir çizim manasına geleceğinden, çok karışık olacaktır. Bir kek tarifi daha iyi bir benzetme teşkil eder. Tarif (pişmiş kekteki her kuru üzüm tanesinin kesin konumu bir yana) kekin son halinin nasıl görüneceğini söylemez. Onun yerine "Şu malzemeleri alın, güzelce karıştırın ve şu kadar dakika boyunca şu sıcaklıkta pişirin" der.



Şekil 3.6a *Kaos oyunuyla Sierpinski Contasının oluşturulması. Oyundaki ilk altı adım.*



Şekil 3.6b *Oyunun 100, 500, 1000 ve 10.000'inci adımlarından sonraki halleri.*



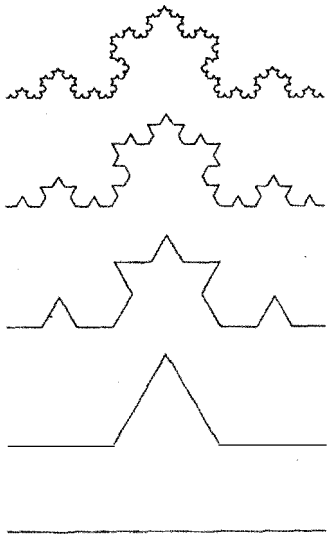
Şekil 3.7 *Kaos oyununda yapılan bir değişiklik eğrelti otuna benzer bir örüntü meydana getirir.*

Böyle bir tarif, kaos oyunundaki bir adıma benzer. Gelişip bir insanı, bir çam ağacını veya diğer herhangi bir canlıyı oluşturacak olan tek bir hücrede bulunan DNA'nın zenginliğinde dahi, canlının son erişkin biçiminin içereceği tüm karmaşık yapılara dair nasıl hakiki bir taslak saklanabildiğini kavramak zordur. Diğer tarafta, "*n* adım boyunca her adımda boyutunu ikiye katla, sonra ikiye bölün ve aynı şeyi her dal için tekrarla" gibi basit talimatların o DNA'da nasıl saklanabileceğini kavramak çok daha kolaydır. Kaos oyununda yer verilecek biraz daha çetrefilli talimatlar iterasyon vasıtasıyla eğrelti otu gibi karmaşık yapılar meydana getirir. Eğrelti otu için bir çekici bulunuyorsa, sözünü ettiğimiz basit kural türünü temel alarak, bazı bitkilerin büyüyüp eğrelti otu haline gelmesi hiç de şaşırtıcı olmayacaktır. Kaldı ki tek bir zar nasıl Sierpinski Contasını oluşturmaya programlanmış değilse bu bitkilerin de o şekle girmeye programlanmış olma zorunluluğu yoktur. Dünyanın karmaşasına sebep olan, rastlantısallıkla beraber basit bir iterasyon kuralı veya kurallarıdır.

Karmaşık dünyamızın doğasına daha yakından göz atmadan önce fraktaller ve çekiciler hakkında hâlâ bahsedilmeye değer birkaç şey daha var. Hiç şüphesiz merak ettiğiniz, bir kesirli boyutun nasıl ölçüldüğü konusu da bunlardan biri. İşimizi kolaylaştırmak amacıyla detaylı olarak bahsedeceğimiz, on dokuzuncu yüzyıl sonları ve yirminci yüzyıl başlarındaki son matematik canavarı olan Koch Eğrisini ele alalım. İlginç olması bir yana, Koch Eğrisi 1960'larda Mandelbrot'nun fraktallere olan ilgisini körüklemeye yardımcı olmasından ve değinmiş olduğumuz bir adamın, Lewis Fry Richardson'un hayatına mecazi anlamda teğet geçmesinden dolayı hikâyemizde önemli bir yer tutar. Koch Eğrisiyle ilgili sıra dışı şeylerden biri, onun gerçekten de bir eğri olmasına rağmen herhangi bir şeye teğet olarak temas etmesinin yalnızca mecazi anlamda mümkün olmasıdır. Bu, Koch Eğrisinin hiçbir teğetinin olmamasından ve günlük dildeki anlamıyla, tamamen köşelerden oluşmasından kaynaklanır.

İsveçli matematikçi Helge von Koch (1870-1924) bu eğriyi keşfederek (ya da icat ederek) 1904'te yayımladığı bir makaleyle dünyaya tanıttı. Koch Eğrisinin inşa edilişini kafanızda canlandırmak zor değildir. Düz bir çizgiyle başlayın ve onu üç eşit parçaya bölün. Çizginin ortasındaki üçte birlik parçanın üzerinde bir eşkenar üçgen (bu sefer gerçekten eşkenar olmak zorunda) oluşturduktan sonra bu üçgenin tabanını silin ve bu işlemi sonsuz bir iterasyonla tekrarlamaya devam edin. Böylelikle tamamen sonsuz küçüklükte V-biçimli köşelerden oluşan Koch Eğrisini meydana getirmiş olacaksınız. Koch Eğrisi, orijinal düz çizgiyle aynı uç noktaları paylaşır ve yüksekliği orijinal çizgiye çok yakın bir mesafededir. Tüm bunlara rağmen aynı zamanda sonsuz uzundur.

İşlemin içeriğinde küçük değişiklikler de yapabilirsiniz. Eğriyi oluşturma aşamasında –elbette ki aynı boyuttaki– üç orijinal üreteci alıp eşkenar bir üçgenin kenarlarına yerleştirirseniz altı-uçlu Davut Yıldızını meydana getirebilirsiniz. Birkaç iterasyon sonrasında karşınıza çıkan eğrinin pürüzlü iskeleti, bir kar tanesininkini andırdığından bu yapı kimi zaman Koch Kar Tanesi olarak adlandırılır. Ne var ki iterasyonlar



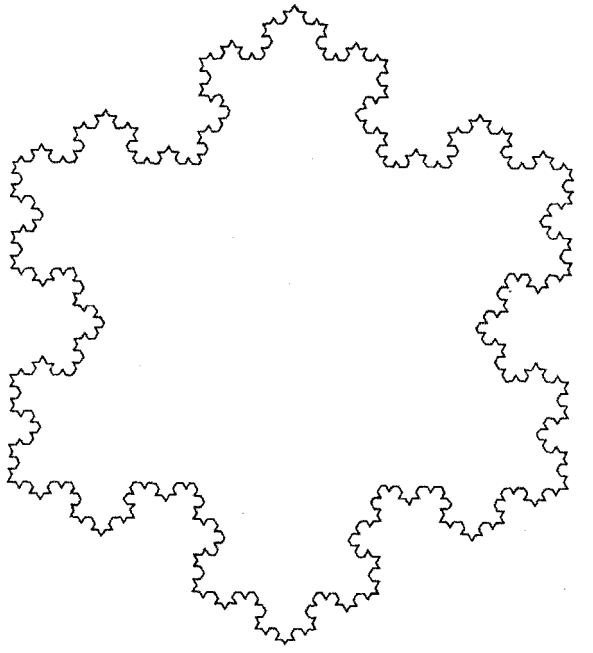
Şekil 3.8 *Koch Eğrisi. İngiltere veya Norveç'teki gibi tırtıllı bir kıyı şeridi ile bu eğri aşağı yukarı aynı fraktal yapıya sahiptir.*

ilerledikçe kırışık, eğri, tırtıllı bir kıyı şeridine benzemeye başlar ve böylece bu özel fraktalin son sınır durumuna, diğer bir deyişle Koch Adasına erişilmiş olur.

Koch Adası, orijinal Davut Yıldızının üreticisinin uç noktalarının dokunduğu bir çember tarafından tamamen çevrili olmasına rağmen, sonsuz uzunlukta bir "kıyı şeridine" sahiptir.

Peki gerçek kıyı şeritleri fraktal midir? Koch Adasının gerçek bir adaya olan benzerliği yalnızca bir benzetmeden mi ibarettir? Mandelbrot'nun fraktalleri araştırmasının fitilini ateşleyen aslında bu çeşit sorulardı ve onun söylediğine göre,[11] Richardson'un İspanya ile Portekiz ve Belçika ile Hollanda arasındaki sınırların uzunluğunun nasıl hesaplanacağı üzerinde kafa patlattığı, pek duyulmamış bir makalesini okumasıyla tetik çekilmişti. Farklı kaynaklardan aynı sınır için alıntı yapılmış uzunluklardaki yüzde 20'lik bir fark Richardson'un gözüne çarpmıştı. Bu farkın ortaya çıkmasının sebebi, böyle

[11] *Chaos* [*Kaos*] adlı kitapta James Gleick tarafından alıntılanmıştır.



Şekil 3.9 *Koch Kar Tanesi.*

kıvrımlı bir çizginin ölçtüğünüz uzunluğunun onu ölçerken kullandığınız ölçeğe bağlı olmasıdır. Bu sınırlar boyunca düz bölümlerin de bulunması mümkün olsa da çoğu zaman bunlar nehir ve sıradağlar gibi doğal yer şekillerini izler.

Böyle bir sınırın ölçülmesi, arazi ölçüm aletleri ve tüm alelade yer ölçüm aygıtları vasıtasıyla, ölçüm noktalarının yüzer metre aralıklarla yerleştirilip kırsal alan boyunca zikzaklar çizerek uzanan 100 metrelik düz çizgilerin ölçülmesi sayesinde gerçekleştirilebilir. Sınırı adımlarınızla ölçmek istediğinizdeyse, bu ölçüm noktaları arasındaki bazı kıvrımları takip edeceğiniz için sınırın uzunluğuna yönelik daha farklı ve büyük bir değer elde edersiniz. Devir sayısını kaydetmeye yarayan sayaçlı bir tekerleği sınır boyunca itekleyerek ölçüm yaptığınızda, adım atarken atlamış olduğunuz küçük kıvrımları didiklemek zorunda kalacağınızdan daha büyük bir değere ulaşırsınız.

Çok uzun bir ip alıp sınır boyunca özenle yerleştirdiğinizdeyse daha da yüksek bir değer karşınıza çıkar vs. Burada anlatmak istenilen, sınırın tüm ölçeklerde (en azından, atomların düzeyine dek) prensipte düzensiz olabileceğidir. Diğer bir deyişle, çalıştığınız ölçek küçüldükçe daha fazla kıvrımla karşılaşırsınız ve sonuç olarak hesapladığınız sınırın boyu da daha uzun gözükür. Mandelbrot, 1967'de *Science* dergisinde yayımlanan "How Long is the Coast of Britain?" [İngiltere Kıyıları Ne Kadar Uzundur?] başlıklı makalesinde bu fikirleri ayrıntısıyla inceliyordu. Bir adanın kıyısına bu tartışmada yer vermek, kıyının özünde doğal olması ve insan eliyle çizilmiş bir sınırda görülebilecek (ABD'nin çoğu eyaletini ayıran sınırlardaki gibi) uzun düz çizgiler bulundurmaması sebebiyle daha uygundur. Mandelbrot'nun sorusunun –makalede ayrıntılı olarak verilen– cevabı şuydu: Sonuç, kıyının ölçümünü hangi ölçekte yaptığınıza bağlıdır ve yeterince hassas ölçeklere indiğinizde, ölçtüğünüz uzunluk gittikçe sonsuza yaklaşır. (Sonsuza sadece "yaklaşır"; çünkü atomların ölçeğine indiğinizde işler değişir). İngiltere'nin kıyı şeridi tam olarak Mandelbrot'nun ileride fraktal olarak adlandıracağı yapıya sahip olmasa da, onun 1 ile 2 arasında bir ara boyutu olan bir fraktale benzediği sonucu karşımıza çıkar.

Peki fraktal boyutu nasıl ölçeriz? Koch Eğrisi bu sorunun cevabına yönelik bir ipucu sağlar. Kendine-benzer Koch Eğrisinin dört bölümünden herhangi birini alıp 3 kat büyüttüğünüzde (üç ile "ölçekleme" yaptığınızda) orijinal Koch Eğrisine özdeş bir eğri elde edersiniz. Ne var ki bir şeyin kendine benzer olması, onun mutlaka fraktal olacağı anlamına gelmez. Sıradan bir küp de kendine-benzerdir. Küpün içerisinden kesip çıkarttığınız küçük bir küpü uygun çarpanla ölçeklediğinizde bu küp tıpkı orijinal küpe benzeyecektir. Kaldı ki bu ***her*** küçük küp için geçerli olacaktır. Kendine-benzerlik, küp gibi çoğu sıradan cisim için her ölçekte işlerken, fraktaller için sadece belirli ölçeklerde işler. Koch Eğrisi için orijinal eğrinin tam olarak dörtte birini (hem de öylesine dörtte birlik bir kısmını değil) almak ***zorundasınız*** ki aldığınız kısmı 3 ile ölçekleyerek orijinal eğriyi yeniden üretebilesiniz. Ayrımı belir-

ginleştirmek adına, sıradan birkaç şey seçip aynı 3 çarpanıyla ölçekleyelim. Düz bir çizgiyi üç eşit parçaya bölüp bunlardan birini 3 çarpanıyla ölçeklerseniz ilk çizgiye özdeş bir çizgi elde edersiniz. Yaptığımız ölçekleme ile uzunluğun azaltılma oranı aynıdır; 3'e böler, 3'le ölçekleme yaparız. Dolayısıyla çizginin boyutu 1'dir. Bir kareyi alıp her kenarını 3'e böldüğünüzde dokuz küçük kareden oluşan bir örgü ortaya çıkar. Dolayısıyla, ilk karenin özdeşini oluşturmak için orijinal karenin dokuzda birini aldıktan sonra 3'le ölçeklemeniz gerekir. 9'a bölüp 3'le ölçekleme yaparız. 9, 3^2'ye eşit olduğundan bir karenin boyutu 2'dir. Bir küpün her kenarını üçe böldüğünüzdeyse, her biri 3 çarpanıyla ölçeklendiğinde orijinal küpün aynısı gibi gözüken 27 adet küçük küp elde edersiniz. 27, 3^3'e eşit olduğundan, bir küpün boyutu da 3'tür. 27'ye bölüp, 3'le ölçekleme yaparız.

Şimdi, Koch Eğrisine tekrar bakın. Bu kez, uzunluğu 4'e böldükten sonra 3 çarpanıyla ölçekleme yapıyoruz. 3^1'in 3 olduğunu, 3^2'nin 9 olduğunu biliyoruz; ama 3'ün kaçıncı kuvveti 4'e eşittir? $3^n=4$ ise n kaçtır? Cevap, bir hesap makinesiyle (dört ondalık haneyle) 1,2619 olarak basitçe bulunabilir. Diğer bir deyişle, Koch Eğrisinin boyutu 1,2619'dur ve beklenildiği gibi 1 ile 2 arasındadır; ancak bir düzlemdense daha çok bir çizgi gibidir. Diğer fraktallerin, hatta aşağı yukarı fraktal olan şeylerin boyutlarını hesaplamak için de aynı mantık yürütülebilir. Örneğin İngiltere'nin kıyısının boyutu kabaca 1,3'tür ve bu da onun bir çizgiye, Koch Eğrisinin olduğundan biraz daha uzak olduğunu söyler.[12]

Fraktaller başlı başına büyüleyicidir. Mandelbrot'yu üne kavuşturan şey de, basit bir matematiksel ifadenin iterasyonu sonucunda fraktal yapıya sahip olduğu ortaya çıkan ve onun kendi adını taşıyan bir kümeyi keşfetmesiydi. Bunun, konu

[12] Fraktal boyut ölçmeye yönelik birbirinden çok az farkı olan ve çok az farklılıkta "cevaplar" veren yöntemler bulunur. Dolayısıyla başka bir yerde bu değere de çok az farklı bir haliyle rastlayabilirsiniz. Yine de burada ayrıntılara girmek istemiyoruz. Bırakalım da bununla matematikçiler ilgilensin. Bizim için önem taşıyan şey, fraktal boyutları ölçmeye dair en azından bir tane apaçık yöntemin bulunduğudur.

almış olduğumuz küme ve fraktallerden farkı şuydu: İfade, matematikçilerin karmaşık sayılar olarak adlandırdığı, -1'in karekökünü içeren sayılar barındırıyordu. Karmaşık sayılarla ilgili kilit nokta, sıradan sayılar bir-boyutluyken, onların bir anlamda iki-boyutlu olmalarıdır. Örneğin bir noktanın, bir çizgi üzerindeki konumunu belirlemek için tüm ihtiyacınız olan şey sıradan tek bir sayıdır. Bir noktanın karmaşık düzlem adı verilen bir düzlem üzerindeki konumunu (düzlemin her iki kenarına olan uzaklığı vasıtasıyla) belirlemek içinse, en az tek bir karmaşık sayıya ihtiyacınız vardır. Bir karmaşık sayı iki adet bilgi içerir. Mandelbrot Kümesini üreten iterasyonda, *Z*'nin değişken, *C*'ninse sabit bir karmaşık sayı olduğu (Z^2+C) ifadesi yer alır. İterasyon işlemini her zamanki yolla uygularız. Z için seçtiğimiz bir değeri ifadeye yerleştirdikten sonra, hesaplamadan çıkan sonucu bir sonraki iterasyon adımında Z'nin değeri olarak belirleriz. Z'nin değerlerinin karmaşık düzlem üzerindeki yerlerinin belirlenmesi sonucunda fraktal örüntü ortaya çıkar. Lojistik denkleminin iterasyonu gibi bunun da çok basit (ancak doğrusal olmayan) bir süreç olduğuna ikna olmanız için karmaşık sayılar hakkında hiçbir şey bilmenize gerek yoktur. Buna rağmen ortaya çıkan fraktal, insanoğlu tarafından şimdiye kadar incelenmiş muhtemelen en karmaşık varlıktır. Karmaşık olması bir yana, güzelliği nedeniyle, büyütülerek sergilendiği posterlerle ölümsüzleştirilmiş ve sayısız kitaba konu olmuştur. Ne var ki bunları incelemeye devam etmek, bizi, bu kitabın geri kalan kısmında gitmek istediğimiz yönün tam tersine (dışarıdaki canlıların dünyasına değil de, matematik dünyasının içine) yönlendirir. Mandelbrot Kümesi hakkında bir kez daha vurgulamak istediğimiz tek şey, bu olağanüstü karmaşık cismin, gerçekten de çok basit bir ifadeden iterasyon vasıtasıyla üretilmiş olduğudur. Bu açıdan bakıldığında insanoğlu tarafından incelenmiş şimdiye kadarki en basit şeylerden biridir. (Ancak, ileride göreceğimiz gibi, bu açıdan bakıldığında her şey öyledir.)

Burada irdelediğimiz kilit soru, karmaşanın basitlikten nasıl meydana geldiğidir. Bu ve kaos ile fraktaller arasındaki bağlantı, eski dostumuz lojistik denkleme dönüp onun etki-

lerini, daha önce bahsettiğimiz bir diğer karmaşa katmanını ortaya koyan topoloji bağlamında yorumladığımızda açıkça görülür. Lojistik denklemin (ve şimdiye dek bahsettiğimiz benzer türdeki iterasyon işlemlerinin) yaptığı, bir sayı kümesini başka bir sayı kümesine dönüştürmektir. Orijinal sayıları bir düzlem üzerindeki, bir kürenin yüzeyindeki veya diğer herhangi bir yüzeydeki noktalar olduğunu farz edersek bunların her biri, düzlemin başka bir yerindeki veya başka bir düzlemdeki, hatta diğer herhangi bir yüzeydeki noktalara dönüştürülebilir. Bu işlem türüne her ne kadar aşina olsak da ne olup bittiği hakkında nadiren kafa yorduğumuz bilinen bir gerçektir. Bu işleme eşleştirme adı verilir. Bir şehirde yönümüzü bulmak ya da coğrafi inceleme yapmak için kullandığımız harita çeşitlerinde gerçek dünyadaki bütün noktalar kopya edilmiş değildir. Diğer yandan bir sokak planı, aslında şehrin sokaklarının güvenilir ve bir kâğıt parçasına sığan minyatür bir kopyasıdır. Bir yerküre atlası prensipte (hemen hemen) küresel olan dünyanın hiçbir çarpıklık içermeyen güvenilir bir haritası olarak kullanılabilir. Oysa bir harita, güvenilir bir kopya olmasına rağmen aynı zamanda çarpıklık *da* içerebilir. Londra Metrosu haritası buna verilebilecek güzel bir örnektir. Her durağı temsil eden noktalar ve tüm tren hatlarını temsil eden çizgiler bulunur ve haritada bu çizgiler ile noktalar arasındaki ilişkinin temeli muhafaza edilse de daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla harita çarpıtılmıştır.

Metro haritasında yapılan çarpıtmalar bir ölçüde tercih meselesidir. Londra Metrosunun, hatlardaki tüm kıvrımları temsil eden çok daha güvenilir kopyalarını çıkartabilirsiniz. Oysaki düz bir kâğıt üzerine çizilecek bir dünya haritası çarpıtılmak *zorundadır;* çünkü yaptığınız şey bir kürenin yüzeyini bir düzlem üzerinde temsil etmeye çalışmaktır. Bu yüzden, (bu sorunu çözmede kullanılan iki farklı yöntem olan) bilindik Mercator projeksiyonu ve ünlü Peters projeksiyonundaki kıtaların şekilleri ne birbirleriyle ne de dünyanın yüzeyindeki kıtaların şekilleriyle tamı tamına aynıdır. Yine de, bunların her ikisinde de, dünyanın yüzeyindeki noktaların her biri, harita üzerinde tek bir nokta aracılığıyla temsil edilebilir. Mercator

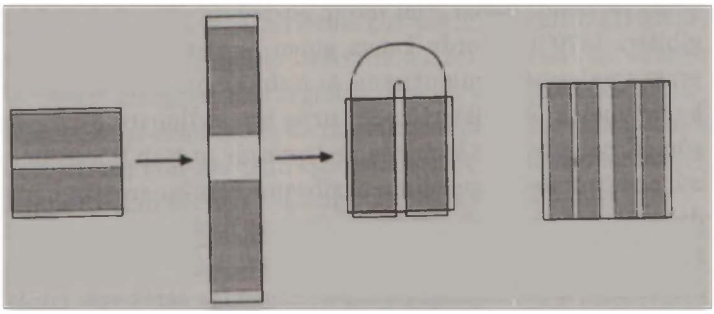
projeksiyonu ve Peters projeksiyonu aynı zamanda birbirlerinin de birer haritalarıdır. İkisi de doğaları gereği birbirinden "üstün" değildir.

Lojistik denklemin tarif ettiği işlem de bir eşleştirmedir. Düz bir çizgiyi tanımlayan bir sayı kümesine denklemin nasıl etki ettiğine bakarak bunu görebiliriz. Denklemin, aşağıdaki dönüşümü kullanarak *x*'in bir değerini yeni bir değere dönüştürdüğünü hatırlayınız:

x(sonraki) = Bx(1 – x)

Yeniden normalleştirme sayesinde *x*'in sadece 0 ile 1 arasındaki başlangıç değerlerini dikkate almamız yeterlidir. Bu başlangıç değerleri düz bir çizgiyi temsil edebilir. Dilerseniz bir metrelik bir çubuk hayal edebilirsiniz. İşimizi zorlaştırmamak adına, B için bir tamsayı olan 3 değerini seçip çizginin denklem tarafından nasıl dönüştürüldüğüne –diğer bir deyişle nasıl farklı bir noktalar düzenlemesine eşleştirildiğine– bakalım. Eşleştirmenin, orijinal çizginin onda birlik kısmı tarafından ayrılan noktalarda nasıl işlediğine bakarak olup biteni görebiliriz. *x* = 0 noktası açık şekilde 0 noktasıyla eşleşir. *x*'in 0,1 değeri –diğer bir deyişle çizginin bir ucundan onda birlik mesafe kadar içerisi– için, *x*(sıradaki) 3x0,1x0,9 veya 0,27 değerini alır. Dolayısıyla *x* = 0,1 noktası, *x* = 0,27 noktasıyla eşleşir. Benzer şekilde *x* = 0,2 noktası 0,48 noktasıyla, 0,3 noktası 0,63'le, 0,4 noktası 0,72'yle, 0,5 de 0,75'le eşleşir. Çizginin 0'dan 0,5'e kadarki bu yarısı şimdi uzamış ve 0'dan 0,75'e dek uzanan düz bir çizgi haline gelmiş oldu. Bu, sonsuzluğun başka bir tuhaf yönünü ortaya koyar: Her iki çizgide sonsuz sayıda nokta ve bu iki çizgideki noktalar arasında 1'e 1'lik bir bağıntı olmasına rağmen, çizgilerden biri diğerinin bir buçuk katıdır.

Siz de çabucak doğrulayacaksınızdır ki 0,5 ile 1 arasında aynı şey zıt yönde gerçekleşir. 0,6 noktası 0,72'yle, 0,7 noktası 0,63'le, 0,8 noktası 0,48'le, 0,9 noktası 0,27'yle eşleşir. Ayrıca (1-1) 0'a eşit olduğundan *x* = 1 noktası da 0 noktasıyla eşleşir. Çizginin bu yarısı yalnızca uzamış olmakla kalmadı ve aynı zamanda ters çevrilip çizginin ilk yarısının eşleştirmesi üzerine yatırılmış oldu. Çizgi topolojik bir dönüşüme uğrayarak, uzama ve katlanmaya maruz kaldı. Dolayısıyla çizgi şimdi yüzde 50



Şekil 3.10 *Fırıncı Dönüşümüyle üretilen, Smale'ın At Nalı. Bu basit uzatma ve katlama işlemini sonsuz defa tekrar etmek, katmanları Cantor Kümesindeki noktalar gibi yerleşmiş çok-katmanlı bir yapı meydana getirir.*

daha uzun olmasına karşın katlanma sayesinde orijinal çizginin uzunluğunun yüzde 75'ine sığmış oldu. Tıpkı $y = x^2$ gibi bir cebirsel denklemin, kâğıt üzerinde bir çizgi veya uzay içerisinde bir güzergâh –söz konusu durumda bir parabol– vasıtasıyla grafiksel olarak temsil edilebildiğinin kavrayışı gibi, cebir ile topoloji arasındaki bağlantı da temel bir kavrayıştır. Yine de ilgilendiğimiz topolojik dönüşümlerin gerçek uzayda değil, faz uzayında gerçekleştiğini akıldan çıkarmamamız gerekir.

Soyut matematiksel çizgiler yerine fiziksel bağlamda düşündüğünüzde lojistik denklem tarafından tanımlanan uzama ve katlanma işlemi, orijinal bir silindirden at nalı gibi bir şekil meydana getirir. Şeklin ucundaki büküm gerçek bir at nalındaki gibi yumuşak, yuvarlanmış bir kavis değil de 180 derecelik keskin bir dönemeç olmasına rağmen, kimi zaman buna At Nalı Dönüşümü denir. Peki neden At Nalı Dönüşümüyle yetinelim ki? Basit yasalardan karmaşık yapılar oluşturmanın yolunun yinelemeden geçtiğini biliyoruz. Dolayısıyla bütün işleme iterasyon uygulayın. At nalını aynı yöntemle dönüştürün, daha sonra dönüştürülmüş at nalını da dönüştürün ve sonsuza dek bunu tekrarlayın. Bu işlem bir fırıncının hamur yoğurmasına az da olsa benzer. Fırıncı hamuru yayar, tekrar üstüne katlar, düzleştirinceye kadar döver, yayar, tekrar katlar ve bu döngüyü sürdürür. Dolayısıyla bu işleme Fırıncı Dönü-

şümü de denir. Hangi ismi tercih ederseniz edin, Robert May gibileri 1970'li yıllarda kaosa giden periyot katlama rotası araştırmalarına koyulduğunda, At Nalı Dönüşümünün topoloji bağlamındaki özellikleri halihazırda araştırılmıştı. Bu, kaosa yönelik çalışmaların lehine bir gelişmeydi. At Nalı Dönüşümünü, sırf özündeki topolojinin cazibesine kapılıp araştıran kişi daha önce de sözünü ettiğimiz –Robert Yorke'la olan irtibatı sayesinde kaosla yakından tanışan– parlak teorisyen Stephen Smale'dı. İşin matematiğiyle cebelleşmemize gerek yok; çünkü Smale zaten bunu bizim için yaptı. Yine de şunu söylememiz gerekir: At Nalı Dönüşümünü sonsuza dek yürüttüğünüzde faz uzayında meydana gelenlerin fiziksel görüntüsü matematiğin tüm ağırlığıyla desteklenmiştir ve ne olup bittiğine dair gerçek bir kavrayış sağlar.

Şimdi orijinal çizgiyi faz uzayındaki bir çekici olarak hayal edin ve At Nalı Dönüşümü'nün tekrarlanarak uygulanmasıyla ona ne olduğunu gözünüzde canlandırmaya çalışın. Çizginin uzunluğu her aşamada artar; ancak kendi üzerine katlandığı için "yatay olarak" daha az yer kaplar. İlk aşamanın ardından elinizde tek büküme sahip üst üste iki çizgi vardır (ancak çizgilerin eni olmadığından bunlar dikeyde yer kaplamazlar). Bir sonraki aşamada üç bükümlü dört katman bulunur. Sıradaki aşamadaysa yedi bükümlü sekiz katman vs. Katman sayısı her seferinde iki katına çıkarken, büküm sayısıysa bir önceki büküm sayısının 2 katının 1 fazlasına eşittir. En sonunda elinizde, sonsuz katmandan oluşan, sonsuz kıvrımlı (bu kıvrımlar kendine özgü bir biçimde, iç içe geçmiş bükümlerin oluşturduğu kendine benzer bir küme halinde düzenlenmiştir) ancak ne dikey ne de yatay doğrultuda hiç yer kaplamayan bir eğri kalır. Bu sonsuz katmanlı yapı yığınının dikey doğrultudaki bir kesiti alındığında noktaların, Cantor Kümesindeki noktalarınkine benzer bir dağılıma sahip olduğunu görürsünüz. Peki bu katmanların içindeki yan yana yerleşmiş noktalar nereden geldi? Uzama ve katlanma işleminin tekrarlanarak gerçekleşmesinden dolayı, orijinal çizgide birbirine yakın başlamış olan iki nokta bu kümede son eğri üzerinde birbirine uzak düşebilirken, orijinal çizginin neredeyse zıt uçlarında bulunan iki

nokta son aşamada birbirlerine çok yakın düşebilir. Bir sistemin hali orijinal çizginin üzerinde tek bir doğrultuda, sırayla her noktadan geçerek düzgünce ilerliyorsa, Cantor Kümesindeki noktaların arasında da rastlantısal biçimde oradan oraya sıçrıyormuş gibi gözükür. İşte bu, periyot katlama vasıtasıyla üretilmiş olan kaosun başlangıcıyla ilişkili topolojidir.

Katmer yemeğini andıran bu sonsuz katmanlamaya Lorenz çekicisinde de rastlanır. Yukarıda da gösterildiği üzere, Lorenz çekicisini faz uzayında temsil eden çizginin birçok sefer (hatta sonsuz defa) kendi üzerinden geçtiği görülür. Faz uzayında aslında gerçekleşen şudur: Çekici; bu kendi üzerinden geçişlerin her birinde, faz uzayının başka bir katmanına, diğer bir deyişle başka bir düzleme "seyahat etmektedir." Bunu gözünüzde canlandırmanın bir yolu, sonsuz sayıdaki sonsuz ince sayfalardan oluşan bir kitap düşünmek ve bu kitabı ortasından açarak düz bir hale getirmektir. Ardından Lorenz çekicisinin bir lobu soldaki sayfaya, diğer lobuysa sağdakine çizilir. Böylelikle kitabın her sayfasında, ilgili lobun çevresinde bir halka veya halkalar silsilesi oluşur; ancak faz uzayındaki çekicinin güzergâhı kitabın ortasından arka tarafına her geçişinde başka bir sayfaya ilerler. Sonsuz sayıda geçiş yeri olmasına karşın çekiciyi temsil eden çizgi asla kendisini kesmez.

Her iki durumda da (At Nalı çekicisi ve Lorenz çekicisinde) sonsuz sayıda faz uzayı katmanı, sonlu bir faz uzayı hacmiyle sınırlıdır. İki çekici de fraktaldir ve tuhaf çekicidir. Üstelik bu sadece başlangıçtır; faz uzayında düz bir çizgi olarak yola koyulmayan –faz uzayında bir torusun etrafına sarmalanmış bir çekici gibi– çekicilere aynı tür uzatma ve katlamayı uyguladığınızda, anlaşılması daha da güç ama yine basit bir kural kümesini temel alan bir fraktal kaos örüntüsü ile karşılaşırsınız. Dünyanın temelinde yatan basitliğin nasıl karmaşık yapılar ürettiği hakkında bilmemiz gereken tüm bilgiyi nihayet edinmiş olduk. Şimdi de bu anlayışı yaşamın ortaya çıkışına uyarlama hedefiyle karmaşa katmanlarında yukarı doğru ilerlemeye koyulabiliriz. Yolumuzun üzerinde hâlâ birkaç basamak daha olsa da iştahınızı kabartmak için, bütün bunların nasıl sadece genel anlamdaki yaşamla değil, aynı zamanda

bilhassa insan yaşamıyla da ilişkili olabileceğine dair size bir ipucu verelim.

Koch Eğrisinin fraktal boyutunu ölçekleme yasasındaki kuvvet –veya üs– bağlamında nasıl açıkladığımızı hatırlayın. Bu tür ilişkiye kuvvet yasası adı verilir (3'ün 2'nci kuvveti 3^2, 3'ün 3'üncü kuvveti 3^3'tür vs). Biz de, eğrinin temel birimini oluşturan parçaların sayısı olan 4'ü elde etmek üzere 3'ün 1,2619'uncu kuvvetini almıştık. Bir cismin hacmi gibi basit bir şey de kuvvet yasasına tâbidir. Kenarları l uzunluğunda bir küpünüz varsa, hacim l'nin değeri ne olursa olsun l^3 ile doğru orantılıdır. Yarıçapı r olan bir küreniz varsa, hacim r'nin değeri ne olursa olsun r^3 ile doğru orantılıdır. Hacim veya ebat 3 üslü kuvvet yasasına[13] tâbidir. 1980'lerin ortalarında farklı ebatlardaki hayvanların metabolizma hızlarını inceleyen araştırmacılar bu hızların da bir kuvvet yasasına itaat ettiğini, ancak bu yasanın hayvan ebatları ölçeğinden bekleyebileceğiniz basit 3 üssü yasası olmadığının farkına vardıklarında şaşkına döndüler. Araştırmacılar sıçanlar, insanlar, köpekler ve atlar gibi çeşitli memelilerin metabolizma hızlarını, vücut kütleleriyle karşılaştırdılar. Bir hayvanın vücut kütlesi hacmiyle doğru orantılıdır ve tahmin edeceğiniz gibi kütle arttıkça metabolizma hızı da artar; çünkü besin yakıp enerji açığa çıkaran daha büyük bir vücut söz konusudur. Oysa kütle 3 üslü kuvvet yasasına göre artarken, metabolizma hızı 2,25 üslü kuvvet yasasını izleyerek ölçek değiştirir. Bu bakımdan hayvanlar, ebatları üçboyutlu bir hacimdense, sanki bir hacimle iki-boyutlu bir yüzey arasındaki bir şey (özellikle de fazlasıyla buruşturulmuş bir fraktal yüzey) gibi ölçek değiştirmiyormuşçasına davranış gösterir. Bir matematikçi (an azından bir topoloji uzmanı) hiç zaman kaybetmeden bu kuvvet yasasının, söz konusu cisimlerin sonlu hacimler dahilinde yer alan buruşturulmuş fraktal yüzeyler olduğuna işaret ettiği yorumunda bulunacaktır.

Vücutlar konusuna daha detaylı olarak yaklaşacak olursak canlı sistemlerin fraktallere benzeyen birçok özellik daha içerdiğini görürüz. Örneğin damar ve arterlerin dallanış tarzının esas itibariyle fraktal olduğu ortaya çıkar. Damar ve arterler,

[13] *Power law* –çn.

kanı vücudun dört bir yanına ulaştırıp geri getirir ve bu görevi gerçekleştirmesi için başka hiçbir şeye yer bırakmayacak kadar büyük bir alan kaplamasına gerek yoktur. Bahsettiğimiz şey, sıvı değişimi gerçekleştirmek üzere son derece karmaşık biçimde iç içe geçmiş damar ve arterlerin bulunduğu böbreklerde özellikle daha belirgindir. Böbrek tam anlamıyla sonlu ve üç-boyutlu bir cisimdir; ancak böbreğin içindeki damar ve arterler hakiki bir fraktalin sonsuz uzunluğuna yönelir.

Benzetme elbette ki uç noktalarda geçerliliğini yitirir. İnsan böbreğinin içindeki sistemler aslında sonsuz defa değil, sadece defalarca dallanırlar; aksi doğrultuda ilerlediğimizde de sonsuza kadar devam eden, süper-böbrekler içinde gömülü böbreklerle karşılaşmayız ve her sistemin kendine-yeter olduğunu görürüz. Buna rağmen çoğu canlı sistem ile fraktaller arasındaki benzerlik yalnızca bir benzetmeden ibaret olmanın ötesindedir. Örneğin akciğerler oldukça küçük bir hacimle sınırlı olmasına rağmen, onların iki-boyutlu yüzeyinde, sizi hayatta tutacak çabuklukta karbondioksit ve oksijen değişimine yetecek kadar geniş bir alanın nasıl bulunabildiğine açıklık getirir. Fraktale-yakın kendine-benzerlik, canlı organizma vücutları için yaygın bir özelliktir. Bu işleyişin etkin olduğu gerçeğine ilaveten hatırlayınız ki böyle bir sistemi meydana getirmek için kodlanması gereken DNA miktarı, gerçek anlamdaki bir taslakta saklı olması gereken, böbrek gibi karmaşık bir yapıya dair bilgi miktarıyla karşılaştırıldığında çok basit kalır. Evrim geçiren dünyanın doğasıyla ilgili sorular sorma yetisine sahip varlıkların, canlıları anlamasını oldukça güç kılan şey fraktallerin yapısının temelinde yatan kuralların basitliğidir.

Tıpkı bir periyotlu, sabit bir hızla su damlatan bir musluk gibi, ilginç hiçbir şeyin gerçekleşmediği çok basit sistemler bulunduğunu görmüş olduk. Diğer yandan esas itibarıyla rastlantısal iniş çıkışlar içeren, dolayısıyla bir düzenin olmadığı ve yapının ortadan kalktığı kaotik sistemler de mevcuttur. Bu ikisinin arasındaysa tayfın sıkıcı olan ucundan başlayıp giderek artan bir karmaşıklık düzeyi vardır; periyot-1 ile su damlatan bir musluktan sonra işler giderek ilginçleşir ve ani-

den kaos devreye girer. Dolayısıyla evrendeki en karmaşık ve en ilginç şeyler tam da kaosun sonunda, düzen ortadan kalkmadan hemen önce meydana gelir. Burada karşılaştıklarımız, garip ve egzotik ritimlerle damlayan musluklar (veya su sızdıran oluklar), muhteşem örüntülerle dönüp dolaşan girdaplar içinde girdaplar ve böbreğin sıra dışı karmaşıklığı veya insan beyninin defalarca katlanmış beyin zarının fraktale-yakın yüzeyiydi. Şimdiye dek düzene ve kaosa göz attık. Şimdiyse karmaşanın sahne aldığı kaosun eşiğini incelemenin vakti geldi.

4

Kaosun Eşiğinde

Klâsik termodinamik, bir anlamda zaman yokmuş gibi davranır. Bu başlık altında sistemler, onları bir durumdan diğerine geçirmesi sonsuz zaman alacak sonsuz küçüklükteki değişimler bağlamında açıklanır. Aynı zamanda klâsik termodinamik, bir sistemin içerisinde hiç enerji (özellikle de ısı) akışı yer almadığını da varsayar. Oysa ısı difüzyonu vasıtasıyla hidrojen sülfit gazından hidrojen gazının ayrıştırıldığı basit örnekte daha önce de gördüğümüz gibi, bir sistemin içinde enerji akışı cereyan ettiğinde hemen ilginç şeyler meydana gelmeye başlar. Cansız bir bedenin içerisinde kayda değer miktarda enerji akışı olmazken, vücudunuzun içerisinde gerçekleşen enerji akışı oldukça yüksek miktardadır. Aldığınız besinin metabolizmasından kaynaklanan kimyasal enerji, kaslarınız ve diğer bedensel aktivitelerinize güç sağlar ve en nihayetinde ısı olarak yitirilir. Enerji yitimi dengede olmayan termodinamiğin temel özelliklerinden biridir ve bir sistemin içerisindeki enerji akışını farklı bir yolla, kayıp bir süreç olarak tanımlamamızı sağlar. Bu sistemler aynı zamanda –on dokuzuncu yüzyılın öncü termodinamikçilerinin çok sevdikleri varsayımsal kapalı gaz kutusunun aksine– dünyanın tümünden yalıtılmış olmadığı için açık sistemler olarak bilinir. Poincaré yinelemeleri ve za-

manın tersinirliği kapalı sistemlerde karşımıza çıkarken, açık sistemlerde tersinmezlik ve zaman okuyla karşılaşırız.

2. Bölümde gördüğümüz gibi, klâsik terminoloji bir çelişkiye dayanır. "Dinamik" terimi bize, amacının sistemlerin nasıl değiştiğini tanımlamak olduğunu söyler; öte yandan entropi gibi fikirlerse hiçbir şeyin meydana gelmediği, dengedeki sistemlerle ilişkili hesaplamalardan türetilmiştir. Denge halinde hiçbir şey gerçekleşmez. Bu yüzden bu durumun yapısal hiçbir ilgi çekiciliği yoktur. Oysaki denge durumuna doğru ilerlenen süreçte olup bitenler çok ilginç olabilir. Bir canlı ancak öldüğünde denge haline çok yaklaşmış olur. Bir şeyin ölmüş olduğu gerçeği, onun nasıl öldüğünün yanında hiç de ilgi çekici değildir. (Gizemli cinayetleri konu alan polisiye roman türünün başarısı da tamamen buna dayanır.)

İnsanlar kayıp süreçleri incelemeye başladıklarında, doğal olarak denge haline yakın sistemleri ve ısı difüzyonu gibi süreçleri incelemekle yola koyulmaları gerekiyordu. Sistemler denge haline yakın olduğunda, çevrelerindeki değişimlere genellikle doğrusal bir biçimde karşılık verir. Örneğin ısı difüzyonu süreci esnasında sıcaklık eğiminde ufak bir miktarda değişiklik yaparsanız sistem de doğrusal bir biçimde, ufak miktarda değişerek karşılık verir. Doğrusal termodinamiğe yönelik çalışmaların temeli 1930'lu yılların başında Brown Üniversitesinde çalışan (ardından 1933'te York'a taşınan) Norveçli kimyacı Lars Onsager (1903-1976) tarafından atıldı. Onsager'in, 1968'de layık görüldüğü Nobel Ödülü için yapılan atıfta da özel olarak değinilen en önemli katkısı, ters bağıntı olarak bilinen kavramı keşfetmesiydi. Ters bağıntılar bu tür sistemlerde bir simetri olduğunu söylüyordu. Isı difüzyonu örneğiyle açıklamak gerekirse bir sıcaklık eğimi, gazların karışımının yoğunluğunda nasıl eğim oluşturuyorsa, Onsager'in teorisine göre de bir yoğunluk eğiminin düzenlenip korunmasının da sonuç olarak bir ısı akışı meydana getirecek bir sıcaklık eğimine neden olması gerekiyordu. Bu, daha sonra yapılan deneyler tarafından onaylandı ve ters bağıntılar aynı zamanda termodinamiğin dördüncü yasası olarak da bilinir hale geldi.

Onsager; kayıp sistemlerde –en azından doğrusal kuralların uygulandığı (doğrusal rejimdeki) sistemlerde– yer alan tersinmez olguların araştırılması için gerekli araç gereçleri kimyacılara sağlamıştı. Bu araç gereçleri en etkili şekilde kullanan kişi, 1917'de Moskova'da dünyaya gelen Ilya Prigogine'ydi. 12 yaşındayken ailesiyle birlikte Belçika'ya göç eden Prigogine 1945'te Brüksel Üniversitesinde görev yapıyordu. Doğrusal rejimdeki kayıp bir sistemin (tıpkı denge halinde görüldüğü gibi) maksimum entropiye karşılık gelen ölüm hali yerine, entropinin mümkün olan en düşük hızla üretildiği ve kayıp faaliyetin minimum düzeyde seyrettiği bir hale yerleştiğini ortaya koyan, kitabın 1. Bölümünde de bahsedildiği gibi Prigogine'ydi. Bu, ısı difüzyonunda belirli bir sıcaklık eğimi için gazların yoğunluğunun eğiminin dengelendiği duruma karşılık gelir; ama Prigogine bunun genel olarak doğrusal termodinamikle açıklanan sistemler için geçerli olduğunu gösterdi. Şeyler, doğrusal rejimde istikrarlı bir halde varlıklarını sürdürürler. Örneğin bir insan, bütünlüğünü vücudundaki enerji akışı (ve besin) sayesinde yıllarca sürdürebilse de, hâlâ anlaşılamamış sebeplerden dolayı istikrarlı durum en nihayetinde ortadan kalkar. Öte yandan erişkin bir insanın istikrarlı hali, döllenmiş bir yumurtanın tek bir hücresinden yeni bir insanın (doğrusal olmayan bir süreç olduğu aşikâr olan) gelişmesi esnasında meydana gelen büyük değişimlerden şaşırtıcı derecede farklıdır. Bu konuya az sonra yeniden değineceğiz.

Sonraki yirmi yıl içerisinde, –ileride "Brüksel Okulu" olarak adlandırılacak olan– Brüksel'deki Prigogine ve meslektaşları, denge halinden uzak, dış ortamdaki küçük değişikliklerin sistemde büyük değişimlere yol açabileceği doğrusal olmayan rejimdeki sistemlerle ilgili termodinamiğe yönelik matematiksel bir tanım sağlama girişimi üzerinde yoğunlaştı. Eksiksiz bir teoriden çok uzak olmasından dolayı buna belki de –şimdi bile–devam etmekte olan bir çalışma olarak bakılmalıdır. Neyse ki önemli ve yaygın olarak kabul gören durumlar, basit fiziksel ve kimyasal sistemlerin davranışları bağlamında anlaşılabilir olduğundan ayrıntıya girmemize ya da bu çalışmanın etrafını saran tartışmaları dert edinmemize gerek yok. Yine de

dikkate almamız gereken kilit bir nokta var: Bu tür sistemler, geri-bildirimin önem teşkil ettiği durumlarda doğrusal olmayan denklemler vasıtasıyla açıklanır.

Aynı esnada Prigogine, hem zamanın doğası hem de termodinamik ile zaman oku arasındaki ilişki hakkında da kendi fikirlerini geliştirmişti. İşte bu fikirleri sayesinde Prigogine muhtemelen en yaygın anlamda mesleki bilim camiasının dışında tanınır. Bizim de bu fikirlerden söz etmemiz bu yüzdendir. Prigogine'nin bu çalışmada çözmek üzere yola koyulduğu yap-boz, düzenin (bizim gibi şeylerin) kaostan nasıl doğmuş olabileceğiydi. Burada kaos ile ifade edilmek istenen belirlenimci kaos *değil*, aslında Antik Yunanların kast ettiği kaos olan, evrenin genç dönemindeki gazların düzgün dağılımıdır. Ne var ki Prigogine'nin çalışmasının, çoğu fizikçinin çıkmaz sokak olarak nitelendirdiği bu yönünü incelemeyeceğiz. Çoğu fizikçinin böyle düşünmesinin sebebi, evrende neden zamanın bir yönü olduğunun ve bilhassa (birazdan açıklayacağımız) bizim gibi düzenli sistemlerin, Büyük Patlamayla meydana gelen neredeyse eş dağılımlı düzensizlik halinden nasıl ortaya çıkmış olabileceğinin doğal bir yöntemle açıklanabiliyor oluşudur.

Doğrusal olmayan rejimdeki, dengeden uzak, açık sistemlerde gerçekleşebilecek ilginç şeylere yönelik bir anlayış geliştirmeye başlamak için, tanımlaması ilk olarak Fransız Henri Bénard tarafından 1900'de yapılan olguyu ele almak en doğrusudur. Daha sonra İngiliz fizikçi Lord Rayleigh tarafından da incelenmiş olduğundan buna Bénard Kararsızlığının yanı sıra Rayleigh-Bénard Kararsızlığı da denir. Ne olup bittiğini görmek adına izlenebilecek en etkili yöntem, dibinde ince bir silikon yağı tabakası bulunan düz bir tavanın kontrollü laboratuvar koşulları altında dikkatlice alttan ısıtılmasıdır. Yağ tabakasının yalnızca yaklaşık bir milimetre derinliğinde olması ve ısıtmanın, kabın düz tabanının her tarafında eş dağılımlı olması gerekir. Bu işlem sıradan bir mutfak ocağında bir sos tenceresi kullanılarak da yapılabilse de ince yağ tabakasını bu yöntemle ısıtmayı tavsiye etmeyiz. Onun yerine bir tencerede kıvamlı bir çorbayı yavaşça kaynama noktasına getirerek ben-

zer şeylerin meydana geldiğine şahit olabilirsiniz. Gelgelelim birazdan açıklayacağımız deneydeki asıl amacımız, yağın kaotik ve dağınık bir şekilde kaynamasına neden olacak kadar ısıtılması değildir. Biz kaosun başlangıcından hemen önce ne olup bittiğiyle ilgileniyoruz. Bu olup bitenleri daha belirgin hale getirmek içinse berrak olan yağa çoğunlukla alüminyum tozu serpilir; ancak bunu çorba için yapmanızı kesinlikle önermiyoruz.

Meydana gelen elbette ki konvenksiyondur.[1] Tabakanın altında kalan sıcak sıvı genleşip seyrelerek üzerinde bulunan daha soğuk ve daha yoğun sıvının arasından yükselmeye çalışır. Isıtma eş dağılımlı olmadığı takdirde bir yap-boz ortaya çıkmaz; sıvı en sıcak olduğu yerden kolayca yükseldikten sonra başka bir yere çöker ve ardından tekrar o sıcak noktaya geri dönerek kendini tekrarlayan bir konveksiyon hücresi oluşturur. Sıvı eş dağılımlı biçimde ısıtıldığındaysa bu sürecin başlayabileceği özel bir yerden söz edilemez. Sıvının tabanı boyunca eş dağılımlı bir simetri vardır ve sıvı bir bütün olarak aynı anda yükselmek "ister." İlk etapta hiçbir şey gerçekleşmezken, daha sonra üst kısım soğuk tutulup sıcaklığın alttan aşamalı olarak artırılmasıyla (bu sayede sıcaklık eğimi dikleşir) kritik bir noktada simetri ortadan kalkar ve sıvının eş dağılımlı yüzeyi aniden bozularak altıgen biçimli ufak konveksiyon hücrelerinden oluşan bir örüntüye bürünür. Bu gerçekleşenlerin başlangıç noktası sıvının üstü ile altı arasındaki sıcaklık farkına (sıcaklık eğimine) göre değişir. Bahsettiğimiz yolla oluşan hücrelerin genişliğiyse yağın derinliğiyle doğru orantılı olarak artar veya azalır. Her hücre içerisinde sıcak sıvı merkezde yükselip kenarlara yönelir ve komşu hücreyle olan sınıra eriştiğinde alçalır. Sıvı yüzeyinin havayla temas halinde olması yüzey gerilimi etkilerinin önem kazanması manasına gelir. Bu etkiler, her hücrede sıvının merkezden çekilip ayrılarak yüzeyde dışa doğru hareket etmesine neden olur. Sonuç olarak da sıvı hücrenin merkezinde yükseliyor olmasına rağmen burası kenarlardan daha alçak kalır ve çukurlu bir gö-

[1] Sıvılarda ısı konveksiyonla, diğer bir deyişle ısınan maddenin hareketi vasıtasıyla yayılır –çn.

rüntü ortaya çıkar. Rayleigh'in incelediği durum bundan biraz daha farklı biçimde alttaki sıcak, üstteki soğuk olmak üzere iki levha ve bunlar tarafından kıstırılmış ince bir sıvı tabakasından oluşuyordu. Bu yöntem işin hem fiziğini hem de matematiğini çok daha basit kılar; yüzey gerilimini hesaba katma zorunluluğundan kurtulmanın yanı sıra, açığa çıkan davranış örüntüsü Rayleigh-Bénard Kararsızlığı ile belirlenimci kaosun başlangıcı arasında düzgün bir bağlantı kurar.

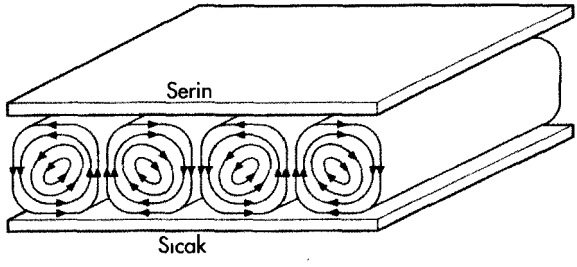
Bu basitleştirilmiş Bénard konveksiyonu versiyonunda, kaosa giden yoldaki aşamaların birkaçı görülebilir. Başlangıçta konveksiyon uzun sosisler biçiminde gerçekleşir ve böylelikle sıvının yüzeyi çizgili bir görüntü edinir. Bu sosisler kareye yakın kesitlere sahiptir ve konveksiyon, komşu ruloların [sosislerin] birinde saat yönünde gerçekleşiyorken diğerinde ters yönde gerçekleşir. Ne var ki sıvı içerisindeki belirli bir noktanın, saat yönündeki bir konvektif rulonun mu yoksa ters yöndeki bir konvektif rulonun mu parçası olacağını peşinen söylemek imkânsızdır. Kesin diziliş rastlantısal olarak belirlenir. Burada, sistemin tek bir halden bir çift hale geçtiği bir çatallanma söz konusudur. Sıcaklık eğiminin artmasıyla[2] bir diğer kritik noktada örüntü ansızın iki konvektif rulo kümesinin birbirlerine dik konumda eşzamanlı olarak çalıştığı iki-şekilli denilen bir biçime dönüşür. Bu, yukarıda olduğu gibi aşağı yukarı kare şeklindeki konvektif rulolardan oluşan ve kareli bir gömleğe benzeyen bir örüntü ortaya çıkmasına neden olur. Böylelikle sıvının bileşenlerinin muhtemel hal sayısı yine ikiye katlanarak 2'den 4'e çıkmış oldu. Bu, iş başındaki çatallanmaya dair bir diğer örnektir ve kaosa giden periyot katlama rotası konusunun bir çeşitlendirmesidir. (Üstelik Rayleigh'in bunların hiçbirinden haberi yoktu.) Bununla birlikte sıcaklık eğimi (veya Rayleigh Sayısı) yeteri kadar artırıldığında, içerisinde kısa ömürlü örüntülerin durmadan belirip yok olduğu ve tekrar şekillendiği, konveksiyonun türbülanslı biçimiyle karşı karşıya kalırsınız. Ne var ki en ilginç kararlı örüntüler tam

[2] Rayleigh Sayısı denilen parametrenin değerinin artmasıyla demek daha doğru olur. Bu sayı hem sıcaklık eğimine hem de sıvının özeliklerine bağlıdır.

da kaosun eşiğinde gerçekleşir. Bu, üstü açık bir tavada ince yağ tabakasının ısıtılması örneğinde, yüzey gerilimi sebebiyle ortaya çıkan, bal peteği düzeninde yerleşmiş altıgenler olarak tezahür eder. Açık bir sistem içerisinde enerjinin akması ve sonrasında yitirilmesi nedeniyle tüm bu olanlar dengeden uzakta gerçekleşir. Bu, düzenin evrendeki varoluşunun ve özellikle de yaşamın sırrıdır. Her ne zaman düzenin ve özellikle de yaşamın varoluşuyla karşılaşır ve dünyanın nasıl böyle bir hale geldiğini düşünürseniz, kendi kendinize "Bénard konveksiyonundaki altıgen hücreleri hatırladın mı? İşte bunlar aynı şeyler" diyebilirsiniz.

Bir sistemin, dengeden uzaktaki ilgi çekici bir halde tutulması onun ancak kayıp bir sistem halinde çevreye açık olmasıyla mümkündür. Diğer bir deyişle dış bir enerji kaynağının bulunması gerekir. Dünyadaki bu enerjinin kaynağı güneştir. Düzenin neden kaostan doğmuş olduğunu ve nasıl olup da evrende zamanın bir yönü olduğunu açıklığa kavuşturmak, güneşin neden parladığını anlamaktan geçer.

Tüm bunlar kütleçekim sayesinde olur. Kütleçekim çok tuhaf bir özelliğe sahiptir: Kütlesi olan herhangi bir cismin kütleçekimsel enerjisi negatiftir. Kelimenin tam anlamıyla sıfırdan az olan bu kütleçekimsel enerji, cismin kompaktlığı arttıkça sıfırdan giderek uzaklaşır. Böyle yalın bir ifade üzerinden bu gerçekliği kabullenmek güç olsa da olup bitenleri kavramak kütleçekimin iki farklı durumda ele alınması halinde



Şekil 4.1 *Rayleigh'in çalışmasını yürüttüğü Bénard konveksiyonu versiyonunda (basık bir İsviçre pastası gibi) kareye yakın kesitlere sahip konveksiyon ruloları oluşur.*

kolaylaşır. Bunlardan ilkinde iki cisim birbirinden uzaklaştıkça aralarındaki kütleçekimsel kuvvetin de azaldığını görürüz. Newton'un ispatına göre bu azalma ters kare yasasıyla uyumlu olarak gerçekleşir. Bir cisimler kümesinde (bunlar atomlar, yıldızlar, beton yığınları veya Van Gogh tabloları olabilir) depolanan kütleçekimsel enerji miktarı, o cisimlerin arasındaki kuvvete bağlıdır. Bu durum yalnızca kütleçekim için geçerli değildir; bir lastik parçasını gerdiğinizde, onu daha da fazla germeniz için giderek daha kuvvetlice çekmek zorundasınızdır ve lastiğin içinde depolanan enerji, lastiği ne kadar kuvvetli çektiğinizle ilintilidir. Oysa birbirlerinin kütleçekim etkisi altında bulunan iki (veya daha fazla) cisim arasındaki mesafeyi "germeniz" için, cisimler birbirlerinden uzaklaştıkça giderek daha az çekmeniz yeterli olacaktır. Bir uyduyu dünyanın yörüngesine oturtmak için devasa bir itici rokete ihtiyaç olmasına karşın uydu yörüngeye yerleştiğinde, onu ay veya Mars'a göndermek için yalnızca küçük bir roketin yeterli olmasının da sebebi budur. Diğer yandan cisimler birbirinden sonsuz uzaklıkta olsaydı, onları birbirine bağlayan kütleçekimsel alanda depolanan toplam enerji sıfır olurdu. Bunun asıl nedeni kuvvetin, 1'in sonsuzun karesine bölümüyle doğru orantılı olmasıdır.

Şimdi, birbirlerinden sonsuz uzaklıkta olacak şekilde yayılmış bir parçacıklar kümesini (atomlar, tuğlalar veya her neyse) gözünüzün önüne getirin ve ufacık bir dürtmeyle, kütleçekim etkisi altında birlikte hareket etmeye başladıklarını farz edin. Bu esnada her bir parçacık kinetik enerji kazanır ve düştükçe giderek hızlanır. Tıpkı bir lastiğin iki ucuna bağlı iki çakıl taşının iki yana çekilip bırakılmasının ardından lastikte depolanan enerjinin hareket enerjisine (kinetik enerjiye) dönüşmesiyle taşların birbirine doğru hücum etmesinde olduğu gibi, birlikte düşen parçacıkların kinetik enerjisi de benzer şekilde kütleçekimsel alandan kaynaklanır. Oysa kütleçekimsel alan başlangıçta sıfır enerjiye sahipti; şimdiyse sıfırın altında enerjiye (negatif enerjiye) sahip. Parçacıklar bir yıldız oluşturmak için bir araya geldiği sırada, o yıldızla ilişkili kütleçekimsel alanda yüksek miktarda negatif enerji bulunur. Peki ne kadar? Çoğu kişiye olduğu gibi, cevap size de şaşırtıcı gelebilir.

Şimdi değineceğim anekdotu daha önce de kullanmıştım;[3] ama konuyu görselleştirmenin daha iyi bir yolu olmadığı gibi, bu kitabı okuyan herkesin önceki tüm kitaplarımı okumuş olmaları varsayımında bulunmam da budalaca olur. Hikâye, fizikçilerin kütleçekimin negatifliği olarak adlandırılabilecek şeyden haberdar olmalarına rağmen, çoğunun savaşla alakalı işlerle (özellikle de ABD'deki Manhattan Projesiyle) meşgul olduğu 1940'lara kadar uzanır. Amerika'da yaşayan ancak Rusya doğumlu olduğu için en gizli projelerde çalışmasına izin verilmeyen bir fizikçi olan George Gamow (1904-68) coşkulu bir karakterin yanı sıra geniş bir ilgi alanı yelpazesine sahipti. Evrenin Büyük Patlama kökenine ait ilk modelini geliştiren Gamow, Washington DC'deki ABD Deniz Kuvvetleri Bakanlığının Ordu Donatım Bürosunda danışmanlık görevi yaparak savaşa yönelik çabalara katkı verdi. Gamow'un buradaki görevlerinden biri Albert Einstein için hazırlanmış evrak dolu bir çantayı iki haftada bir Princeton'a götürmekti. Evraklar çok gizli bilgiler içermiyordu. İyi niyetli, ama çoğunluğu yanlış yönlendirilmiş insanlar, savaşın kazanılmasına yardımcı olabileceğini düşündükleri icatlarına dair fikirlere yer verdiği bu evrakları Deniz Kuvvetlerine yolluyor, Deniz Kuvvetleri de bunların itibar edilebilir olup olmadığına dair Einstein'ın tavsiyesini istiyordu. Evraklar denizaltıların faaliyetini engellemek amacıyla Atlantik Okyanusunun dondurulabileceği önerisi gibi fikirler içeriyordu. Dolayısıyla Einstein'ın sapı samandan ayırma becerisi gereksiz yere ölçülmüyordu. Yine de Einstein İsviçre'de patent memuru olarak çalıştığı dönemde, pratikte uygulanamayacak sinsi tasarıların içerdiği hataları tespit etmekte nispeten daha iyiydi.

Bir gün Princeton'daki evinden İleri Çalışmalar Enstitüsüne doğru Einstein'la birlikte yürürken Gamow, iş arkadaşı kuantum fizikçisi Pascual Jordan'ın bir süre önce başından savmış olduğu bir fikirden söz etti. Jordan'ın bu fikri, sadece bir kahve sohbetine veya Princeton'daki bir yürüyüşe renk katmak üzere ortaya atılan türden çılgın bir fikirdi. Jordan herhangi bir maddesel cismin kütlesinin bir noktada toplanması

[3] *bkz. In Search of the Big Bang [Büyük Patlamanın Peşinde].*

halinde, ilgili kütleçekimsel alanın negatif enerjisinin $-mc^2$ olacağını, böylece bu negatif enerjinin de yıldızın pozitif kütle-enerjisini tam olarak sıfırlayacağını hesaplamıştı. Gamow'un Einstein'a söyledikleri, diğer bir deyişle bir yıldızın hiç yoktan var edilebileceğiydi. Gamow arkadaşının tepkisini şöyle dile getiriyordu:[4] "Karşıdan karşıya geçtiğimiz o esnada Einstein'ın öylece kalakalmasıyla birkaç arabanın bizi ezmemek için durması gerekti."

Bunun, sıradan bir benzetme veya enerji gibi şeyleri ölçmek için izlediğimiz yöntemin bir sonucu olmadığının altını çizmek gerekir. Bu, evrenin işleyiş biçimiyle ilgili temel bir gerçekliktir: Kütleçekimsel alanlar negatif enerjiye sahiptir ve konu bir noktada yoğunlaşmış bir madde olduğunda söz konusu negatif enerji o maddenin kütle-enerjisini tam olarak sıfırlar. Karşıdan karşıya geçerken Einstein'ın olduğu yerde donup kalmasına neden olan fikir o zaman az bir etki yarattıysa da kırk yıl sonra tüm evrenin hiç yoktan ortaya çıkmış olabileceği fikrinin köşe taşı haline gelecekti. Fikre göre bu ortaya çıkışın sonucunda evren ilk olarak eşit ve zıt miktarda enerji taşıyan (dolayısıyla toplam enerjisi sıfır olan) kütleçekimsel alana sahip bir kütle-enerji kabarcığı halindeydi. Sonrasındaysa ufak kabarcık, şişme olarak adlandırılan bir süreç vasıtasıyla genişleyerek şu an etrafımızda gördüğümüz evreni oluşturmuştu. Tüm bunları *In Search of the Big Bang [Büyük Patlamanın Peşinde]* adlı kitabımda ele almış olsam da burada önemsememiz gereken tek husus, evrenin Büyük Patlamadan, yola gayet eş dağılımlı bir halden çıktığını biliyor olduğumuzdur. Büyük Patlamada ne olup bittiğinin ayrıntıları hâlâ tartışma konusu olmasına rağmen evrene yönelik doğrudan gözlemler, başlangıçtan hemen sonrasının neye benzediğini bize söylemektedir.

Bugün evren hakkındaki en önemli gerçeklik, onun genişlemekte olduğudur. Geceleri gökyüzünde gördüğümüz tüm yıldızlar disk-şekilli bir sistemin parçasıdır. Bu sistem Samanyolu adı verilen ve yüz milyarlarca yıldızdan oluşan bir galaksidir. Samanyolu da yüz milyarlarca galaksiden sadece bir tanesidir. Galaksilerse bir araya gelerek Evren genişledikçe

[4] *bkz.* Gamow, *My World Line.*

birbirlerinden uzaklaşan (ve kütleçekim tarafından bir arada tutulan) kümeleri oluştururlar. Genişleme uzay içerisinde hareket eden galaksi kümelerinden değil, uzayın kendisinin kümeler arasında gerilmesinden kaynaklanır. Einstein'ın genel görelilik teorisi bunu tüm ayrıntılarıyla anlatır (Bu tahminler aslında bu teoriden yola çıkarak yapılmıştır). Cisimler şu an birbirlerinden uzaklaşmaktaysa, o zaman geçmişte birbirlerine daha yakın oldukları aşikârdır ve geçmişte yeteri kadar geri gittiğimizde her şeyin üst üste olduğu bir yığınla, diğer bir deyişle Büyük Patlamayla karşılaşırız. Evrenin şu anki genişleme katsayısını ölçerek ve genel görelilik teorisini kullanarak Büyük Patlamadan şimdiye kadar yaklaşık on dört milyar yıl geçmiş olduğunu saptayabiliriz.

Astronomiyle ilgili en harika şeylerden biri, ışığın uzaydaki seyahatinin sonlu bir zamanla sınırlandırılmış olması nedeniyle cisimleri çok eskiden bulundukları uzaklıkta görüyor oluşumuzdur. On milyon ışık yılı uzaklıktaki bir galaksinin, onu on milyon yıl önce terk etmiş olan ışığın vasıtasıyla görülmesi buna örnek verilebilir. Ayrıca "başlangıç" sıfırıncı an olarak belirlenip zaman ileri yönde çalıştırılırsa, detektörlerimiz aracılığıyla "görebildiğimiz" geçmişteki en uzak zaman, evrenin yaklaşık 300.000 yaşında olduğu bir çağa karşılık gelir. Bu çağda evren, neredeyse eş dağılımlı ve sıcaklığı güneşin yüzeyinin bugünkü sıcaklığının civarında –aşağı yukarı 6000 °C– olan bir sıcak gaz denizinden (daha doğrusu, bir plazmadan) oluşuyordu.

Bu ateş topundan kaynaklanan radyasyon –tıpkı kapalı bir kutunun genişlemesiyle içindeki gazın soğuması gibi– zaman geçtikçe ve evren genişledikçe soğudu. Bu radyasyon bugün belli belirsiz bir radyo hışırtısı şeklinde, elektromanyetik tayfın mikrodalga kesiminde ve sıcaklığı *eksi* 270 °C'nin hemen altında (ya da mutlak sıfırın 2,7 derece üzerinde) olarak saptanır. Gökyüzünün farklı yerlerinden bize ulaşan bu "kozmik mikrodalga ardalan ışınımı"nın sıcaklığındaki oldukça küçük çaplı farklılıklar, yıldızları ve galaksileri oluşturmuş olan sıcak gazın o dönemde uzaydaki dağılımının tam olmasa da neredeyse eş dağılımlı olduğuna işaret eder. Gaz bazı yerler-

de biraz daha yoğundu ve bu yüzden bu daha yoğun bölgeler kendilerine daha fazla madde çekerek evrenin düzensizliğinin artmasına neden olacaktı. Bu da sonuç olarak bugün içinde bulunduğumuz duruma, maddelerin, aralarında yüksek miktarda karanlık uzayın bulunduğu parlak yıldızlar olarak galaksilerde yoğunlaşmasına yol açacaktı.

Bu, dünyada gerçekleştirdiğimiz gaz dolu kutu incelemesinin bize sağladığı kavrayıştan önemli ölçüde farklıdır. Kütleçekim etkilerinin ihmal edilebildiği durumlarda (bu, kutudaki parçacıkların birbirlerine uyguladıkları kütleçekimsel kuvvetlerin etkilerinin ihmal edilebildiği anlamına gelir); gaz dolu bir kutu için maksimum entropi hali, gazın eş dağılımlı bir sıcaklık altında kutu içerisinde eş dağılımlı biçimde yayılmış olduğu duruma karşılık gelir. Öte yandan gazı oluşturan parçacıklar arasındaki kütleçekimsel kuvvetlerin ihmal edilemediği durumlarda (bu uzaydaki iri toz ve gaz bulutları için geçerlidir) kütleçekim, cisimleri yığınlar halinde bir araya toplayabilir ve böylece daha fazla düzen oluşturarak *aynı zamanda* entropiyi de azaltabilir. Paul Davies'in de söylediği gibi, "kütleçekim kaynaklı kararsızlık bir bilgi kaynağıdır."[5] Daha fazla bilgi daha az entropi anlamına gelir. Dolayısıyla buradan çöken bir gaz bulutunun kütleçekimsel alanından bilgi "dışarı çıktığında" kütleçekimsel alanın, negatif enerjisine eşlik etmesi amacıyla entropi yuttuğu çıkarımı yapılabilir. Kütleçekimsel alanın bu şekilde entropi yutmasını mümkün kılan, sahip olduğu negatif enerjidir ve bu da evrenin bugün neden termodinamik dengede olmadığını açıklar.

Şimdi, evrenin tamamını konu alan büyük resmi bir kenara bırakıp dünyada yaşamın ortaya çıkışına tekrar odaklanalım. Burada önem taşıyan, kütleçekimin bir tür domino etkisinden sorumlu olduğudur. Bu domino etkisi küçük çapta olmaktan ziyade, rekor kırma veya yardım kuruluşları için bağış toplama maksadıyla muazzam dizilimli dominoların devrilmesine benzetilebilir. Söz konusu etki, adım adım ilerleyen bir süreç halinde evrende, her şeyin nasıl meydana geldiği hakkında kafa yoracak denli zeki varlıklar düzeyine kadar inen (veya çı-

[5] *bkz.* Paul Davies, *The Fifth Miracle.*

kan) ve miktarı giderek artan düzenlemeler yaratmıştır. Yıldızların işleyişinin ayrıntılarına inmeden önce[6] onların sadece, gaz yığınlarının kütleçekimle bir araya gelip (onları oluşturan parçacıkların kütleçekimsel alandan edindiği kinetik enerji sayesinde) ısınması, böylelikle de nükleer füzyon tepkimelerinin cereyan etmesiyle meydana gelmiş olduğunu söyleyebiliriz. Tüm bunlar yıldızların ve onların etrafındakilerin termodinamik dengede olmadığı bir duruma yol açar. Tam aksine, soğuk uzayda duran sıcak bir yıldız söz konusudur ve bu yüzden enerji yıldızın dışına akarak iç ve dış sıcaklığı dengelemeye çalışır. Zamanın termodinamik yönü, yıldızdan dışarı akmakta olan enerjinin tekabül ettiği, geleceğin doğrultusuna dönüktür. Ayrıca, kütleçekimin tüm bunlardaki rolü sebebiyle, termodinamik geleceğin aynı zamanda Büyük Patlamadan uzaklaşan zamanın yönü olması tesadüf değildir. Zaman okuna ne tarafı işaret edeceğini söyleyen en nihayetinde kütleçekimdir.

Dünyamız gibi bir gezegen, yıldızdan çıkan enerji akışıyla yıkanır ve bu da gezegenin, tüm yüzeyi açık ve kayıp bir sistem olmasına yol açar. Dünya yüzeyindeki yaşamın tümü, kendisini dengeden uzakta, kaosun eşiğinde tutma maksadıyla bu enerjiden faydalanır.[7] Bitkiler enerjilerini doğrudan güneş ışığından fotosentez yoluyla sağlarken, otçullar enerjilerini bitkilerden, etçillerse diğer hayvanlardan edinir. Yine de tüm bunların kökeni güneştir ve tüm bunlar kütleçekim sayesinde olur. Gelgelelim sistemlerin bu enerji akışını kullanarak kendilerini karmaşık gibi gözüken biçimlere düzenleme yöntemleri gerçekten de oldukça basittir. Parlak matematikçi Alan Turing'in

---

6 *Stardust* adlı kitabımda ele aldığım bir konu.

7 Enerji dünyanın içerisinden de gelir. Dünyanın çekirdeğinde yer alan radyoaktif elementlerin bozunması bu enerjinin başlıca kaynağıdır. Söz konusu radyoaktif maddeler, yıldızların önceki nesillerinde üretilmiş ve bu yıldızların patlamasıyla uzayın derinliklerine yayılıp Güneş Sistemini meydana getirecek yıldızlar arası bulutun bir parçası haline gelmişti. Dolayısıyla bu enerji kaynağı da varlığını en nihayetinde kütleçekime borçludur. Okyanus tabanındaki sıcak su ağızlarından kaçan bu enerjiden faydalanan yaşam biçimleri bunu güneş ışığından bağımsız bir şekilde gerçekleştirebilse de onlar da bizim kadar birer kütleçekim ürünüdür.

(1912-1954) açtığı yolu takip ederek bunu tüm açıklığıyla görebiliriz. Yarım yüzyıldan fazla bir süre önce, bildiğimiz en karmaşık süreçte yer alan, tek bir yaşayan hücreden embriyo gelişimini açıklamaya yeltenme cüretinde bulunan Turing, döneminin çok ilerisindeydi ve bu alandaki çalışmasının önemi ölümünden yıllar sonra fark edildi. Yine de şimdi bakıldığında, hikâyemizin bir sonraki aşamasına başlangıç noktası olarak seçilecek en mantıklı yer burasıdır.

23 Haziran 1912'de Londra'daki Paddington'da doğan Turing İkinci Dünya Savaşı esnasında (meşhur Enigma şifreleri de dahil olmak üzere) Alman şifrelerini kıran ve Buckinghamshire'daki Bletchley Park'ta yer alan ekibin önderliğini yapmış bir kriptocu olarak bilinir. Turing o sıralarda, her problemi çözebilen bir yapay zekâ olan (günümüzde kimi zaman bir Turing makinesi olarak da adlandırılan) "bir evrensel bilgisayar" yaratma çabasıyla yakından ilgiliydi. İnsan zekâsının nasıl geliştiğine yönelik merakı da onu embriyonik gelişme hakkında kafa yormaya itti. Ne yazık ki erken ölümü, Turing'in başarılarına yenilerini katmasına engel oldu. Otoriteler tarafından (söz konusu dönemde halen suç kabul edilen) eşcinsel olduğu gerekçesiyle taciz edilmesi sonucunda Turing, kırk ikinci doğum gününden iki hafta önce 7 Haziran 1954'te siyanür enjekte ettiği bir elmayı yiyerek intihar etti. Turing 1934 yılında mezun olduğu Cambridge'deki King's Kolejinde iki sene çalıştıktan sonra doktora çalışmasını Princeton'da tamamlamış ve 1938'de King's Kolejine geri dönmüştü. 1936'da Turing makinesi fikrini sunan makalesi "On Computable Numbers"ı [Hesaplanabilen Sayılar Üzerine] yayınlamıştı. O dönem için tamamen hayali bir üründen ibaret olan bu makine, varsayımsal bir evrensel bilgisayarın mantıksal yapısını açıklama maksadıyla tasarlanmış bir "düşünce deneyi"ydi. Oysaki Turing'in makalesinde ayrıntılarıyla açıkladığı ilkeler tüm modern bilgisayarların temelini oluşturmanın yanı sıra, kendini-düzenleyen karmaşık sistemlere yönelik kavrayış sağlıyordu.

Turing'in hayali makinesi, karelere bölünmüş uzun (prensipte sonsuz uzun) bir kâğıt şerit içeriyordu. Bu karelerde de okunabilen, yeri geldiğinde silinebilen veya birbirleriyle değiştirilebilen sembol ya da sayılar bulunuyordu. Turing'in aklında

canlandırdığı, üzerine kurşun kalemle yazılabilen kâğıt şerit gerektiğinde silinebiliyor ve üzerine yeniden yazı yazılabiliyordu. Hayali kurulan bu tasvir günümüzde bir manyetik şeride aittir. Bir ses kasetinin içindeki şerit, hatta bir sabit disk veya onun içindeki katıhal malzemeden oluşan okuma/yazma ünitesi rastgele erişimli bellek (RAM) buna birer örnektir ve bunların hepsi de kullanılış amaçları doğrultusunda mantıksal açıdan birbirleriyle denktir. Bir karedeki sayının okunmasıyla makineye, şerit üzerinde (bellek içerisinde) ileri veya geri gitmesi, şeridin üzerindeki bilgiden nasıl yeni bir sayı hesaplanacağı ve bir karenin içeriğinin ne zaman yeniden yazılacağı komutu verilecekti. Örneğin bir karedeki sembol, sıradaki iki kare içerisindeki sayıları toplayıp çıkan sonucu bu karelerden ikincisinin içine yazması için makineye komut verebilirdi. Şerit üzerindeki komutlar yeteri kadarı belirgin olduğu takdirde, bu yöntemle makine herhangi bir şeyi hesaplayabilirdi. Makine, şeridin bir ucundan veya belirli bir karesinden başlayıp kendi çizgisi üzerinde çalışarak ilerleyecekti. Bu esnada kimi zaman şeridin aynı bölümünde ileri geri gidecek, karelerdeki sayıları yazarak (veya yeniden yazarak) onların içeriğini, okuduğu komutlar doğrultusunda (örneğin "topla"dan "böl"e) değiştirecekti. En sonunda da orijinal mesaj tarafından yöneltilmiş soruya kendi vermiş olduğu cevabını yazmış olarak, şeridin diğer ucunda ya da komutlar tarafından belirlenmiş bir karede duracaktı. Makine belirli bir karede hangi sembolün bulunduğuna bağlı olarak, bir adım sonrasında ne yapacağını her zaman bilirdi. Turing, uygun sembolik dilde ifade edilebilen herhangi bir problemi çözebilecek (şimdi bir evrensel Turing Makinesi olarak bilinen) bu tür bir *evrensel makinenin* var olabileceğini ispatladı.[8] Turing'in deyişiyle bu makinenin:

---

[8] Turing teknik açıdan, bu tür bir makinenin, hesaplanabilir olan, diğer bir deyişle doğru algoritmanın kullanılması halinde belirlenebilir olan her problemi çözebileceğini ispatladı. Bununlar beraber Turing, bazı problemlerin hesaplanamaz olduğunu da ispatladı. *Matematikçilerin derin ilgi* duyduğu bu hesaplanamazlık, aynı zamanda bazı şeylerin algoritmik olarak sıkıştırılabilir olmadığı fikriyle ilişkilidir.

> ... içerisine uygun "komutlar"ı taşıyan bir şeridin yerleştirilmesi halinde, özel-maksatlı herhangi bir makinenin işini yapması, bir başka deyişle herhangi bir hesaplama işini yürütmesi sağlanabilirdi.

Şeridin belirli kısmını yürüten, bilgisayarın hafızasındaki programlanmış yazılım ile birlikte Turing'in makinesini temsil eden donanım, bilgisayarların nasıl çalıştığının tanımı olarak günümüzde en çaylak bilgisayar kullanıcısına dahi o kadar bildiktir ki 1936'da gerçekleşen bu atılımın ne kadar asli olduğunu kavramak çok güçtür. Bu fikirlerin, savaş zamanının getirdiği acil durumun baskısıyla yakın zaman sonra farkına varılacak olan pratik değerini bir kenara bırakacak olursak Turing'in makalesi, yaşam ve diğer karmaşık sistemlere yönelik anlayışla ilişkili derin meselelerin ortaya çıkmasını sağladı. Birçok durum için, Turing makinesinin avantajı, ona bir hesaplamanın nasıl yürütüleceğini söyleyen komutların (algoritmanın) o hesaplamanın ürünlerinden çok daha kompakt olmasıdır. Örneğin π'yi temsil eden sonsuz rakamlar zincirini yazmaya gerek kalmadan π'nin nasıl hesaplandığını belirleyen epey kısa bir algoritma vardır. Çoğu amaç için bu algoritma π'dir. Daha alelade bir örnek verelim: Her ne kadar günlük koşullarda 6x9'un 54'ü tanımlamanın kısa bir yolu olduğunu söyleyemesek de bildik "çarpma" tekniği bir algoritmadır. Turing algoritmik olarak sıkıştırılamayan, dolayısıyla kompakt gösterimlerinin kendileri olduğu sistemlerin var olduğunu gösterdi. Bu kilit kavramla daha önceki kaos tartışmamıza başka bir açıdan bakarken karşılaşmış, bilhassa da evrenin en kısa tanımının yine evrenin kendisi olduğunu görmüştük.

II. Dünya Savaşı patlak verdiğinde Turing halihazırda bu prensiplerin işleyişini gösterebilecek gerçek makineler üretmeye çalışıyordu. Ne var ki bunlar evrensel hesaplama makinelerinin oldukça uzağında kalırdı. Bletchley Park'ta yürütülen şifre kırma çalışmaları sırasında İngiltere kökenli bir proje, tam anlamıyla programlanabilir ilk dijital bilgisayarı geliştirmeyi başardı. Savaşın sonunu izleyen ilk yıllarda Turing, bilgisayarların tasarımı üzerindeki çalışmalarına önce Ulusal

Fizik Laboratuvarında (NPL), ardından da (1948'den itibaren) Manchester Üniversitesinde devam etti. Bu şifre kırma çalışmaları ve bilhassa Turing'in katkısı tarafından sağlanan bilgisayar gelişimine yönelik itici güç, Lewis Fry Richardson'un sayısal hava tahmini hayalini o neredeyse hayattayken gerçeğe dönüştürecek ve bu sayede de Edwars Lorenz'in kaosu yeniden keşfedişinin yolu açılacaktı.

Öte yandan, Turing'in vizyonu halihazırda hızlı bir şekilde genişlemeye devam ediyordu. NPL'de çalıştığı sırada 1947-1948 akademik yılını Cambridge'de geçici görev yaparak geçiren Turing, günümüzde nöral ağlar denilen konu üzerine –yaşadığı günlerde yayımlanmayan– bir makale yazdı. Turing'in bu makaleyi yazmaktaki amacı, yeterli ölçüde karmaşık olan herhangi bir mekanik sistemin, harici bir zekâ tarafından bilfiil programlanmadan da deneyim yoluyla öğrenebileceğini göstermekti. 1950'de Manchester'a yerleşen Turing, mekanik sistemler ve elektronik sistemlerle ilgili edindiği bilgileri biyolojik sistemlere ve insan beynine uyarlamaya hazırdı. Turing'in buradan, embriyoların nasıl geliştiği hakkındaki çalışmasına yaptığı atlama gözüktüğü kadar harika olmadı; çünkü kendisinin ilgi alanı sadece beyinlerin nasıl büyüdüğü ve bağlantılar oluşturduğuyla sınırlı değildi. Canlıların çeşitliliğinin basit başlangıçlardan nasıl geliştiğine yönelik ilgisini, gençliğinde okumuş olduğu D'Arcy Thompson'ın klâsik kitabı *On Growth and Form* [*Büyüme ve Biçim*] tetiklemişti. 1951'de Turing, bilgisayar bilimine katkılarından dolayı Royal Society üyeliğine seçildiğinde bilgisayar üzerine çalışmalarını sürdürüyordu ve yaşasaydı bu çalışmalar, muhtemelen bilgisayar bilimine daha da büyük bir katkı olarak tarihe geçecekti.

Turing bile 1950'lerin başındaki biyoloji anlayışından, beynin kendi ağ örgüsü bağlantılarını nasıl geliştirdiğine dair bir modele doğrudan geçiş yapamadı; ne de olsa DNA'nın çift sarmallı yapısı, diğer bir deyişle yaşam molekülü Cambridge'te çalışan Francis Crick ve James Watson tarafından 1953'e kadar belirlenememişti. Bunun yerine Turing, gelişmekte olan embriyo içerisinde, başlangıçta neredeyse küresel ve neredeyse özelliksiz bir hücreler damlasından nasıl bir yapının ortaya

çıktığı, diğer bir deyişle döllenmiş bir yumurtadan bir blastulanın nasıl meydana geldiği temel problemiyle uğraşmaya karar verdi. Bu, matematiksel açıdan fizikçilerin (özellikle Bénard konveksiyonu gibi) farklı bağlamlarda aşina oldukları simetri kırılması olgusuna ilişkin bir problemdi. Simetri kırılmasına, belirli manyetik madde türlerinin ısıtılmasının ardından sonra soğutulması güzel bir örnek teşkil eder. Demir gibi manyetik malzemeler, küçük çubuk mıknatıslar gibi ufak çift kutupların bir araya gelmiş hali olarak da değerlendirilebilir. (Keşfini 1895'te gerçekleştiren Pierre Curie'nin ismini almış) Curie Noktası olarak bilinen kritik bir sıcaklığın üzerinde, bu çift kutuplar arasındaki her manyetik bağı kırabilecek bir ısı enerjisi mevcuttur. Bu sebeple bu çift kutuplar rastlantısal biçimde sağa sola dönüp karmakarışık bir hal alır; dolayısıyla sonuç olarak toplam bir manyetik alandan söz edilemez. Manyetik açıdan, malzemenin küresel simetrik olduğu söylenebilir; çünkü tercihi bir manyetik yön yoktur. Sıcaklık Curie noktasının (demir için 760 °C'nin) altına düştüğünde, birbirine komşu çift kutupların arasındaki manyetik kuvvetler, azalmakta olan ısı enerjisinin neden olduğu, çift kutupların birbirleriyle karışma eğilimine baskın çıkar. Böylelikle çift kutuplar kuzey kutupları bir yöne, güney kutupları diğer yöne bakacak şekilde dizilerek bir toplam manyetik alan oluşturur ve de orijinal simetri bozulmuş olur. Bu tür bir değişim, faz geçişi olarak adlandırılır ve suyun 0 °C'de bir faz geçişiyle donarak buz haline gelmesine benzer. Faz geçişi kavramının parçacık fiziği için de önem içeren uygulamaları olsa da burada ayrıntılarına inmeyeceğiz. Burada bizi ilgilendiren nokta şudur: Bu tür fikirler 1950'lere dek biyolojide yaygın ölçüde geçerlilik kazanmamış olmasına rağmen o dönemde biyolojik gelişime el atan bir matematikçi için, simetri kırılması bağlamında düşünmek ve mevcut bu tür geçişlerin genel doğasını açıklayan matematiksel araç gereçlere sahip olmak doğaldı.

1952'de Turing, başlangıçta eş dağılımlı olan bir kimyasallar karışımının simetrisinin, farklı kimyasalların söz konusu karışım içerisindeki difüzyonu yoluyla nasıl kendiliğinden kırılabileceğini prensipte açıklayan bir makale yayımladı.

Bunun biyolojiyle olan ilişkisi, makalenin "The Chemical Basis of Morphogenesis"[9] başlığından açıkça görülebiliyordu. Turing'in önermesine göre, matematiksel olarak açıkladığı sürecin bir benzeri, gelişmekte olan embriyonun içerisinde yer alarak başlangıçta örüntü var olmayan yerlerde örüntüler oluşturabilirdi.

Turing'in önermesi ilk bakışta hiç akla yatkın değilmiş gibi göze çarpar. Bizim difüzyondan beklediğimiz, başlangıçta örüntü bulunmayan yerlerde örüntüler yaratması değil, şeyleri birbirine karıştırması ve örüntüleri yok etmesidir. Bir bardak suyun içine bırakılan bir damla mürekkebin eş dağılımlı bir su ve mürekkep karışımı oluşturmak amacıyla bardağın tamamına yayılması buna dair bariz bir örnektir. Oysa Turing neredeyse, bu ölçekte işleyen termodinamik süreçlerin tam tersini, başka bir deyişle zamanın ters yönde işlemesiyle eş dağılımlı su ve mürekkep karışımının tek bir mürekkep damlasıyla onu saran suya ayrıştığını öneriyormuş gibi gözükür. Ne var ki konu bundan ibaret değildi; Turing'in kavrayışının kilit noktası, tanımladığı örüntü-oluşturan sürecin, birbiriyle etkileşim içerisinde olan en az iki kimyasal içerdiğiydi.

Tüm bunlar, kataliz olarak bilinen ve belirli bir kimyasal maddenin (katalizörün) varlığının belirli bir kimyasal tepkimenin gerçekleşmesini teşvik ettiği bir sürece bağlıdır. Bazı durumlarda (A harfiyle temsil edebileceğimiz) bir kimyasal bileşiğin bir kimyasallar karışımındaki varlığı, ondan daha fazlasını oluşturmaya yarayan tepkimeleri teşvik eder. Buna otokatalitik tepkime denir ve daha fazla A bulunmasıyla daha da fazla A üretildiği için bunun, pozitif geri-bildirimin doğrusal olmayan bir süreçte iş başında görüldüğü bir diğer örnek olduğunu söyleyebiliriz. Öte yandan zıt yönde davranış göstererek belirli kimyasal tepkimelerin gerçekleşmesinin önüne geçen kimyasallar da vardır ve inhibitör olarak adlandırılır. Bunlara ilaveten tek bir maddenin aynı anda birden fazla kimyasal tepkimeyi teşvik edemeyeceğini söylemek yanlış olur. A

[9] *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1952, cilt B237, s.37. Bu makale günümüzde kuramsal biyoloji alanındaki en itibarlı makalelerden biri olarak görülür.

katalizörünün daha fazla A üretilmesini teşvik etmekle kalmayıp A'nın üretim hızını düşürme davranışı sergileyen bir başka bileşik olan B'nin oluşumunu da teşvik etmesi halinde Turing, bu kimyasallar karışımında örüntülerin ortaya çıkabileceğini hesapladı. Turing'in büyük önem taşıyan önermesine göre A ile B'nin oluşmasıyla birlikte, bunların kimyasallar karışımı içerisindeki difüzyonu farklı hızlarda gerçekleşecek ve böylelikle karışımın bazı kısımlarında A'nın miktarı B'ninkinden fazla, diğer kısımlarında da B'nin miktarı A'nınkinden fazla olacaktı. Farklı kısımlarda ne miktarda A ve B bulunacağını hesaplayabilmek için Turing kullanabileceği en basit denklemleri kullanmak zorunda kaldı; çünkü elektronik bilgisayarların hâlâ son derece sınırlı yeterlikte olmasının yanı sıra erişimleri de kolay değildi. Dolayısıyla Turing her şeyi kâğıda dökmek zorunda kaldı ve bu da –durumu tanımlayan– doğrusal olmayan gerçek denklemlere, doğrusal kestirimler yapmayla uğraşmak anlamına geliyordu. Üstelik bu denklemler oldukça kararsızdır; çünkü hesaplamaların bir kısmında yapacağınız küçük bir hata ileride büyük bir hataya dönüşür. Sonuç olarak Turing sadece en basit sistemler için ne olup bittiğini hesaplayabilse de bu, mevcut ihtimaller hakkında ipucu oluşturmak için yeterliydi. Fikirlerinin iyiden iyiye araştırılmasının, daha güçlü dijital bilgisayarlar geliştirilinceye dek rafa kalkması gerektiğini kabullenen Turing, buna rağmen fikirlerini 1952 tarihli makalesindekilerin ötesine taşımak için elinden geleni yapmak adına, A ve B arasındaki rekabetin örüntü oluşumunda nasıl kritik bir rol oynadığını gösterdi. Bununla birlikte B'nin karışım içerisindeki difüzyonunun A'nınkinden daha hızlı olma zorunluluğuna dikkat çekti; otokatalitik geri-bildirim süreci vasıtasıyla gerçekleşen A'nın kontrol dışı üretimi her zaman yerel bir olguyken, A'nın B tarafından engellenmesiyse yaygın bir olguydu. Ayrıca, B'nin üretildiği yerden uzağa doğru hızlıca yayılması, onun A'nın kendi kaynağındaki üretimine tamamıyla engel olmadığı anlamına geliyordu.

Gerçekleşenleri gözünüzde canlandırabilmek için, cam bir kavanozda usulca bekleyen bir kimyasallar karışımı hayal edin. Rastlantısal dalgalanmalar nedeniyle, sıvıda A'nın kon-

santrasyonunun biraz daha fazla olduğu bazı noktalar olacak ve bu yüzden bu noktalarda hem A hem de B'nin üretimi teşvik edilecektir. B'nin çoğu bu noktalardan uzağa yayılıp noktalar arasındaki yerlerde A'nın oluşmasına engel olurken, diğer yandan otokatalitik süreç A'nın (ve B'nin) noktalardaki üretiminin devamını sağlar. (Orijinal karışımda rastlantısal dalgalanmaların başlangıçta aşırı miktarda B oluşturduğu yerler de olacaktır; ancak tabii ki buralarda ilginç şeyler meydana gelmez.) Şimdi A kimyasalının kırmızı, B kimyasalınınsa yeşil renkli olduğunu farz edin. Sonuç olarak, başlangıçta eş dağılımlı ve özelliksiz olan sıvı kavanozunun, kendisini (sıvı karıştırılmadığı veya çalkalanmadığı sürece) sıvının içerisinde konumlarını koruyan kırmızı noktalarla bezenmiş yeşil bir denize aniden dönüştürmesiyle karşılaşırsınız. Örüntü kararlıdır; ancak bu belirli örnekte, kimyasalların üretimlerini mümkün kılan bir kaynak ve son ürünlerin uzaklaştırılabileceği bir "musluk" olduğu sürece yeni A ve B'nin oluştuğu dinamik bir süreç söz konusudur. Artık alışıyor olmamız gereken terminolojiyle açıklarsak, ele aldığımız sistemin denge dışı bir halde tutulan, açık ve kayıp bir sistem olması şartıyla, örüntü kararlı ve devamlıdır. Turing, içerisinde gerçekleşen dinamik sürecin (bu tür sistemler gerçek deneylerde yapılabilseydi) her gözlemci tarafından daha da açıkça görülebileceği, değişen bir renk örüntüsünün sıvı içerisinde yayıldığı sistemlerin de matematiksel açıklamasını yaptı. Günümüzde, A gibi otokatalitik bir bileşik çalıştırıcı, B ise inhibitör olarak adlandırılsa da Turing bu terimleri kullanmadı ve B'yi, kendi ölümünün tüyler ürpertici yankılarını barındıran "zehir"[10] olarak tanımladı. Turing'in keşfi bırakın bir beyni, bir embriyonun gelişimini dahi açıklamaktan her ne kadar çok uzakmış gibi gözükse de başlangıçta eş dağılımlı olan bir sistemde (bu şekilde davranan gerçek

[10] Zehirle takıntılıymış gibi görünen Turing'in yaşam öyküsünü yazan Hodges, *Pamuk Prenses ve Yedi Cüceler*'i izlediğinde Turing'in, Kötü Cadı'nın ipe bağlı elmayı kaynayan zehir kazanının içine sarkıtıp "Elmayı zehir dolu suya yatır ki uyutan ölüm içine sızsın" diye mırıldandığı sahneden nasıl etkilendiğini anlatır. Anlaşılan Turing, kafiyeye uydurduğu eylemini gerçekleştirmesinden çok önce de bu kupleyi sayıklamaya bir hayli düşkünmüş.

sistemler olsaydı) simetrinin kırılarak kendiliğinden örüntüler yaratıldığı doğal bir kimyasal yöntem sunuyor olması açısından son derece önemliydi.

Turing'in fikirleri merak uyandırıcıydı. Gelgelelim makalesi bugün kuramsal biyolojide çığır açıcı olarak değerlendirilmesine karşın 1950'lerde ve 1960'ların büyük bölümünde kimyacılar ve biyologlar tarafından çok az rağbet gördü; çünkü onun matematiksel modelinin tanımladığı davranışı gösteren gerçek bir kimyasal sistemle daha önce kimse karşılaşmamıştı. Rus biyokimyacı Boris Belousov hariç kimse demek daha doğru olur. Belousov, bir *Royal Society's Philosophical Transactions* okuyucusu olmadığından Turing'in çalışmasından haberdar değildi; tıpkı Turing'in de kendisinin vakitsiz ölümünden önce Belousov'un çalışmasından haberdar olmadığı gibi. 1950'li yılların başında Belousov, Sovyet Sağlık Bakanlığında çalışmaktaydı ve glikozun vücutta nasıl parçalanarak enerji açığa çıkardığıyla ilgileniyordu. Artık ellili yaşlarının başındaydı ki bu, herhangi bir bilim insanının büyük ve yeni bir keşif gerçekleştirmesi için alışılmadık ölçüde ilerlemiş bir yaştı; özellikle de geçmişinde ordu laboratuvarında çalışmış bir bilim insanı için. Bir kimyacı için oldukça ayırt edici bir unvan olan (aşağı yukarı albaylığa karşılık gelen) *Combrig* rütbesine eriştikten sonra II. Dünya Savaşının sona ermesiyle emekliye ayrılan Belousov'un ordudaki geçmişi hakkında bilinenler bu kadarla sınırlıdır. Onun ilgilendiği glikoz parçalanması, diğer tüm metabolik süreçler gibi enzimlerin faaliyetleri yardımıyla gerçekleşir. Enzimler farklı türde protein molekülleridir ve uygun kurgudaki kimyasal tepkimelerin farklı adımları için katalizör görevi görür. Belousov, bu sürecin en azından birkaç özelliğini taklit edeceğini düşündüğü bir kimyasallar karışımı hazırladı ve önündeki çözeltinin sonuç olarak berraklık ve renksizlikten sarıya, ardından tekrar eski haline düzenli ve tekrarlayan bir ritimle değiştiğini görünce hayrete düştü. Sanki bir kadeh kırmızı şarabın karşısına geçmiş, renginin sihirli biçimde defalarca kaybolup geri gelişini izliyormuş gibiydi. O zaman anlaşıldığı kadarıyla bu, termodinamiğin ikinci yasasıyla zıt düşüyordu. Sarı, daha yüksek entropiye sahip daha

kararlı bir hali temsil ediyor olsaydı sıvının berraktan sarıya dönmesi tam anlamıyla mantıklı olacaktı. Berrak daha yüksek entropiye sahip daha kararlı bir hali temsil ediyor olsaydı sıvının sarıdan berrağa dönmesi tam anlamıyla mantıklı olacaktı. Oysa *her iki* hal de diğerinden daha yüksek entropide olamazdı! Bu sanki zaman ile termodinamik arasındaki ilişkinin anlaşılmasında on dokuzuncu yüzyıla has fikirlerin kullanılması gibi bir şeydi: Zaman oku sıvının içerisinde bir ileri bir geri dönüp duruyordu.

Belousov, hem kendi deneylerinin hem de Turing'in matematiksel modellerinin bir nebze de olsa habercisi olan evvelki bir çalışmadan haberdar olsaydı belki de bu kadar şaşırmayacaktı. Bir diğer matematiksel modelci Avusturyalı Alfred Lotka (1880-1949) varsayımsal bir kimyasal sistemin matematiksel bir tanımını 1910'da yapmıştı. Bu sistem de tıpkı Belousov'u şaşkına uğratan sistem gibi aynı biçimde salınıyordu: İlk olarak bir bileşikten bir miktar üretiyor, ardından tersine dönerek diğer bileşikten bir miktar üretiyordu vs.[11] İtalyan Vito Volterra (1860-1940) ise 1930'lu yıllarda ilk bakışta çok farklıymış gibi gözükebilecek şartlar altında, geri-bildirimin söz konusu olduğu basit süreçlerin nasıl çoğu zaman aynı yasalarla açıklanabileceğine dair sade bir örneği ele almıştı. Örnekte, bir ani yükseliş ve düşüş döngüsünü izleyerek sırayla serpilen bir av, bir de avcı türünden ibaret bir balık popülasyonu yer alıyordu. Volterra, etkileşimin bu şekilde gerçekleşmesi durumunda, Lotka'nın denklemlerinin balık popülasyonlarının nasıl değiştiğini açıklamakta oldukça iyi iş çıkardığını gösterdi. Bunun yanı sıra, Kanada doğumlu bir kimyacı olan ve Berkeley'deki California Üniversitesinde çalışan William Bray (1879-1946) henüz 1921'de, hidrojen peroksit ve iyodat içeren bir kimyasal tepkimenin, bir iyot ve oksijen karışımı ürettiğini ve bu ürünlerin karışımdaki oranlarının aşağı yukarı Lotka'nın belirttiği biçimde salındığını bulmuştu. Bray, keşfini duyurduğunda

[11] Bu şekilde salınan sistemler günümüzde, ritimlerinin düzenliliğinden ötürü "kimyasal saatler" olarak adlandırılır. Yine de bu düzenlilik göreli olmaktan öteye gitmediğinden, bu sistemler gerçek saat olarak kullanılacak kadar hassas değildir.

Lotka'nın modeline atıfta bulunmuş olsa da meslektaşlarının tepkisi temel olarak, bulduğu sonuçların termodinamiğin ikinci yasasını ihlal ettiğinden deneyde bir yanlışlık olması gerektiği yönündeydi. Dolayısıyla Bray'in "keşfi", karışımı oluşturan maddelerin karıştırılırken ve kayıtları tutulurken yapılan dikkatsizlikten ortaya çıkmış bir insan ürünüydü. Belousov da buluşlarını açıklayan bir makaleyi –Turing'in çığır açan makalesini yayımlamasından bir yıl önce– 1951'de yayımlamaya çalışıp neredeyse aynı tepkiyle karşılaştığı sırada Lotka, Volterra ve Bray'in hiçbiri hayatta değildi. Makalesini gönderdiği derginin editörü,[12] Belousov'un sonuçlarının termodinamiğin ikinci yasasıyla çeliştiğini ve deneyinin usulünün hatalı olması gerektiğini ifade etti.

İngiliz astrofizikçi Arthur Eddington'dan yapılacak ünlü bir alıntı sayesinde ikinci yasanın o dönemdeki, kutsal kitap mertebesine yaklaşan konumu hakkında bir fikir edinebiliriz. 1928'de Cambridge University Press tarafından basılan *The Nature of the Physical World [Fiziksel Dünyanın Doğası]* adlı kitabında Eddington şöyle yazmıştır:

> Entropinin daima yükselmekte olduğunu söyleyen termodinamiğin ikinci yasası, Doğa'nın yasaları arasında en yüksek mertebede olanıdır. Birisi kalkıp da kendi teorinizin Maxwell'in denklemleriyle ters düştüğünü söylüyorsa bu, Maxwell'in denklemleri için kötü haberdir. Gözlemle çeliştiği söyleniyorsa deneycilerin kimi zaman beceriksizlikler yaptığı bahanesini öne sürebilirsiniz. Ancak termodinamiğin ikinci yasasına aykırı olması halinde hiçbir ümidiniz yok demektir; teorinizin sizi utanç verici biçimde başarısızlığa uğratmaktan başka şansı yoktur.

Son cümledeki "teori"yi, "deney" ile değiştirdiğinizde Belousov'un aldığı tepkinin aslıyla karşılaşırsınız: O beceriksiz bir deneyciydi ve başarısızlığından ötürü utanç duyma-

[12] Çoğu bültende olduğu gibi burada da, makalelerin yayımlanmaya uygun olup olmadığının incelenmesi için dışarıdan yardımı alınan bir uzmanın (bir "hakem"in) tavsiyesi üzerine hareket edilmiştir.

lıydı. Eddington'un bu yorumunu daha önce onaylayıp alıntı yaptığımı itiraf ediyorum. Bunu yaparken ikinci yasa aslında doğru olmasına karşın, orijinal formülasyonunun kendisinin düşündüğü gibi son gerçeklik olmadığını, dengede olmayan durumlarda ve kütleçekimin söz konusu olduğu yerlerde tekrar gözden geçirilmesi gerektiğini de belirtmiştim. Ne var ki bu, 1951'de yaygın ölçüde anlaşılabilir olmaktan epey uzaktı.

Belousov'un makalesinin reddedilmesine tepkisi, onun yaşına ve geçmişine sahip bir adamdan belki de beklenebilecek ölçüdeydi. Bir deneyci olarak mesleki becerisine leke sürülmesiyle kişisel anlamda hakarete uğramış hisseti ve sonuçları bu şekilde geri çevrilecekse bu alanda bir daha çalışma yapmamak üzere kesin karar aldı. Kendisinden genç bir meslektaşı S. E. Shnoll'un, kendisini direnmeye teşvik etmeye çalışması da işe yaramadı. Çalışmasını yıllarca yayımlatmak adına verdiği uğraşlarının boşa çıkmasından sonra Belousov, bir önceki sene Moskova'da tıbbi radyasyon üzerine düzenlenmiş bir sempozyum için vermiş olduğu tamamen farklı konulu bir raporun basılmış versiyonuna, buluşlarının iki sayfalık özetini iliştirip 1959'da kaçak olarak basılmasını sağladı. Sonrasındaysa Belousov bu çalışmadan elini eteğini çekti.[13] Herhangi bir hakemlik sürecine veya editör onayına tâbi olmayan konferansın yalnızca Rusçada gerçekleşmesi nedeniyle rapor, Sovyetler Birliği dışında neredeyse kimse tarafından okunmadığı gibi, S.S.C.B dahilinde de tam anlamıyla yaygın olarak okunmamıştı. Her şeye karşın Shnoll, Belousov'un çalışmasına olan ilgisini yitirmedi ve 1960'lı yıllarda bir lisansüstü öğrencisi olan Anatoly Zhabotinsky'i bu çalışmaya yönlendirerek onu Belousov'un izinden gitmeye teşvik etti. Bir sonraki kimyacı neslinden yalnızca bir kişi Belousov'un iki sayfalık özetinin peşinden gitmeye cesaretlendirilmişse de bu bir kişi bilim dünyasının dikkatini keşfin üzerine çekmeye yeter de artardı.

---

[13] Reddedilen makalenin orijinalinin İngilizcedeki bir versiyonu nihayet 1985'te yayımlandı: *bkz. Oscillations and Travelling Waves in Chemical Systems*, der. R.J. Field ve M. Burger, Wiley, New York.

Zhabotinsky, Belousov'un keşfiyle tanıştığı sırada Moskova Devlet Üniversitesinde lisans öğrenimi görüyordu ve keşif o kadar ilgisini çekmişti ki tepkimeyi kendisi denemeye karar verdi. (Danışmanınız size belirli bir araştırma problemini incelemenizi "önerdiğinde" bunun ilginizi çekmemesi güçtür.) Tepkimenin Belousov'un tarif ettiği biçimde işlediğini doğruladıktan sonra Zhabotinsky, kırmızı ile mavi arasında gidip gelerek çok daha çarpıcı renk değişimi sergileyen bir karışım üretene dek bileşenleri kurcaladı. Fikri devralanın bir öğrenci olması sürpriz olmamalı; çünkü genç araştırmacılar genellikle büyükleri kadar sabit fikirli olmamalarının yanında, dokunulmaz yasaların altüst edilebileceği ihtimalini göz önünde bulundurmak konusunda daha heveslidir. (Yine de yasalar çoğu kez bu baskıya direnir.) Zhabotinsky'nin 1968'de Prag'da düzenlenen uluslararası bir toplantıda deneyinin sonuçlarını açıklamasıyla, Batılı bilim insanları, artık Belousov-Zhabotinsky veya BZ tepkimesi olarak bilinecek tepkimenin merak uyandırıcı davranışını ilk kez duymuş oldu. Bu eskisinden daha fazla ses getirdi; çünkü bu bilim insanlarından bazıları, görmüş olduğumuz gibi, gerçek kimyasal sistemlerle ilişkili olabileceğini asla düşünmemiş olsalar da Turing'in çalışmasından zaten haberdarlardı. Belousov, Turing'in aksine, keşfinin devralındığını görebilecek kadar uzun yaşamasına rağmen bu tür tepkimelerin önemi tam olarak anlaşılamadan 1970'te hayata gözlerini yumdu.

Şaşırtıcı olmayan biçimde, Zhabotinsky'nin çalışmasını alıp BZ tepkimesinde görülen türdeki salınımları açıklamaya yönelik bir teorik model geliştiren ilk bilim insanlarından biri Ilya Prigogine'ydi. Prigogine'yle Turing'in 1952'de İngiltere'deki tanışmalarında kısa bir süre önce örüntü oluşturmanın kimyası üzerine bir makale yazmış olan Turing, onunla bu çalışmasını tartışmıştı. İlerleyen yıllarda Brüksel'de meslektaşı René Lefever ile çalışmakta olan Prigogine, Turing'in çalışmasını bir kenara bıraktıktan sonra, 1968'in sonlarına doğru, iki kısa-ömürlü ara ürünün yer aldığı çok-aşamalı bir süreç içerisinde iki kimyasal maddenin diğer iki kimyasal maddeye dönüştürüldüğü bir model ileri sürdü. Turing'in nasıl nokta oluş-

turulduğunu açıklayan modelinden sadece biraz daha karışık olsa da, Brusselator[14] olarak tanınan bu modelin işleyişinin ayrıntılarına girmemize gerek yok. Yine de, önem taşıyan nokta olan, tepkimelerde geri-bildirim ve doğrusal-olmamanın rol oynadığını söylemekte fayda var. Tepkimeler zincirinin ürünlerinin sırayla kırmızı ve mavi olduğunu hayal edersek, karışım kayıp bir halde dengeden yeterince uzakta tutulduğu, eklenen hammaddeler sabit şekilde beslendiği ve son-ürünler uzaklaştırıldığı sürece, Brusselator bize sistemin, termodinamiğin ikinci yasasına körü körüne inanan birinin bekleyeceği yönde eş dağılımlı mor rengine yerleşmek yerine düzenli olarak kırmızı ile mavi arasında gidip geleceğini söyler. Tüm süreç, Prigogine ve meslektaşları tarafından halihazırda geliştirilmiş, ikinci yasanın dengeden uzak koşullarda nasıl düzeltilmesi gerektiği anlayışıyla gerçekten de uyuşur.

1970'lerde, kendini-düzenleme vasıtasıyla kendiliğinden oluşturulmuş yapıya sahip gerçek kimyasal sistemlerin hem araştırılması hem de modellenmesi açısından ilerleme kaydedildi. İşin deneysel tarafındaysa, kimyacılar kısa bir süre sonra kimyasal karışımlar içerisinde renk dalgalarının ilerlemesini sağlayan yöntemler buldular. BZ tepkimesini örnek verecek olursak, uygun kimyasal karışımın sığ bir kapta ısıtılmasıyla, kaynaklarından dışa doğru ilerleyen eşmerkezli kırmızı ve mavi renkli çember ve spiraller yaratmak mümkündür. Bunu takip eden yaklaşık yirmi yıllık süreç içerisinde gerçekleştirilen benzer deneylerde geliştirilmiş muazzam örüntüler çeşitliliği arasında, kimyacılar nihayet 1990'larda, tıpkı Turing'in orijinal tanımındaki gibi *hareketsiz* nokta örüntüleri üretmenin bir yolunu buldular. BZ tepkimesinin ayrıntılı kimyası 1970'li yılların başında Oregon Üniversitesindeki bir ekip tarafından araştırıldı. Bu ekip aynı zamanda, Brusselator'daki gibi bazı kısa-ömürlü aracılar da dahil olmak üzere, tüm renk değişimlerini meydana getiren birbiriyle kenetli kimyasal zincirlerde yer alan en az otuz farklı kimyasal türünü tanımlayan ekipti. Bu çalışmalar sonucunda 1974'te, BZ sürecindeki kilit aşamaları, otokatalizin hayati önem taşıyan etkisini de dahil

[14] Brusselator, Brussels [Brüksel] sözcüğünden türetilmiştir –çn.

ederek, beş farklı bağımsız aşamada birbirleriyle etkileşim içerisinde olan sadece altı çeşit kimyasal bağlamında açıklayan bir model ileri sürdü. Bu model ile hem Turing'in modeli hem de Brusselator'un modeli arasındaki fark şuydu: Sonrakiler A, B vs diye etiketlenmiş varsayımsal maddelerle ilgilenirken, Oregon ekibinin modeli fiili kimyasal tepkimelerde yer alan gerçek kimyasal bileşenlerle ilgileniyordu. Model, Oregonator olarak tanındı. Dediğimiz gibi, derinlere inmemize gerek yok; ancak şunu söyleyebiliriz ki buradaki ana fikir, anlaşılması güç bir kendini-düzenleme örüntüsü gibi gözüken bir şeyin, birkaç basit etkileşim bağlamında açıklanabildiğidir.

Konu bu kadarıyla sınırlı değildir. BZ karışımını değişmeyen, eş dağılımlı bir hale geleceği biçimde düzenlemek sahiden de mümkündür. Yeni hiçbir bileşen eklemeden yeteri kadar beklerseniz, karışım son olarak tamamen kendiliğinden durulacaktır. Şimdi bir miktar daha tepkiyen eklediğinizdeyse bahsetmiş olduğumuz salınımlı davranış başlar. Böylelikle sistem bir periyotlu halden iki periyotlu hale geçmiş ve bir çatallanma meydana gelmiştir. Sonrasında bizi ne beklediğini tahmin edebilirsiniz. Yeni bileşenlerin sisteme akış hızını ve "artık ürünler"in uzaklaştırılma hızını giderek artırırsanız, kritik bir eşikte sistemin dört periyotlu hale çatallanmasıyla birlikte, salınımlı örüntü çift ritim sergileyerek daha karışık bir hale gelir. Tepkiyenlerin akışı hızını artırmaya devam ettiğinizdeyse, su damlatan musluktan ve öncesinde bahsettiğimiz diğer örneklerden aşina olduğumuz periyot katlamanın peşi sıra basamakları tüm görkemiyle belirir, periyodik örüntünün belirginliği azalır ve sistem eşiğin öbür tarafına atlayarak kaosa geçer. (Bu durumda, sözü edilen süreç daha hızlı işler; çünkü periyot dörtten sonra her şey adeta bir telaş içerisinde gerçekleşir.) Kendini-düzenleme ve eş dağılımlı sistemlerden kendiliğinden örüntüler doğması başta olmak üzere, açıkladığımız tüm ilginç şeyler kaosun eşiğinde gerçekleşir. Tüm bunlar, tıpkı daha önce ele almış olduğumuz örneklerde olduğu gibi faz uzayı, limit çevrimleri ve çekiciler dilinde de açıklanabilir. Bir BZ tepkimesinin gelişimini açıklayan, faz uzayında güzergâhlarla ilişkili tuhaf çekiciler bulunduğuna dair delil

bile vardır.[15] Tüm bunların, hikâyemizin buraya kadarki bölümüyle ilişkilendirilişini görmek güzel olsa da Turing'in (embriyolojinin, büyüyen embriyodaki örüntü ve şekil gelişimini ele alan bir yanı olan) morfogenez sürecine kavrayış sağlama ümidinden epey uzaklaşmış gibi duruyoruz. Bu bakımdan, bulunmamız gereken yere dönelim ve Turing'in fikirlerinin, bir embriyonun kapsamlı gelişimine yönelik asli bir katkı olduğu henüz ispatlanmamış olmasına karşın (yine de bu konuya yönelik çalışmalar sürmektedir), çarpıcı ve açıkça görülür biçimde başarılı olduğu belirli bir alan olduğunu belirtelim.

Turing mekanizmasının bu zaferi, memelilerin deri ve postlarında gelişen çizgi ve noktalar gibi izlerin yanı sıra daha genel anlamda diğer hayvanların yüzeylerindeki örüntülerin nasıl biçimlendiğiyle de ilgilidir. İlk olarak Oxford Üniversitesinde, ardından Seattle'daki Washington Üniversitesinde çalışan James Murray bu araştırmaya büyük ölçüde katkıda bulundu. Murray, 1988'de *Scientific American*'da yayımlanan "How the Leopard Gets Its Spots"[16] başlıklı, okunabilirliği yüksek bir makalede keşiflerinin çoğunu bir araya topladı. (Bu çalışmanın tamamı, kitabı *Mathematical Biology'de* nispeten daha teknik, ama daha az okunabilir haliyle görülebilir.) Murray, yalnızca leoparın noktalarının değil, bir zebranın çizgilerinin, bir zürafanın üzerindeki iri lekelerin ve hatta bir fare veya filin postunda örüntüleniş olmamasının, kritik bir evredeki, gelişmekte olan embriyonun yüzeyindeki çalıştırıcı ve inhibitör kimyasalların difüzyonunu içeren aynı basit süreç vasıtasıyla açıklanabileceğini buldu. Örüntüleniş sürecinin kesin olarak bu şekilde işlediği henüz kimse tarafından kanıtlanmış değil; ancak bu tür bir örüntüleniş sürecinin iş başında olduğu varsayıldığında, oluşacak örüntü çeşitlerinin bunlar olacağı kesinlikle doğrudur. Bu fikrin, özellikle basitliğinden kaynaklanan muazzam bir cazibesi vardır. Bir düzeyde,

---

[15] Bu buluş, Austin'deki Texas Üniversitesi bünyesindeki bir ekip tarafından 1983 yılında gerçekleştirildi. İleride, "Turing Noktası" örüntüsünü oluşturan ilk bilim insanlarından biri olacak Harry Swinney de bu ekibin bir üyesiydi.

[16] "Leoparın noktaları nasıl oluşur?" Cilt 258, sayı 3, s. 80.

DNA kodunun tek bir bireyin bedeninin inşasını tanımlaması bağlamında, fiilen "gelişimin şu aşamasında şu iki kimyasalı sal" komutunu veren bilginin saklanması, erişkin bedendeki her nokta ve çizginin kesin konumunu eksiksiz olarak tanımlayan gerçek anlamdaki bir taslaktan çok daha az yer (bilgisayar benzetmesi kullanıldığında daha az hafıza) kaplar. Diğer bir düzeydeyse, farklı hayvanların bedenlerinde farklı türde örüntülerin neden ve nasıl ortaya çıktığını ve bazı hayvanların neden hiç örüntüye sahip olmadığını açıklayan tek bir basit mekanizmanızın olmasını, her farklı hayvan türündeki her farklı örüntü türünü tanımlayan farklı birer taslağa sahip olmaya tercih edersiniz. İleride de göreceğimiz gibi, orijinali Turing tarafından ileri sürülen ve Murray ile çağdaşları tarafından masaya yatırılan basit mekanizma çeşidi, evrimin mekanizmalarına yönelik önemli kavrayışlar sağlar. Bilimde bir problemin en basit çözümünün, onun kesin doğru çözümü olduğu ***her zaman*** için doğru değildir. Yine de, Ockham'ın Usturası[17] olarak bilinen bu yaklaşım, çoğu koşul için son derece güvenilir bir pratik yöntem teşkil etmiştir ve ortada aksini gerektirecek baskın bir neden bulunmadığında en basit çözümü seçmek kesinlikle her zaman için akla yatkındır. Bu durumda da, yap-boza yönelik en basit çözüm Turing sürecidir.

Memelilerin bedenlerinin yüzeylerinde gördüğümüz örüntüler ya deri renkleri ya da postlarındaki tüylerin derinin belirli bir bölgesinden uzadıkça edindiği renklerdir. Her iki koşulda da renk, derideki bir şeyin varlığı ile belirlenir. Bir tekir kedisindeki izlerde, şaşırtıcı biçimde bu renklerin pek azı –siyah, beyaz, kahverengi renkleri ve turuncu-sarıdan oluşan bir renk yelpazesi– yer alır ve bu yelpazenin hemen hemen tamamı izlerde mevcuttur. Renkler derideki hücreler tarafından üretilen iki pigmentin mevcut veya eksik olmasına, renklerin yoğunluğu ise her pigmentten ne kadar bulunduğuna bağlıdır. Bu pigmentlerden eumelanin siyah veya kahverengini verirken, feomelanin sarı veya turuncu rengi verir. Hiçbir melanin

[17] Yaklaşıma, "olgular gerekmediği takdirde çoğaltılmamalıdır." diyen İngiliz mantıkçı ve felsefeci Ockham'lı William'ın (yaklaşık 1285–1349) adı verilmiştir.

bulunmaması durumundaysa tüy veya deri beyaz kalır. Peki belirli hücrelerin "çalışır halde" olup melaninlerin hangi çeşidinden ne miktarda üreteceğine karar veren nedir? Murray'in başarısı, tam olarak hangi kimyasalların yer aldığını henüz bilmememize karşın gerçek, canlı hayvanlarda gördüğümüz örüntülerin tam olarak (ve yalnızca) Turing tepkimeleri vasıtasıyla üretilecek olan örüntüler olduğunu ortaya koydu. Hatırlayacağınız gibi, Turing tepkimelerinde, embriyonun gelişiminin ilk evresi olan ana rahmine düşüşle başlayan birkaç haftalık süreç içerisinde gerçekleşen, büyümekte olan embriyonun yüzeyi üzerindeki bir çalıştırıcı ve bir inhibitörün difüzyonu yer alıyordu. (Örneğin toplam 360 gün gebelik dönemi yaşayan zebrada, derideki örüntülerin tohumunun, ana rahmine düşüşten yaklaşık 21-35 gün sonra atıldığına dair delil mevcuttur.) Bu kimyasallardan birinin mevcut oluşunun, aynı zamanda, daha sonra bir hücrenin melanin üretebilme becerisini çalışır duruma getirmesi halinde ortaya çıkacak sonuç, BZ tepkimesinin sığ-kap versiyonlarındakine denk bir örüntünün, o hücrelere görünmez biçimde damgalanması olacaktı. Ne var ki bu örüntüler yalnızca, başka herhangi bir kimyasal tetikleme (veya tüyün uzaması) melanin üretilmesini söyleyen bir mesaj yolladığı zaman yaşamda kendini gösterecekti. Bu mesajsa derideki tüm hücreler tarafından alınacak, ancak yalnızca Turing tepkimeleri esnasında belirlenmiş hücreler tarafından eyleme geçirilecekti.

İşin özeti olarak, sözü geçen biyokimyasal süreçler hakkında fazla kafa yormadan, Murray'in yapması gereken "tek" şeyin, farklı gelişim evrelerindeki memeli embriyolarınınkine benzeyen yüzeylerde Turing tepkimesi sonucunda oluşan örüntülerin hangi yollarla şekillendiğini tahmin etmekte kullanılabilecek matematiksel bir model geliştirmek olduğunu söyleyelim. Sürecin yüzeyler üzerinde (veya içerisinde) hareket eden dalgalar içermesi sebebiyle, yüzeyin hem büyüklüğü hem de şekli, tepkime tarafından üretilen örüntüyü etkiler. Murray'in dikkat çektiği gibi durum, bir davulun gergin zarından çıkarılan seslerin davul zarının büyüklüğüne ve şekline bağlı olmasına görünüşte bir hayli benzer; çünkü farklı

büyüklükteki ses dalgaları (başka bir deyişle, farklı müzik notaları anlamına gelen farklı dalga boylarındaki ses dalgaları) belirli bir düzen çerçevesinde farklı büyüklükteki zarlara sığar. (İki sistem arasında gerçekten oldukça yakın bir matematiksel benzetme bulunsa da yer alan fiziksel süreçler çok farklıdır.) Murray, Turing tepkimesinin tetiklendiği anda yüzeyin çok küçük olması halinde hiçbir örüntünün oluşamayacağı sonucuna vardı. Bu şu manaya gelir: Mekanizmanın işleyişe geçebilmesi için yeterli yer yoktur veya diğer bağlamda düşünmek isterseniz, tepkimeyle ilişkili "dalga boyu" zarın boyutundan büyüktür ve dolayısıyla örüntü görülemez. (Duvarda kullanılmak üzere tasarlanmış bir boya rulosu kullanarak küçük bir tuval üzerine narin hatlar çizmeye çalışmak buna benzetilebilir.) Diğer uç nokta olan, görece büyük yüzeylerin işe dahil olduğu yerde etkileşimler, kapsamlı herhangi bir örüntünün oluşmasına izin vermeyecek denli karışık duruma gelir. Bu, sanki aynı anda farklı birçok konuşma yapılan bir odada ortaya çıkan eş dağılımlı bir curcunaya benzer. Aslında, büyük yüzeylerde çok hassas ölçekli bir "örüntüleniş" bulunması mümkündür. Örneğin yeterince yakından baktığınızda bir filin yüzeyindeki bütün tüylerin tamı tamına aynı renk olmadığını görürsünüz; ancak uzaktan bakıldığında fil eş dağılımlı bir renktedir. Bu, tıpkı puantilist[18] bir resmin içerisindeki, biraz uzaktan bakıldığında eş dağılımlı bir rengin içine karışan çok hassas yapıdaki renk noktalarına ya da tıpkı çene çalan insanlarla dolu bir odada tüm gürültüye rağmen komşunun ne dediğini çıkarabilmemize benzer. Dolayısıyla modele göre, hem çok küçük hem de çok büyük memeliler doğada tam olarak karşılaştığımız gibi örüntüsüz yüzeylere sahip olmalıdır. Peki ya bu uç noktaların arasında neler meydana gelmektedir?

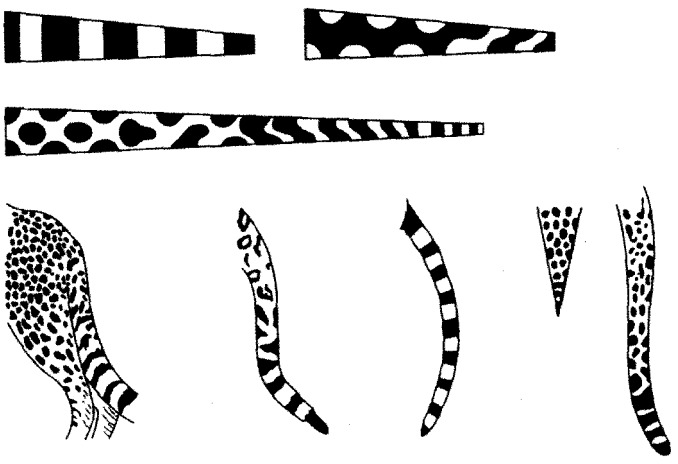
Boyut bakımından küçükten başlayıp büyüğe doğru ilerlersek, oluşabilecek ilk örüntü çeşidi oldukça geniş şeritlerden

[18] Puantilizm [noktacılık] tekniğiyle yapılan resimlerde, çok sayıda ufak temel renk noktasının birbiriyle karıştırılmadan bir araya getirilmesiyle izleyicinin gözünde çeşitli ara renklerin yanılsaması oluşturulur –çn.

meydana gelir, sonrasında sırasıyla çizgiler, noktalar ve sınırları aralarındaki dar çubuklarla bölünmüş iri lekeler görülürken daha büyük yüzeylerde lekeler yine eş dağılımlı bir renk içerisine karışıp kaybolur. Oluşturulan bu örüntülerin tümü, doğada görülen örüntüler yelpazesini bir hayli andırır. (Yine küçükten büyüğe doğru gidildiğinde leoparın noktaları, bir zebra veya bir kaplanın çizgileri ve bir zürafanın lekeleri gibi.) Murray konuyu kitabında şöyle özetler:

> Modelin oluşturduğu örüntüler ile hayvanların geniş çeşitliliğinde bulunan örüntüler arasında hayrete düşüren bir benzerlik olduğunu görüyoruz. Simülasyonlarımızdaki parametrelere getirdiğimiz sınırlamalara rağmen, muhtemel örüntülerin zenginliği dikkate değerdir. Örüntüler tepkime bölgesinin geometri ve ölçeğine fazlasıyla bağlı olsa da, daha sonra büyüme halinde başlangıçtaki örüntüde çarpıklık meydana gelebilir... Tek bir mekanizmanın, memelilerin postlarındaki gözlemlenmiş tüm örüntüleri oluşturabileceği fikri oldukça cazip bir fikirdir.

Gelgelelim elbette ki bir hayvanda, örüntü oluşumunu mümkün kılan biyokimyasal bir mekanizma bulunsa dahi, bir örüntü yer almak *zorunda değildir*. Mekanizmanın çalışır durumda olmama ihtimali her zaman mevcuttur. Bununla birlikte, örneğin bir kutup ayısının neden eş dağılımlı beyaz renge sahip olması gerektiğine dair bariz evrimsel gerekçeler vardır. Diğer yandan, örüntülerin gelişmiş olduğu yerlerde, örüntü çeşidi ile müsait yüzeyin boyutu arasındaki bağıntıya dair çok düzgün bir örneğe kedi ailesinin çoğu üyesinin kuyruğunda rastlanabilir. Aşağı yukarı silindirik vaziyetteki kuyruklarda bulunan örüntüler, noktalar veya kuyruğu çevreleyen dairesel şeritler ya da çizgiler şeklinde olabilir. Jaguarınki gibi uca doğru sivrilen kuyruklar içinse, alt kısım noktalarla kaplı olsa bile uç kısım çizgili şeritlerle bezelidir. Bu örnek, modelin; daha küçük alanlarda şeritlerin, daha büyük alanlarda ise noktaların oluşacağı tahminiyle aynı doğrultudadır.



Şekil 4.2 *Bir hayvanın bedeninde bulunan, bir embriyonun gelişimi esnasında meydana gelen kendi kendini düzenlemiş kimyasal süreçler tarafından üretilmiş örüntüler (aşağıda) o hayvanın boyutuyla ilişkilidir. Kimyasal difüzyon süreçleri daha küçük alanlarda çizgiler üretirken, daha büyük alanlarda noktalar üretir.*

Modelin önemli özelliklerinden bir diğeri, bir hayvanın yüzeyinde oluşan örüntü çeşidinin, erişkinin boyut ve şekline değil, Turing sürecinin iş başında olduğu esnada embriyonun boyut ve şekline bağlı olduğudur. Erişkinin boyutuyla da bir miktar bağıntı olduğu açıktır; çünkü ana rahmine düşüşten kısa bir süre sonrasından itibaren fil embriyoları, fare embriyolarının aynı gelişim evresinde olduklarından daha büyük olma eğilimindedir. Gelgelelim iki farklı zebra türü olan *Equus burchelli* ve *Equus grevyi*'deki çizgilerin arasındaki farklılıklar embriyo boyutunun öneminin altını güzel bir biçimde çizer. İlk türün, diğerine oranla daha seyrek ve daha geniş çizgileri vardır. Bu yüzden, bu iki farklı zebra türünü yan yana getirdiğinizde, erişkin boyutları aşağı yukarı aynı olsa bile belirgin bir şekilde birbirinden farklı durur. J. B. L. Bard, her iki zebra için, çizgi sayılarını sayarak ve hayvanın büyümesinin örüntülerde yol açtığı çarpıklıkların nasıl meydana gelmiş olduğunu hesaba katarak, *burchelli*'nin üzerinde görülen örüntülerin tohumu-

nun embriyo yirmi bir günlükken, *grevyi*'nin üzerinde görülen örüntülerin tohumunun ise embriyo 5 haftalıkken atılmış olması gerektiğine işaret etti. Murray, Turing etkisinin matematiksel modelini ileri sürmeden önce de bu biliniyor olmasına rağmen, –çalıştırıcı ve inhibitörün embriyo yüzeyi üzerindeki difüzyonunun daha erken gerçekleşmesinin, daha geniş çizgilere karşılık geliyor oluşundan dolayı– farklılıklar, modelin tahminleriyle tamı tamına uyuşuyordu. Genetik ve çevrenin ("doğa" ve "yetişme"nin) bu şekilde birleştirilmesinin çarpıcılığına 2002 yılı başında, klonlanan ilk kedinin dünyaya geldiği haberinin yayınlanmasıyla dikkat çekildi. Çok-renkli hayvanlardaki renk örüntülerinin, onların genetik mirasları ile (gelişmekte olan embriyonun aldığı besin miktarı gibi) rahimde meydana gelen olayların birleşiminin bir sonucu olması nedeniyle, yavru kedinin kürkündeki örüntü izleri, özdeş DNA'lara sahip olmalarına rağmen annesindekilerin tamı tamına aynısı değildi.

Bu değindiklerimiz, aynı zamanda tüm bunların evrim anlayışımız için ne kadar önemli olduğunu bize hatırlatır. İki zebra türündeki örüntülerin arasındaki gözle görülür farklılıklar sadece, embriyoda Turing etkisinin iş başında olduğu zamanın değiştirilmesiyle meydana getirilir. Bu belirli durumda, iki örüntü de bildiğimiz kadarıyla evrimsel bir üstünlüğe sahip değildir. (Anatominin her özelliği uyumsal olmak zorunda değildir.) Yine de biz daha ince (veya daha kalın) çizgilere sahip olmanın –belki de daha iyi kamuflaj sağlama açısından– bir üstünlük sağladığını varsayalım. Bu varsayım çerçevesinde, –hayal edilebilecek en küçük "mutasyon"lardan biri sayılabilecek– embriyonun gelişim esnasındaki belirli bir olayın *zamanlamasının* değiştirilmesi dışında başka hiçbir değişiklik yapılmadan, bireyler arasındaki doğal çeşitliliklerin, seçilim baskısına cevap verecek hammaddeyi nasıl sağlayabileceğini ve bir zebra türünün tüm popülasyonunu o doğrultuda nasıl değiştirebileceğini kavramak kolay olurdu. Kitabımızın kalan kısmında evrim hakkında söyleyeceğimiz daha birçok şey olacak; ama gerekli zemini hazırlamak adına, dış görünüşün basit kimyasal süreçlerin kontrolü altındaymış gibi gözükme-

si hakkındaki birkaç örneğin daha altını çizmekte yarar var. Murray'in, memelilerin izlerini nasıl aldıkları modelinin, bu model türünün ilklerinden olması ve Turing mekanizması ile BZ tepkimesi tartışmamıza doğal bir ilerleme sağlaması sebebiyle bir nebze ayrıntısına girdik. Gelgelelim çalışma prensipleri birbirine çok benzediğinden, bu diğer modellerin ayrıntısına inmemize hiç gerek yok.

Daha ileride yer vermemiz gereken evrim tartışmamıza geçmeden, öncelikle Darwinci doğal seçilim sürecinin kısa bir özetini yapmak muhtemelen faydalı olacaktır; çünkü evrim ve doğal seçilim arasındaki ilişki oldukça kafa karıştırıcıdır. Evrim, hem canlı organizmalarda hem de fosil kayıtlarında iş başında olduğu görülen bir süreç, bir gerçekliktir.[19] Aynı şekilde, elmanın ağaçlardan düşüşü ve ayın dünyanın çevresindeki yörüngesini takip edişi de birer gerçekliktir. Elmanın ve ayın (ve diğer şeylerin) hareketi kütleçekim teorisiyle açıklanır. Newton'un teorisi çoğu insan ihtiyacı için yeterliyken, çökmüş yıldızlar gibi uç olgularla uğraşıyorsanız Einstein'ın teorisi uygundur. Evrim Darwin'in doğal seçilim teorisiyle açıklanır. Bu teori bugün dünyadaki çoğu amaç için uygundur; ancak tıpkı Newton'un teorisi gibi, zamanında fikir babası için bilinmez olan şeyleri hesaba katmak amacıyla bu teori üzerinde de değişiklikler yapılmıştır. Newton'un teorisi kütleçekim için ne ifade ediyorsa, Darwin'in teorisi de evrim için aynı şeyi ifade eder; ancak Einstein'ın kütleçekimin bir evrimsel karşılığı, diğer bir deyişle Darwin'in teorisinin ötesine taşarak bugün bilinen tüm gerçeklikleri bünyesinde barındıran eksiksiz bir evrim teorisi –Darwin'in teorisinde nasıl değişikliklerin yapılması gerektiği hakkında çeşitli öneriler ileri sürülmüş olsa da– henüz elimizde yoktur. Darwin'in teorisinin esası, evrimsel teori anlayışımızın nüvesinde yer alır ve yavrunun ebeveynlerine olan benzerliğinin kusursuz olmadığını, dolayısıyla hem nesilden nesle hem de her nesildeki bireyler arasında çeşitlilikler bulunduğunu söyler. (Bir parçanın, ait olduğu yap-boza uyması gibi.) Çevrelerine en iyi uyan bireyler besin

[19] Günümüzde evrimin iş başında görüldüğü örnekler içerisinde en sevdiklerim "süper-mikrop"ların antibiyotiklere, bitki zararlılarınınsa böcek ilaçlarına karşı nasıl direnç geliştirmiş olduklarıdır.

bulma, çiftleşme ve –hayati önem taşıyan– üreme açısından en başarılı olanlardır. Bu bireyler böylelikle yeni nesle daha çok yavru aktarır. Bu yavrular da ebeveynlerini andırdıklarından, ebeveynlerini başarılı kılan belirli özellikleri kalıtım yoluyla edinir; ama bu edinim muhtemelen ufak farklılıklarla gerçekleşir. Sonraki nesiller için de bu böyle devam eder.

Bu, her nesildeki en uyumlu olanın seçildiği bir doğal seçilim sürecidir. Klâsik örneğe göre ağaçların tepelerindeki sulu meyvelere erişebiliyor olmak bir avantajsa, uzun boyunlu otçullar hayatta kalma mücadelesinde daha başarılı olup daha fazla yavrulayacakken, daha kısa boyunlu otçullar daha az besine erişerek yavrulamakta daha fazla zorluk çekeceklerdir. Uzun veya kısa boyunluluk eğiliminin kalıtım yoluyla edinildiği, ancak bireyler arasında hâlâ çeşitlilikler bulunduğu (ortalama ne olursa olsun, bazı boyunlar ortalamadan daha uzun veya kısadır) takdirde, uzun boyunluların lehine olan seçilim baskısı, nesiller geçtikçe zürafa gibi bir canlı varlığın evrilmesine yol açar. Çeşitlilik yaşamın yalnızca baharatı olmakla kalmaz, aynı zamanda yaşamın işleyişinin tam kalbinde yatar. Darwinci teori, canlı türlerinin ekolojik nişlerine –bir anahtarın kilidine uyduğu gibi– fevkalade uygun olması gerektiğini çok güzel açıklar. Diğer yandan teorinin, seçilim bağlamında evrimsel açıdan nötr olan ve ait olduğu bireye ne avantaj ne de dezavantaj bahşeden özelliklerin var olmasına alan sağladığını kavramak da önemlidir. Bunlara örnek olarak, bazı alelade salyangozların kabuklarındaki çizgili örüntülerde görülen çeşitlilikleri verebiliriz. Bu salyangozlar aynı türden olmalarına rağmen birbirlerinden çok farklı gözükebilir. Hatta bu farklılık, aynı türden olmayan bir *burchelli* zebra bireyiyle bir *grevyi* zebra bireyi arasında gözüken farklılığın çok daha ötesinde bile olabilir. Artık, yeteri kadar üzerinde durduğumuz evrimin temellerini bir kenara bırakıp hikâyemizde ilerleyebiliriz.

Murray'in, Turing mekanizması tarafından oluşturulan çizgiler ve noktalar üzerindeki çalışmasından bu yana, doğaya ait örüntülerin daha birçoğu Murray ve diğerleri tarafından aynı usulle araştırılmaya devam etti. Bu araştırmaların, üzerinde durduğumuz hikâyeyi en yakından ilgilendirenlerinden birini, Tübingen'deki Max Planck, Gelişim Biyolojisi Enstitüsün-

de çalışan Hans Meinhardt ve meslektaşı André Koch yürüttü. Murray'inkine benzer ancak Turing tepkimesi yerine BZ tepkimesi mekanizmasını temel alan bir yaklaşım kullanan bu ikili, embriyonun gelişimi dahilindeki uygun bir zamanda, embriyo zarı üzerinde rastgele yerlerde bir çalıştırıcının tetiklenmesiyle, (bir leoparın üzerindeki noktalara karşılık gelenler de dahil) canlılardakilere bir hayli benzer örüntülerin matematiksel modellerinde üretilebileceğini keşfetti. Bu belirli model, temelinde yatan kimya çok basit olmasına rağmen daha karışık örüntüler üretebildiğinden avantajlıdır. Deniz canlılarının kabuklarındaki örüntüler de çalıştırıcı ve inhibitör bileşenleri içeren bazı kimyasal süreçlerden üretmelerini bekleyeceğimiz örüntülerle eşleşir ve çoğu biyolog bu sürecin iş başında olduğu bir canlı türü bulmuş olabileceğine inanmaktadır. *Pomacanthus imperator,* diğer adıyla keler balığının erişkininde, balığın kafasından kuyruğuna dek boylu boyunca uzanan paralel çizgiler bulunur ve balık büyüdükçe bu çizgilerin yenileri oluşur. Büyüme esnasında çizgilerin her birinin büyüklüğü aynı kalırken çizgileri birbirinden ayıran boşluklar da sabit kalır. Yeni çizgiler, tıpkı bir noktalar kümesinde çatallanan tek bir tren rayının dallanıp birbirine paralel iki yol oluşturması gibi, önceki çizgilerin bazılarında bulunan çatallardan gelişir. 1990'larda Kyoto Üniversitesinde çalışmakta olan Shigeru Kondo ve Rihito Asahi tam olarak bu davranış örüntüsünü Turing mekanizmasını kullanarak yeniden üreten bir matematiksel model geliştirdi. Bu, Turing sürecinin ta kendisinin, embriyonik gelişme esnasında tek seferde gerçekleşmiş bir olay olmaktan ziyade, bu erişkin balıklarda hâlâ gerçekleşiyor olduğunu öne sürer ve söz konusu süreçte yer alan mevcut kimyasalların yakında teşhis edilebileceğine yönelik ümidi artırır.

Benzer modeller kelebeklerin kanatlarında oluşan örüntüleri taklit etme amacıyla da kullanılmıştır. Birazdan değineceğimiz konuyla ilişkili olması sebebiyle, böyle daha birçok uygulama arasından bu örneği seçmek yerinde olacaktır. Murray, yüzeysel olarak gözleri andıran iri noktaların oluşumu da dahil olmak üzere, bu kanat örüntülerinin çoğu özelliğini üreten mekanizmalar üzerinde çalıştı. (Bu noktaların evrim vasıtasıyla seçildiği düşünülür; çünkü bir avcı, kelebeğe kısa

bir bakış attığında, leziz bir yemektense daha büyük bir yaratığa ait bir çift gözün kendisine baktığını sanabilir.) Bu çalışmanın bir yönü, bu gibi örüntülerin, kelebeğin genetiğinde saklanan karışık bir taslağa gerek kalmadan, temel kimyayla kolaylıkla üretilebileceğini ve böylelikle bu tür bir özelliğin evrim vasıtasıyla seçilmesinin gerçekten ne kadar olası olduğunu gösteriyordu. Öte yandan model, mahsus bu durum için, ilgili kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği şartların aşama aşama değişmesi halinde, göz noktası örüntüsünün asli bir özelliği olan yarıçapının da aşama aşama değiştiğini söylüyordu. Örneğin bir sıcaklıkta gelişen kelebekler belirli boyutta göz noktalarına sahip olurken, farklı bir sıcaklıkta gelişen kelebekler farklı boyutta göz noktalarına sahip oluyordu ve noktalarla sıcaklık arasında devamlı ve düzgün bir bağıntı ortaya çıkıyordu. Buna sadece yorum getirmekle yetinelim; çünkü sözünü etmekte olduğumuz temelde yatan kimya çeşidinin doğurabileceği tek davranış örüntüsü bu değildir. Bazı süreçlerde, tepkimelerin gerçekleştiği ortamda meydana gelen küçük değişiklikler kritik bir noktaya erişilene kadar büyük bir etkiye neden olmaz. Süreç, bu kritik nokta aşıldığında aniden yeni bir işleyiş fazına geçer. Murray'in atıfta bulunduğu, bu şekilde hassas bir süreci ele alan bir örnek, omurgalı uzuv üzerinedir. Parmakların büyümekte olduğu gelişim evresinde yer alan biyokimyasal süreçler ufak çapta sekteye uğratıldığında ortaya çıkan sonuç, biraz büyük veya küçük bir el değil altı parmaklı bir eldir. Bu, gelişim sürecinde küçük bir değişime yol açan bir mutasyon (bir genin DNA kodunun maruz kaldığı, bir kopyalama hatasından kaynaklanabilecek küçük bir değişiklik) vasıtasıyla doğal yollarla meydana gelebilir. Değişikliğe uğrayan DNA, sonrasında, mutasyon zararlı değilse alt nesillere aktarılacaktır. Aileler içerisinde bu tip özelliklerin devamlılığını sürdürmeye meyilli olması bundan kaynaklanır. 8. Henry'nin eşlerinden biri olan ve bir elinde altı parmakla dünyaya gelen ancak bunlardan biri çabucak kesilen Anne Boleyn'in ailesi için bunu söyleyebiliriz. Gelişim biyologları arasında ünlü olan, konuya ilişkin başka bir örnekteyse bir çeşit çift eli olan Boston'lu bir adam rol alır. Adamın elinde başparmak yoktur ve başparmağın bulunması gereken yerin iki yanında, birinde üç, diğerinde dört parmak

bulunan iki küme halinde dizilmiş yedi parmak vardır. Bir uzuv tomurcuğundan diğerine hücre nakledilmesiyle de benzer yapılar meydana getirilebilir.[20] Ayrıca bu yapılar uygun modeller (Turing mekanizması gibi kaosun eşiğindeki kayıp sistemlerde meydana gelen süreçleri açıklayan modeller) aracılığıyla matematiksel olarak açıklanabilir. Burada üzerinde durmamız gereken nokta şudur: Çevredeki küçük değişiklikler ya da küçük mutasyonlar, gelişmekte olan vücut üzerinde bazen büyük etkilere yol açabilir. Bu, Darwin'e yaşadığı dönemde bilinmez olan görece yeni şeylerden biri olmakla birlikte evrimin işleyişinin içyüzünü daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Gelgelelim diğer koşullar altında aşama aşama değişimin söz konusu olduğunu hatırlamamız gerekir. Murray'e göre:

> Odaklandığımız belirli örüntüleme özelliği ve mekanizmaya bağlı olarak, şekilde adım adım veya kesikli değişim meydana gelir ... evrimin nasıl gerçekleştiğini anlamanın yolunun, ilgili morfogenetik süreçlerin anlaşılmasından geçtiği apaçıktır.

Aslına bakarsanız morfogenez konusunu daha fazla didiklememizin lüzumu yok. Bu tartışmayı geride bırakırken beraberimizde götürmemiz gereken, morfogenez ve evrimsel biyolojide küçük etkilerin bazen küçük, bazen de büyük değişikliklere yol açabileceği –ve bunun, çok basit bir kimyayı kapsayan örüntü-oluşturma modelleri bağlamında, prensipte anlaşılabileceği– bilgisidir. Küçük ve rastlantısal değişikliklerin aynı zamanda dünyanın tümünde de, özellikle kaosun eşiğindeki kayıp sistemler konu olduğunda büyük veya küçük etkilere yol açabileceği –ve bunun neden ve nasıl gerçekleştiğini anlamakla, hem yaşamın ta kendisinin hem de zekânın ortaya çıkışına yönelik daha iyi bir anlayış sağlanacağı– da ortaya çıkar.

---

[20] Lewis Wolpert ve meslektaşları Londra'da civcivleri kullanarak bu gibi önemli deneyleri yürüttü.

5

Depremler, Yok Oluşlar ve Ortaya Çıkış

Bilim insanlarının "karmaşık sistemler"den bahsettiğini duyan diğer birçok insan afallar; çünkü "karmaşık" ve "karışık" sözcüklerinin aynı anlama geldiği ve bir sistem karışıksa anlaşılmasının zor olacağı varsayılır. Her iki varsayım da doğru olmak zorunda değildir. Karmaşık bir sistem gerçekten de, sadece birbirleriyle etkileşim halindeki birçok daha basit bileşenden oluşur. Daha önce de gördüğümüz gibi, Galileo ve Newton'dan beri bilimsel zaferlerin çoğu, karmaşık sistemlerin basit bileşenlerine ayrılması ve bu basit bileşenlerin davranış biçimlerinin incelenmesiyle kazanılmıştır. (Hatta gerekirse, ilk kestirim olarak, bileşenlerin gerçekte olduklarından da basit olduğu varsayılır.) Dünyayı anlamamız konusunda bu yaklaşımın nasıl bir başarı sağladığına yönelik klâsik bir örnek verebiliriz. Kimya biliminin büyük bir kısmı büyük ölçüde, basit bileşenlerin atomlar olarak kabul edildiği ve bu nedenle de bu atomların çekirdeklerinin nelerden oluştuğunun çoğu zaman önem teşkil etmediği bir model bağlamında anlaşılabilir. Bir adım daha öteye gidersek, bir kutu içinde hapsedilmiş karbondioksit gazının davranışını tanımlayan yasaları da kabaca, küresel moleküllerin birbirlerine ve içlerinde bulundukları kabın duvarına çarparak sekmeleri bağlamında anlayabi-

liriz. Yine bu durumda da, bütün bu moleküllerin birbirlerine bağlı durumdaki bir karbon ve iki oksijen atomundan oluşuyor olması nadiren sorun teşkil eder. Bilimsel anlamda her iki sistem de karmaşıktır, ama anlaşılmaları kolaydır. Bu örneklerin de altını çizdiği gibi konuyu anlamamız için kilit nokta, analiz edeceğimiz bu en basit bileşenlerden doğru olanları seçmektir. İyi bir seçim, size geniş bir yelpazede geçerli olan modeller olarak geri dönecektir. Tıpkı atom modelinin sadece karbon ve oksijen için değil tüm kimya için geçerli olması, gazların "seken toplar" modelinin de sadece karbondioksit için değil tüm gazlar için geçerli olması gibi.

Altta yatan temel prensip, daha soyut bir düzeyde, matematikçilerin "karmaşık sayılar" adını verdiği sayılar için de geçerlidir. Bu sayılar sadece adlarıyla birçok öğrenciyi korkutmuştur; ama karmaşık sayılar gerçekten de çok basittir ve "karmaşık" sıfatının hakkını vermeyecek şekilde sadece iki bileşenden oluşur. Bu iki basit bileşen gündelik sayıların ta kendisidir. Sadece içlerinden birinin, i adı verilen evrensel bir sabit ile çarpılmak gibi ayırt edici bir özelliği bulunur. Bu yüzden de gündelik sayılar, örneğin X adını verebileceğimiz tek bir harfle temsil edilebiliyorken karmaşık bir sayı, örneğin $A+iB$ denen bir sayı çiftiyle temsil edilir. Bahsettiğimiz, -1'in karekökü dür ve böylece $i \times i = -1$'dir; ama bu durumun çok da önemi yoktur. Önemli olan, karmaşık sayıları nasıl hesaplayacağınızı gösteren, kabaca basit kurallar kümesidir. (Bir karmaşık sayıyı bir başka karmaşık sayıyla çarptığınızda ne olacağı veya bu sayıları birbirleriyle topladığınızda ne olacağı gibi kurallar.) Bu kurallar gerçekten de, sözgelimi, satrancın kurallarından dahi basittir; ancak bu sayıları kullanmak fizik dahil çok geniş bir yelpazede uygulama alanı bulan yepyeni bir matematik dünyasının kapısını aralar. (Örneğin alternatif elektrik akımının davranışı ve kuantum fiziğinin dalga denklemleri gibi.)

Karmaşanın basitliği hakkında daha sade bir örnek de verebiliriz. Tüm "makine"ler içinde en basit iki makine tekerlek ve kaldıraçtır. Aslına bakılırsa bir dişli çark, tıpkı bir yarış bisikletinin dişlisi gibi, kaldıraç ve tekerleğin bir kombinas-

yonudur.[1] Tek bir tekerlek –hatta tek bir dişli– karmaşık bir nesne değildir. Özünde kaldıraçların ve tekerleklerin biraraya getirilmesinden ibaret olan bir yarış bisikletiyse, tek tek bakıldığında bileşenlerini ve bunların birbirleriyle etkileşimlerini anlamak kolay olsa da terimin bilimsel anlamında karmaşık bir nesnedir. Bu da karmaşanın bir diğer önemli özelliğini (nesnelerin birbirleriyle nasıl bir etkileşim halinde olduğunun önemini) öne çıkarır. Bir kaldıraçlar ve tekerlekler yığını, bu yığın bir yarış bisikleti yapmak için gerekli tüm parçaları barındırıyor olsa da bu şekliyle karmaşık bir sistem olmazdı. Bu basit parçaların, parçaların toplamından daha büyük bir şey üretmek maksadıyla birbirleriyle etkileşim halinde olmasını sağlayacak biçimde birbirlerine bağlı olması gerekir. İşte tam da bu, derinlerdeki basitliğin üzerine inşa edilmiş karmaşadır.

Bilim insanları karmaşayla karşılaştıklarında, daha basit bileşenlere ve bunların birbirleriyle etkileşimlerine bakarak olayı anlamaya uğraşmak şeklinde içgüdüsel bir tepki verirler. Sonrasındaysa üzerinde çalıştıkları sistem için geçerli olacak basit bir yasa (ya da yasalar) bulmayı umarlar. Her şey yolunda giderse de, bu yasanın çok daha geniş bir karmaşık sistemler örneklemi için de geçerli olduğu (kimya için atom modelinin ve dişli çarklarla ilgili yasaların hem bisikletler hem de kronometreler için geçerli olduğu gibi) ve bu bilim insanlarının dünyanın işleyiş biçimiyle ilgili derin bir gerçeği keşfettikleri ortaya çıkar. Bu yöntem, dengeye yakın sistemlerin davranışına rehberlik etme konusunda 300 yıldır işe yaramaktadır. Şimdi de kaosun eşiğindeki kayıp sistemler için ve bir depremin yitirdiğinden daha yüksek miktarda enerjinin yitirildiği, dünyamıza ait daha iyi bir örnek olup olmadığı konusunda uygulanmaya başlanmıştır.

Depremlerle ilgili en çok akla gelen soru, farklı büyüklüklerdeki depremlerin hangi sıklıkla meydana geldiğidir. Kendiliğinden bünyede oluşturduğu içgüdüsel merak haricinde bu soru, deprem bölgesinde yaşıyorsanız veya deprem sigortası için yapılacak ücretlendirme üzerinde çalışan bir sigorta

[1] Tıpkı bir sonraki sav için aynı derecede geçerli bir örnek teşkil eden, saat şeklindeki bir kronometrenin dişlisi gibi.

şirketi için çalışıyorsanız pratikte de çok büyük anlam ifade edecektir. Depremlerin zamana göre nasıl dağıldığı birçok farklı yolla gösterilebilir. Depremlerin çoğu, yüksek miktarda enerjinin açığa çıkacağı ve böylece tekrar böyle bir enerjinin birikmesinin uzun zaman alacağı kadar büyük olabilir. Bir diğer ihtimal de, tüm depremlerin neredeyse sürekli olarak ufak miktarda enerjiyi açığa çıkarması ve böylelikle büyük bir sallantı yaratmamasıdır. Tıpkı insanların boylarının ortalama bir değer etrafında dağılımı gibi depremler için de hem büyük hem de küçük örneklerin azınlıkta olduğu tipik bir deprem şiddeti de olabilir. Son bir ihtimalse, depremlerin ve büyüklüklerinin tamamen rastlantısal olmasıdır. Tahmin etmeye çalışmanın anlamı yok. En iyi yol, tüm deprem kayıtlarından hangi büyüklükte kaç sayıda deprem meydana geldiğini incelemektir. Gereğine uygun biçimde bunu ilk uygulayan kişi, şimdilerde depremlerin yoğunluğunu ölçen ölçeğe adını da vermiş olan Charles Richter'dir (1889-1960).[2]

Richter ölçeği logaritmiktir; bu yüzden de ölçekteki bir birimlik artış açığa çıkan enerji miktarında 30 kat artışa karşılık gelir. 2 şiddetindeki bir deprem, 1 şiddetindeki bir depremden 30 kat güçlüdür. 3 şiddetindeki bir deprem de 2 şiddetindeki bir depremden 30 kat, dolayısıyla 1 şiddetindeki bir depremden 900 kat güçlüdür. Ölçeğe adını kendi başına vermiş olsa da Richter, çalışmalarını 1930'ların başında meslektaşı Beno Gutenberg (1889-1960) ile beraber gerçekleştirmiştir. Aynı ikili 1950'lerin ortalarında ilgilerini, bu sefer farklı büyüklüklerdeki depremlerin sıklığını incelemeye yöneltmiştir. İkili, dünya genelinde deprem kayıtlarına bakıp bu kayıtları Richter ölçeğinin yarı şiddetine karşılık gelen "küme"lerde bir araya getirdiler. Böylece 5 ve 5,5 şiddeti arasındaki tüm depremler bir kümede, 5,5 ve 6 arasındakiler sonraki kümede yer alıyordu vs. Richter ölçeğinin kendisi logaritmik olduğu için de ekip her sayının logaritmasını alarak bu sayıları birbirleriyle kar-

[2] Aslında "Richter ölçeği" terimi şimdilerde, Richter'in orijinal ölçeğinden biraz farklı olan günümüz ölçekleri için kullanılır; ama bu farklar buradaki tartışmamız açısından bir önem teşkil etmez.

şılaştırabilir hale getirdi.[3] Her kümede yer alan deprem sayısının logaritmasının, şiddete karşılık geleceği bir grafik (diğer adıyla log-log grafiği[4]) çizdiklerindeyse düz bir çizgi meydana geldiğini gördüler. Çok sayıda küçük deprem ve çok az sayıda büyük deprem vardı ve seçeceğiniz orta büyüklüklerdeki her şiddete karşılık gelen sayı, bu iki uç noktanın oluşturduğu düz çizgi üzerindeydi. Bu da farklı şiddetlerdeki depremlerin adedinin, bir kuvvet yasasına tâbi olduğuna işaret ediyordu. Diğer bir deyişle 5 şiddetindeki her 1000 depreme karşılık 6 şiddetinde 100 deprem, 7 şiddetinde de 10 deprem vs meydana gelmekteydi. Bu yasa artık Richter-Gutenberg yasası olarak bilinir ve ilk bakışta karmaşık bir sistem gibi görünen şeylerin altında yatan basit bir yasanın klâsik örneğidir. Peki bu yasa tam olarak ne anlama geliyordu ve daha geniş bir alanda geçerli olabilir miydi?

Bu yasanın, ne kadar güçlü bir doğa yasası olduğunu öncelikli olarak vurgulamamız gerekir. 8 şiddetindeki bir deprem, 1906 yılında meydana gelmiş olan meşhur California depreminden[5] biraz daha küçüktür; ama evinizin sokağından geçen ağır bir kamyonun içeride yarattığı ufak sallantıya karşılık gelen 1 şiddetindeki bir depremden 20 milyar kat fazla enerjiye sahip olacak kadar büyüktür. Yine de aynı basit yasa, bu geniş enerji yelpazesinin tamamında geçerlidir. Burada açık biçimde, dünyanın nasıl işlediğiyle ilgili bize anlatılmak istenen bir şeyler vardır. Bu şey, bir kısmıyla, kuvvet yasalarının kendini gösterdiği 3. Bölümde öğrendiğimiz kaos ve fraktallerle ilgilidir. Aslında isterseniz doğadaki fraktal-

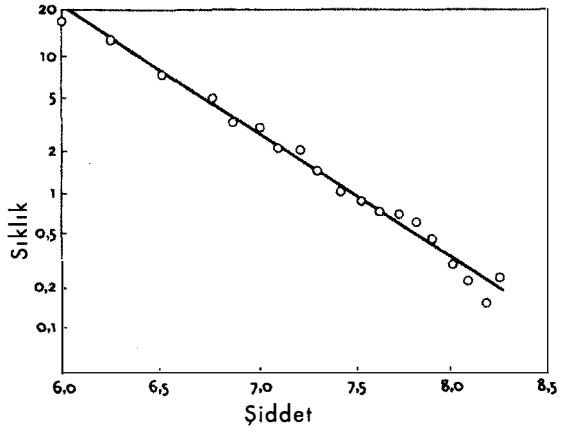
---

3 Matematikten pek hoşlanmayan (çoğunlukla da kötü öğretim neticesinde) insanları korkutan bir başka terim de "logaritma"dır. Basitçe söylersek; logaritma, sayıları onuncu veya başka herhangi bir üssüne (kuvvetine) göre ifade etmenin bir yoludur. Örneğin 100, 10^2'ye eşit olduğundan 100'ün logaritması 2'dir. Olay tamamen bundan ibarettir ve tek hatırlamanız gereken; logaritmaların, sayıları üsler olarak ifade etme biçimi olduğudur.

4 Grafik üzerinde, basit sayılar yerine logaritmal olarak çizim yapmak; sadece, eksenin 1, 2, 3 vs şeklinde işaretlenmesi yerine 1, 10, 100 vs şeklinde işaretlenmesi anlamına gelir.

5 1906 California depreminin şiddeti çeşitli kaynaklarca 7,7 ile 8,2 arasında ölçümlenmiştir. Depremde 3000 kişi hayatını kaybetmiş ve California'nın da içinde bulunduğu San Francisco eyaletinin yaklaşık olarak %80'i hasar görmüştür –çn.

leri, bir kıyı şeridinin uzunluğunu da örnek olarak alabilir ve aynı biçimde ifade edebilirsiniz. Bu konuda verilebilecek güzel bir örnek de büyük fiyortların daha küçük fiyortlara ve küçüklerin da daha küçüklere vs ayrıldığı Norveç kıyılarıdır.[6] Kıyı şeridinin fraktal boyutları açısından bunu tanımlamak adına, kıyının çok detaylı bir haritasını alıp özdeş kareler örgüsüyle kapladığımızı düşünelim. Yeterince büyük bir kare Norveç'in tamamını kaplamak için yeterli olacaktır. Kareleri ufaltmaya başladığınızdaysa kıyı şeridinde bükülen tüm koyları kaplamanız için sürekli daha fazla kareye ihtiyaç duyarsınız. Apaçık ortadadır ki kareleri yarı büyüklüğüne getirirseniz kaplama işini halletmeniz için evvelki kare sayısının iki katından fazlasına ihtiyaç duyarsınız. Karelerin boyutunun küçülmesine karşılık ihtiyacınız olan kare sayısındaki artışın hızı kıyı şeridinin fraktal boyutunu verecektir. Bu örnekte fraktal boyut 1,52 olarak karşımıza çıkar. 1,52 sayısını, her karenin büyüklüğünün logaritmasına karşılık gelen her düzeydeki ölçülmüş



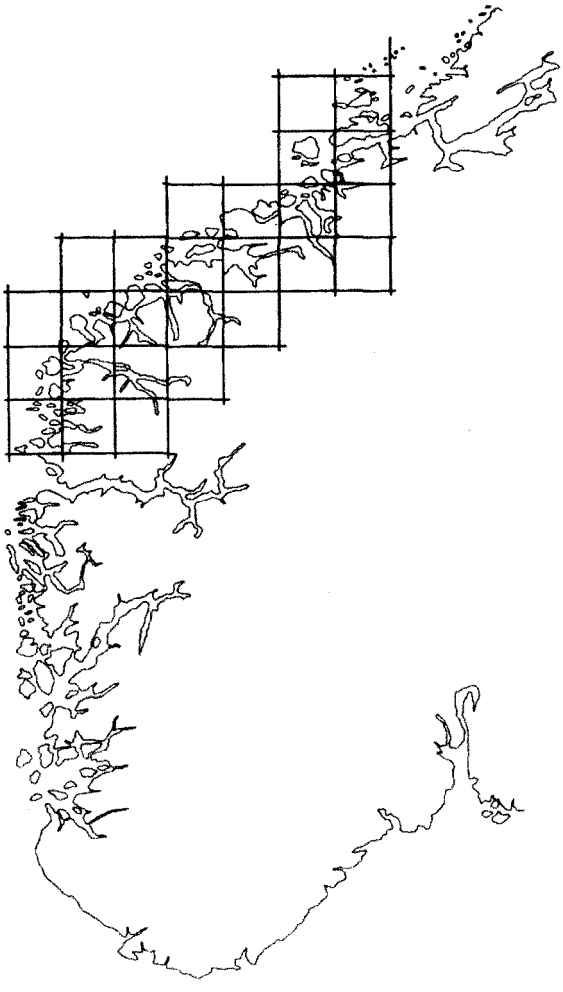
Şekil 5.1 *Gutenberg-Richter yasası; depremlerin şiddetleri ile meydana geldiği sıklıklar arasında bağlantı kurar. Bu da,* $\frac{1}{f}$ *davranışını gösteren bir kuvvet yasası örneğidir.*

[6] *bkz.* J. Feder, *Fractals.*

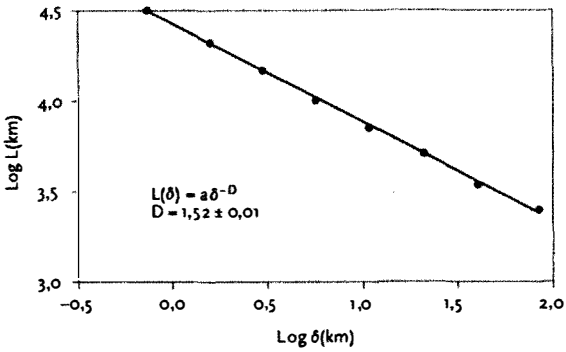
kıyı uzunluğunun logaritmasını grafik üzerinde çizerek bulursunuz. Sonuç olarak yine düz bir çizgiye ulaşırsınız ve fraktal boyut da bu düz çizgi grafiğinin dereceli değişimidir.

Değişim ölçüsünün (grafikteki doğrunun dikliği) büyüklüğü haricinde, Gutenberg-Richter yasasının tamamen aynısı bir kuvvet yasasıyla karşı karşıyayız. Norveç kıyısının (ve diğer kıyıların) fraktal geometrisi ile dünyanın çeşitli bölgelerinde (doğrusu, dünyanın farklı deprem bölgeleri içinde) meydana gelen farklı büyüklüklerdeki depremlerin sıklığı arasında bir bağlantı var gibi gözükmektedir. Bu bağlantının bir kısmı, fraktallerin çoktan aşina olduğumuz özelliklerinde yatar: Fraktaller ölçeklerinden bağımsızdır. İşte bu yüzden bu kıyı şeridi bir kuvvet yasasına tâbidir ve buradan depremlerin oluşumunun da ölçekte değişmez olduğu sonucuna varabiliriz. Ne kadar ilgi çekici olsa da merakımızı gidermek açısından pratikte bunun anlamının, büyük bir depremle küçük bir deprem arasında, büyüklükleri dışında herhangi bir fark olmaması olduğunu söyleyebiliriz. Büyük depremlerin neden meydana geldiğini açıklamak için bazı özel, nadir ve kendine özgü fiziksel etkilere ihtiyacınız yoktur: O ya da bu şekilde olurlar. Büyük depremler küçük depremlerden daha ender meydana gelir; ama özünde küçük depremleri oluşturan fiziksel süreçlerin tam da aynıları tarafından üretilirler. Depremlerin tek bir fiziksel nedenini bilmeseniz dahi, kuvvet yasası size bunu söyler.

Bu fikir, jeolog olmayanlar ve hatta bazı jeologlar tarafından dahi dile getirilen, büyük depremlerin büyük tetiklemelere ihtiyaç duyduğu fikrinden epey farklıdır. Bu insanlara göre 1906 San Francisco depremine benzer büyük depremler, yerkabuğundaki yüksek miktarda gerilme ve daha sonra zayıf bir noktada bu gerilmenin "açığa çıkışıyla" oluşur. Buradan yola çıkılarak varılabilecek rahatlatıcı bir çıkarım da meydana gelen büyük bir depremden sonra aynı yerde bir daha büyük deprem olması için uzun süre geçmesi gerektiğidir. İstatistik ve bilhassa kuvvet yasası ise aksini söyler. Hem büyük hem küçük



Şekil 5.2a *Metinde de belirtildiği gibi, Norveç kıyı şeridinin uzunluğu, kareler ağıyla kaplanarak tahmin edilebilir. Kareler ufaldıkça, ölçülen kıyı şeridinin uzunluğu artar. Bu ilişki, bir log-log grafiği üzerinde gösterildiğinde karşımıza bir kuvvet yasasını takip eden düz bir doğru çıkar. (bkz.* Şekil 5.2b*) Bu durumda doğrunun eğimi (kuvvetin değeri), Norveç kıyısının fraktal boyutunun bir ölçüsüdür ve bir doğru (1) ve bir bölgenin (2) neredeyse tam olarak ortasında olacak şekilde 1,52'dir.*



Şekil 5.2b *(bkz. bir önceki şeklin altındaki metin)*

depremler rastlantısal olarak, ama daha da önemlisi farklı sıklıklarda meydana gelir. Bir deprem bölgesinde herhangi büyüklükteki bir deprem her an meydana gelebilir. Tıpkı hilesiz bir yazı-tura oyununda son üç atışta yazı gelmiş olsa bile dördüncü atışta tura gelme ihtimalinin hâlâ 2'de 1 olması gibi. Öyleyse 1906 yılındakine benzer başka bir depremin 1907 yılında meydana gelme ihtimali, 1905 yılında olması ihtimalinden ne daha az ne de daha fazlaydı. Kuvvet yasası her zaman şu anlama gelir: Yasayla tarif edilen şey, ölçeğinden bağımsız olduğu için farklı büyüklüklerdeki depremlerin hepsi aynı yasalar tarafından yönetilir.

Ölçekte değişmezlik ilkesinin basit bir fiziksel sistem içinde iş başında oluşuna dair güzel bir örnek verilebilir. Bu fikirleri "tarihin hakiki bilimi" adı verdiği şeye cesurca uyarlamaya çalışan Mark Buchanan, kitabı *Ubiquity*'de bu örneği net biçimde göstermiştir. Donmuş patateslerin, katı bir duvarın karşısında ateşe verildiği ve parçalara ayrıldığı bir deney düşünün. Bu deney gerçekten de yapılmıştır ve görülmüştür ki, donmuş patateslerin dağılıp parçalanma biçimi, bir yığındaki kayaların birbirleriyle çarpıştıkları zaman dağılıp parçalanmalarına çok benzer. Bu tip bir parçalanma süreci, bir yığındaki kayaların uzayda birbirleriyle çarpışarak, Mars ile Jüpiter'in yörüngeleri arasında bir kuşakta ve güneşin çevresindeki yörüngede hareket eden asteroidleri oluşturuşunun

içyüzünü kavramamıza yardımcı olabilir. Patates parçacıkları, birçok ufak, birkaç iri ve kimisinin de iki büyüklük arasında bir büyüklükte olduğu parçalar halinde karşımıza çıkabilir. Tıpkı Gutenberg ve Richter'in, deprem büyüklüklerini kümelere paylaştırması gibi, bu patates parçalarını da ağırlıklarına göre kümelere ayırmak mümkündür. Önce gerçekten de çok ufak olan parçacıkları göz ardı edip geri kalanları kümeleriz. Sonra da bu geri kalan her kümedeki parçacıkların sayısının, o kümeye karşılık gelen ağırlıklara karşılık geleceği bir grafik çizebiliriz. Sonuçta bir kuvvet yasası elde ederiz. Şimdi de daha önce göz ardı ettiğimiz en ufak patates parçacıklarına bir göz atıp bu parçacıkların ağırlıklarını hesaplamak için daha iyi bir teknoloji kullanıp bu parçacıkları da aynı şekilde, ancak daha küçük bir ölçekte kümeler arasında bölebilirsek yine aynı kuvvet yasası karşımıza çıkar. 1990'ların başında Güney Danimarka Üniversitesinde yürütülen deneylerde araştırmacılar, 10 gram ile 1/1000 gram arasındaki tüm patates parçalarında aynı kuvvet yasasının geçerli olduğunu buldular. Bu buluş şu anlama geliyordu: Bir karınca büyüklüğünde olsanız ve patates parçalarının arasında sürünüyor olsanız karşılaşacağınız manzara, bir uğurböceğinin göçük arasında sürünürken karşılaşacağı manzarayla –istatistiksel olarak– aynı olurdu. Bu karşılaştırma, örneğin Sussex'in inişli çıkışlı tepelerini Himalaya Dağlarının keskin zirvelerini karşılaştırmaya benzemez. Patates parçalarıyla oluşan manzara her ölçekte aynı gözükür.

İşe bakın ki ayın manzarası da, yüzeyini kaplayan farklı büyüklüklerdeki kraterler açısından ölçek de değişmezdir. Bu kraterler, uzaydaki farklı büyüklükte kaya yığınlarının etkisiyle oluştuğundan ve bu kaya yığınlarının kendileri de –neredeyse kesin olarak– donmuş patateslerin dağılıp parçalanmalarını yöneten aynı yasalara uygun olarak dağılıp parçalanan daha büyük asteroidlerin arasındaki çarpışmalar tarafından üretildiğinden çok da büyük bir sürprizle karşı karşıya değiliz. Yaptığımız şey, sadece bu özel kuvvet yasasının ölçeğinin, patateslerden asteroidlere genişletilmesidir.

Tüm bu farklı senaryoların (gerçekten de, gördüğümüz gibi aynı senaryonun farklı versiyonlarının) tanımlanması için

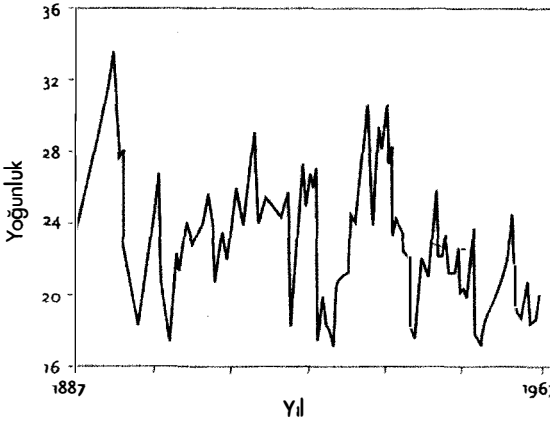
başka bir yol daha mevcuttur. Büyük "olaylar" (depremler, kıyı şeridindeki uzantılar, patates parçaları) daha nadirdir. Bunu da şu şekilde ifade edebiliriz: Bir olayın sıklığı 1'in, olayın büyüklüğünün bir kuvvetine [üssüne] bölünmesiyle elde edilir. Tersten söyleyecek olursak bir olayın büyüklüğü 1'in, olayın sıklığının (f'nin) bir kuvvetine (üssüne) bölümüyle doğru orantılıdır. Kuvvetin tam değeri çok da önem teşkil etmediğinden de bu durum genellikle "1 bölü f" gürültüsü olarak adlandırılır ve $\frac{1}{f}$ gürültüsü olarak yazılır. Bu, depremler hakkında konuşmak için ilginç bir yoldur. Bizim bunu kullanmamızın nedeniyse şudur: $\frac{1}{f}$ gürültüsü, doğal bir biçimde değişikliğe uğrayan birçok farklı sistemde ortaya çıkar ve daha deprem uzmanları işe dahil olmadan matematikçiler tarafından incelenmiştir. "Kuvvet yasası davranışı" ve "$\frac{1}{f}$ gürültüsü" terimleri, bizim buradaki amacımız açısından aynı anlamdadır.

Bu çeşit bir gürültü, hızlı ışık titremelerinden yavaş titreşime kadar, birbiri üzerine yerleştirilen her ölçekte senaryoyu kapsar. Benim gibi astronomi alanında eğitim vermiş biri için $\frac{1}{f}$ gürültüsünün klâsik örneği, sadece dakikalar içinde meydana gelen ışık titremelerinden, yıllar hatta on yıllar boyuncaki titremelere kadar geniş bir yelpazeyi kapsayan bir çeşit kuasar ışığı olabilir.[7] Aynı çeşit örüntü yıldızlardan gelen ışıkta da görülür. Böyle bir cismin ışık titremesi grafik üzerinde parlaklık ve zaman eksenlerinde çizilirse, her ölçekte meydana gelen iniş çıkışlarla dolu bir dağ sırasına benzeyen çentikli bir doğru elde edersiniz. İşte bu, $\frac{1}{f}$ gürültüsüdür. $\frac{1}{f}$'nin tam zıttında bir uçta tamamen rastlantısal olan beyaz gürültü ve diğer bir uçta da tıpkı bir müzik notası gibi sadece tek bir sıklık içeren saf bir sinyal bulunur. İsimlerinden de anlaşılacağı üzere bu olgular ilk olarak, incelenen sinyallerin ses dalgaları olduğu akustik [ses dağılımı] alanında ele alınmıştır. Beyaz gürültü, radyo herhangi bir kanaldan AM frekansına geçtiği zaman duyacağınız radyo parazitlenmesidir. Tek sıklıktaki gürültüyse tek bir notadaki saf, ama aynı sıkıcılıktaki tınıdır. İnsan ku-

[7] Bu titremeler daha da uzun sürebilir; ama kuasar'lar ancak 1960'ların başlarında keşfedilmiştir ve şimdi kuasar olarak bilinen bu fotografik nesnelerin kayıtları ancak 1880'li yıllara kadardır.

lağına ilgi çekici gelen tınıysa bazen pembe gürültü olarak da adlandırılan $\frac{1}{f}$ gürültüsüdür. Tıpkı ağızdan çıkan bir söz veya bir partideki curcuna sesi gibi müziğin sesi de $\frac{1}{f}$ yapısındadır. Kısaca söyleyecek olursak, $\frac{1}{f}$ gürültüsü bilgi içerir.

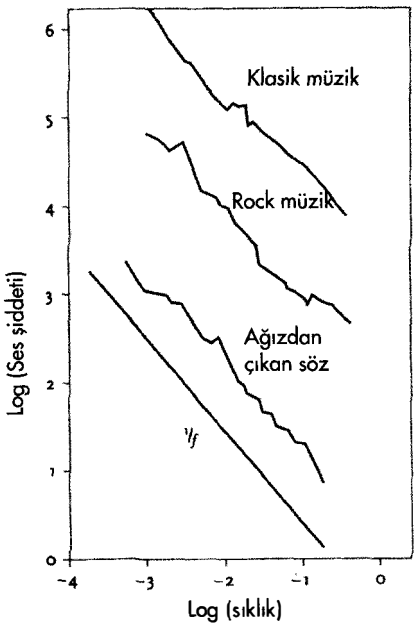
Burada biraz dikkatli olmamız lazım. Ne zaman bilimsel bir keşifte bulunulsa, insanlar sürü psikolojisiyle her şeyi bu yeni heves üzerinden açıklamaya çalışırlar. $\frac{1}{f}$ gürültüsü bilimin sıcak bir gündem maddesi haline gelmiştir ve heveslileri, mümkün olduğu sürece araştırdıkları her şeyde onu doğru şekilde kullanmışlardır. Bu kullanış, yeni kavrayışların elde edilmesini sağlayabileceği gibi alanın kısıtlarını da, hatta her ikisini birden de ortaya serebilir. $\frac{1}{f}$ gürültüsünün, beyaz gürültü ile tek sıklık arasında yatan tüm zaman-değişken olgular üzerinde işleyen tek etki olmadığı açıktır. Örnek olarak on dokuzuncu yüzyılın ortalarından beri süregelen küresel ortalama sıcaklıklardaki artışı ele alalım. Bu sıcaklık değişimi, kuasar astronomisindeki ışık eğrisine çok benzer ve içinde çok sayıda çentikli zirve ve vadi içeren bir genel artış eğilimi içindedir. Analizler göstermiştir ki aslında bu iniş-



Şekil 5.3 *1887 ve 1967 yılları arasında gözlemlenen bir kuasar'dan saçılan ışıktaki değişim, $\frac{1}{f}$ gürültüsüne bir örnek teşkil eder.*

çıkışlar $\frac{1}{f}$ gürültüsüdür. Uzun dönemli bu artış eğilimi, bu genel örüntünün –gürültünün çok uzun dönemli dalgalanışının– sadece bir parçası olabilir. Ancak bu durumda uzun dönemli eğilim, tam da insan faaliyetleri atmosfere ısı hapseden gazlar salmaya başladığında gerçekleşmiştir. Kısa dönemli dalgalanmaların ortalaması alınırsa da bu yükselişin son bir buçuk yüzyıldaki büyüklüğünün tam da atmosfere bu miktar sera gazı salınımı olduğunda beklenecek olan yükseklikle eş olduğu görülür. Bu sebep-sonuç ilişkisini inkâr etmek, ancak nükleer bir bombanın Nevada Çölünde yer altında patlatılmasından sonraki bir depremin bu bomba nedeniyle meydana geldiğini inkâr etmek ve bu sallantının ardalanında $\frac{1}{f}$ gürültüsünün yattığını savunmak kadar mantıklıdır.

Buradan çıkarılacak sonuç şudur: Hava sisteminde birçok gürültü olmasına ve çoğu zaman da bu gürültü $\frac{1}{f}$ gürültüsü olmasına rağmen (ki bu bile kendi içinde ilgi çekici ve önemli bir keşiftir) insan faaliyetlerine bağlı hakiki bir sıcaklık artışı eğilimi mevcuttur. Hava sistemindeki gürültünün $\frac{1}{f}$ gürültüsü olması gerçeğiyle alakalı özellikle ilgi çekici olan şey tabii ki, kuvvet yasasına tâbi olan depremlerle aynı şeydir ve anlamı şudur: Herhangi büyüklükteki bir olay her an meydana gelebilir; ama büyük olaylar (bu örnekte ortalama sıcaklıklardan büyük sapmalar) nadirdir. Geleneksel olarak sigorta şirketleri ve şehir planlamacıları, bu tarz uç olayların ihtimallerini tarihsel bazda çözümlemişlerdir. Belirli bir tür ve büyüklükteki olayın (diyelim ki şiddetli bir kuraklığın) geçmişte hangi sıklıkta meydana gelmiş olduğuna bakarlar ve gelecekte de aynı sıklıkta olacağını varsayarlar. "Yüzyılda bir meydana gelen kuraklıklar"ı dahi göz önünde bulundururlar. Ancak bu, hikâyenin sadece bir kısmıdır. $\frac{1}{f}$ sinyali bize böyle olayların kuvvet yasasına tâbi olduğunu söyler. Bu da, bir yaz "yüzyılda bir meydana gelen kuraklık"la karşılaşırsanız, aynı şiddette ikinci bir kuraklığın, –evvelki yaz böyle bir şey yaşanmamışçasına– takip eden yaz da meydana gelme ihtimali olduğu anlamına gelir. "Yüzyılda bir meydana gelen kuraklık"tan sonra bir sonraki için yüz yıl daha beklememiz gerektiğini düşünmek hiç güvenli olmaz. $\frac{1}{f}$ gürültüsü, rekor derecedeki kuraklığın



Şekil 5.4 *Standart log-log grafiği kullanılarak klâsik müzik, rock müzik ve ağızdan çıkan sözün $\frac{1}{f}$ gürültüsü karakteristiği gösterdiği görülebilir; çünkü bu seslerin hepsi bilgi içerir.*

akabinde rekor derecedeki bir dondurucu soğuğun meydana gelmesinin de –bir önceki örnek gibi– tam eşit ihtimalde olduğunu söyler. Ertesi sene, tamamen doğal hava sistemlerindeki rastlantısal dalgalanmaların bir sonucu olarak –sera etkisi hipotezini çürütmeksizin– tarihin en soğuk yazı yaşanabilir. Bu yüzden de esas önemli olan, bir defaya mahsus olaylar yerine uzun dönemli eğilimlere bakmaktır.

Kuvvet yasası ve $\frac{1}{f}$ gürültüsün doğada birçok başka örneği vardır. Burada hepsini tek tek sıralamaya gerek yok; ancak tüm bunların esas konumuz olan yaşamın ortaya çıkışıyla bağlantısına geçmeden önce dikkat çekeceğimiz iki örneğimiz daha var. Bu iki örnek bize, kuasar'ların ışık eğrileri ve uzun dönemli sıcaklık eğilimlerinden çok daha aşina gelecektir. Kitabımızın çoğu okuyucusu, şu an olmasa bile hayatlarının bir

bölümünde büyük bir kasaba veya şehirde yaşamıştır. Harvard Üniversitesinden George Zipf 1940'larda tüm dünyadaki şehirlerin nüfuslarını inceledi. Takdir edeceksiniz ki çok yüksek nüfuslu birkaç şehir ve daha düşük nüfuslu çok daha fazla sayıda şehir mevcuttur. Bu kadar net fark edilemeyecek, ama muhtemelen şu an sizin tahmin ettiğiniz şeyse şudur: Farklı nüfuslardaki her şehir, nüfuslarıyla beraber bir log-log grafiği üzerinde kümelere ayrılır ve nüfuslarına karşılık gelecek şekilde yerleştirilirse düz bir doğru elde edersiniz. Hem dünya için hem de dünyanın farklı bölgeleri için, insanların şehirlerde toplanışı bir kuvvet yasasına tâbidir ve bu örüntü tıpkı 1940'larda olduğu gibi şimdi de geçerlidir. Hepimiz nerede yaşayacağımızla ilgili kararı birbirimizden bağımsız biçimde, özgür irademizle veririz; ancak yine de kuasar'ların titreyen ışıkları ve depremlerin oluşumunu yöneten yasaların aynısına tâbiyiz. Açık biçimde, derin bir gerçeğin peşindeyiz ve ne olup bittiğini anlamaya insanları da kapsayan daha basit sistemlere bakarak başlayabiliriz.

Çok sayıda insan şehirlerde yaşamasına rağmen tüm şehirler depremden etkilenmediğinden bazılarımıza deprem çok soyut bir olgu olarak gelebilir; ama şehirde yaşayan herkes mutlaka trafiğin tıkanmasıyla karşılaşmıştır ve gelin görün ki trafik tıkanıklıkları da bir kuvvet yasasına tâbidir. Görünüşte herhangi bir nedene dayanmıyor gibi gözüken ve otobanlarda, çift şeritli karayollarında yaşanan tıkanıklıklardan bahsediyoruz. Her sürücü (ve aslında uyuklamayan her yolcu da) bilir ki trafik hafifken sorunsuz bir biçimde akar; ama bir yoğunlaşırsa –herkesin diyelim ki saate 50 mil [yaklaşık 80 km] hızla sorunsuzca ilerlememesi için hiçbir neden yokmuş gibi gözükse de– tıkanıklık alır başını gider. Sorun şudur: Bir araç herhangi bir nedenle (muhtemelen önündeki araca çok yaklaştığından) fren yaparsa, zincirleme bir etkiyle arkasındaki herkes yavaşlar ve –çok şükür ki yol güvenliği açısından– yavaşlamak hızlanmaktan daha kolay hâlâ gelir. 1990'ların başında bütün bu olayı matematiksel bir temele oturtmak için bir bilgisayar modeli geliştiren Duisberg Üniversitesindeki araştırmacılar

bu tür davranış biçimi üzerinde çalıştı.[8] Model, çok şeritli otobanların gerçek dünyasını tanımlayabilme iddiasında değildi; ama –tüm diğer iyi modeller gibi– ne olup bittiğine dair fikir vermesi açısından yeterliydi. Tek sıra halindeki araçların, sollama olmaksızın tek yönlü bir yol üzerinde bulunduğu bu modelde tüm araçlar ("arabalar") aynı boyuttaydı. Araçların hızları da bilgisayar simülasyonunda bir adımla sonraki adım arasında ne kadar hareket edebileceklerine göre belirleniyordu. Bir araba önündekine çarpacak kadar hızlı gidiyorsa yavaşlamak zorundaydı. Aradaki mesafe çok açıldıysa da –öndeki arabaya yaklaşmak üzere– yine belirlenmiş bir hıza kadar hızlanıyordu. Son olarak da –yavaşlamak hızlanmaktan daha kolay olacak şekilde– yavaşlama ve hızlanma becerilerinin ölçümü yapıldı. Tüm modelde bir sıra halinde düz bir şekilde giden ve bahsettiğimiz kurallara uyan araçlar bulunuyordu. Yine de gerçek trafik tıkanıklıklarının tüm davranış biçimi (trafik hafifken rahatça giden araçlar, yoğunken bazı tıkanıklıklar ve belli bir yoğunluğa ulaşılınca karşılaşılan neredeyse çıkmaz hal) gösteriliyordu. Dahası, trafiğe dahil olan araç sayısına göre ölçülen farklı yoğunluklardaki tıkanıklıkların sayısı, farklı şiddetlerdeki depremlerin sayısının tâbi olduğu yasanın aynısına tâbiydi. Hem modelde hem de gerçek trafik akışları üzerine yapılan çalışmalarda bir kuvvet yasasıyla karşı karşıyaydık. Öndekiler hızla uzaklaşırken daha fazla sayıda araç sıkışıklıkla karşılaştıkça –gerçekte olduğu gibi– fren yaptığından ve yine gerçekte olduğu gibi tıkanıklık yüzünden trafiğin ortalama hızı düşünce öndekiler "gözden kaybolduğundan" tıkanıklıklar trafiğin gerisine doğru ilerliyordu. Büyük ve küçük tıkanıklıklar olduğu gibi fraktal bir örüntü içinde tıkanıklık $\frac{1}{f}$ gürültüsünün açık örneğinden başka bir şey değildi.

Buradan çıkarılacak iki pratik ders vardır. İlki şudur: Büyük bir tıkanıklık için ender görülen büyük "tetiklemeler"e (örneğin bir kazaya) ihtiyacınız yoktur.[9] Herhangi büyüklükte-

---

8 K. Nagel ve M. Paczuski, "Emergent Trafic Jams", Physical Review, 1995, E51, 2909.

9 Yine de tabii ki bazı tıkanıklıklar kazalar sonucu oluşur; tıpkı bazı depremlerin yer altındaki nükleer denemelerden ve bazı küresel ısınmaların insanlardan kaynaklanıyor olması gibi.

ki bir tıkanıklık, bir arabanın öndekine çok yaklaşıp ani fren yapması gibi ufacık bir kargaşadan bile meydana gelebilir. Kimse kimseye çarpmamıştır, trafikteki insanların çoğunun fark edebileceği herhangi bariz bir neden yoktur ve tıkanıklığa neden olan sürücü muhtemelen arkada neler olup bittiğinden habersiz biçimde çoktan uzaklaşmıştır; ama yüzlerce insanın huzuru kaçmıştır. İkincisi, trafik yoğunluğu artarsa maksimum hıza bir sınır getirilerek trafik tekrar daha rahat akacak hale getirilebilir; çünkü bu sınırlama, hızlanmak için ve fren yapmak için geçen zamanlar arasındaki farkın etkisini azaltır. Dolayısıyla şu meşhur ifade gerçekten de doğrudur: Kalabalık bir otoyolda herkes hız limitlerine uyarsa, insanların tümü varacakları yere, hızlı sürmeye çalışıp varacaklarından daha önce ulaşır.

Son zamanlarda yoğun ilgi çeken, kuvvet yasası ve $\frac{1}{f}$ gürültüsüyle alakalı bir başka insan faaliyeti alanı daha mevcut. Bu da ekonomi, bilhassa da menkul kıymetler borsalarının ekonomisidir. Bizi esas konumuz olan yaşamın oluşumu ve bunun evrendeki yerinden çok uzaklaştıracağı için bu konuya çok detaylı girmeyeceğiz;[10] ancak aradaki bağlantı gerçekten de dikkate değer. Benoit Mandelbrot 1960'larda ilgisini fraktallere yöneltmeden hemen önce, çelik ve pamuk gibi meta fiyatlarının New York Borsasındaki değişimlerini inceledi ve şunu keşfetti: Fiyat dalgalanmaları, $\frac{1}{f}$ gürültüsüne benzer bir kuvvet yasasını takip ediyordu. Buradan çıkartılacak sonuç da ekonominin, depremlerin veya trafik tıkanıklıklarının da tâbi olduğu yasalara tâbi olan ve büyük olayların (örneğin 1987 yılının Ekim ayında yaşanana benzer borsa çöküşlerinin) küçük tetiklemelerin sonucu olarak damdan düşercesine meydana gelebildiği bir sistem olduğudur. Bu keşif, ekonomilerin hükümet müdahaleleriyle –mesela faiz oranlarını ayarlayarak– kontrol edilebileceğini düşünen ekonomistlerin hoşuna gitmedi; ama borsadaki dalgalanmalar gerçekten de bir kuvvet yasasını takip ediyorsa, faiz oranlarında yapılacak ufak değişiklikler an-

[10] Kuvvet yasalarının geçerliliğine dair başka örnekler hakkında da fikir sahibi olmak istiyorsanız size Mitchell Waldrop'un *Complexity* ve Mark Buchanan'ın *Ubiquity* adlı kitaplarını önerebiliriz.

cak nadiren piyasadaki büyük hareketleri tetikleyebilir, hatta bu değişiklikler tamamen etkisiz dahi olabilirdi.

Aklımızın bir kenarında bulunması gereken husus, depremler, trafik tıkanıklığı ve benzerleri için bulunması gerekenle aynıdır. Örüntü genel biçimiyle $\frac{1}{f}$ gürültüsü olabilir; ama bazen yeterince büyük ölçekteki insan müdahalesinin de bir etkisi olacaktır. Örneğin II. Dünya Savaşının ABD ekonomisini büyük krizden düzlüğe çıkarma konusundaki etkisi pek şüphe götürmez. Soru şudur: Faiz oranlarındaki 0,25'lik bir düzeltme ile dünya savaşı arasındaki hangi noktada hükümet müdahalesi önemli hale gelir?

Bu soruya verilecek cevabın bir kısmı belki de, ilk olarak 1970'lerin sonunda bir düşünce kuruluşu olan Uluslararası Uygulamalı Sistemler Analizi Enstitüsünde (IIASA) ve daha sonra 1980'lerde Stanford Üniversitesinde çalışmış olan İrlanda doğumlu Brian Arthur'un başını çektiği çalışmalarda saklıdır. Klâsik iktisat, klâsik termodinamiğinkilere çok benzer prensipler üzerine inşa edilmiştir ve dengeye yakın sistemlerle (ekonomilerle) ilgilenir. Barındırdığı "azalan getiriler" (bir tür negatif geri-bildirim) kavramını kabaca şu şekilde özetleyebiliriz: Yeni bir şey icat edip ona yatırım yaparsanız bir servet elde edebilirsiniz; ama herkes malınızı edindikten sonra satış yapmak zorlaşacak ve kârlarınız düşecektir. Mühendislik geçmişi bulunan Arthur, bunun tersi bir durumun da (pozitif geri-bildirimin veya artan getirinin de) mümkün olabileceğini fark etti. Piyasayı ele geçirdiğiniz anda herkes ürününüzü almak zorundadır ve bu yolla büyük miktarda para kazanırsınız. Bugün bunun tipik örneği Bill Gates ve Microsoft'tur. Arthur en iyi ürünü üretmek zorunda olmadığınızın da farkına vardı. Apple bilgisayarları, genel olarak kabul gördüğü ve 1980'lerde kesin olarak geçerli olduğu üzere, Microsoft mimarisi olan PC'lerden teknik açıdan üstün olmasına rağmen başlarda etkin biçimde pazarlanmamıştı. Oysaki bir şey endüstriyel standart haline gelirse "ben de almalıyım" etkisi, yüksek satış rakamlarına ve yüksek kârlara çıkılmasını garanti eder.

Tüm bunlar bir mühendise veya fizikçiye tamamen mantıklı gelir; ama klâsik olarak eğitilmiş iktisatçılar hâlâ çaresizce

bu tür aykırı fikirlere karşı mücadele etmektedirler. Şu an bu tartışmaya girecek değiliz. Bu tartışmaya girmemizin sebebi, klâsik termodinamiğin dengede olmayan termodinamikle ve klâsik iktisadın da dengede olmayan iktisat olarak adlandırabileceğimiz şeyle farklılaşma biçimine dair benzetmeyi geliştirmek. Arthur gibi modern iktisatçılar, içinde pozitif geri-bildirimlerin de olduğu ve içinden bir çeşit enerjinin (bu durumda paranın) aktığı dinamik, değişken sistemlerle ilgilenirler. Bu şekilde ortaya konduğunda hikâyenin konumla ilgisi ortaya çıkar. Bilhassa geri-bildirim sayesinde ekonomiler aslında kendi kendini düzenleyen, kaosun eşiğindeki sistemlerdir. Durum bilakis daha karışıktır ve ayrıntılara boğulmaktan büyük resmi görmek zorlaşır; çünkü incelemekte olduğumuz ekonominin içinde bizzat kendimiz de bulunuruz ve insanlar analiz etmeye çalıştıkları o sistemin bütününü oluşturan parçalardan biridir. Yine de, en basit düzeyde dahi borsadaki iniş çıkışların $\frac{1}{f}$ gürültüsü şeklinde davrandığına dair şüphe yoktur ve hükümetlerin ekonomiyi kontrol ettiğini düşünenler hayal dünyasındadır.

Şimdi dinozorların ölümü ve yaşamın anlamı gibi daha basit şeylere dönelim. Yaklaşık 65 milyon yıl önce dünya üzerindeki kitlesel bir yok oluşun parçası olarak dinozorların da neslinin tükendiği[11] jeolojik kayıtlarda o kadar açıktır ki bu yok oluş Kretase adı verilen bir jeolojik dönemin bitişi ve Tersiyer adı verilen bir başka dönemin başlangıcını simgelemek için kullanılır. "C" sembolü ilk olarak Kambriyen [Cambrian] dönemiyle bağlantılı olarak benzer bağlamda kullanılmış olduğundan, bu simgeden çoğu zaman –dönemin Almanca adı Kreide'a istinaden– K-T sınırı olarak söz edilir. Felakete dair kayıtlarda ön plana çıkmış olmalarına rağmen, bundan etkilenen sadece dinozorlar değildi. Kretase döneminin sonunda yaşamakta olan tüm canlı türlerinin yaklaşık %70'i Tersiyer dönemin başına gelindiğinde yok olmuştu. Bu vakayı tam anlamıyla "kitlesel" bir yok oluş yapan ve jeologlar ile paleontolojistlerin, fosil kayıtlarında bir dönüm noktası olarak K-T'yi kullanmalarının

[11] Hepsi değil; kuşların, bir ya da daha fazla dinozor soyundan geldiği düşünülmektedir.

nedenini ortaya seren de buydu. Bu kadar eski bir dönemden kalma kanıtları yorumlamanın zorluğu ve jeolojik katmanların birikiminin yavaşlığı göz önüne alınırsa bu yok oluşun hızıyla ilgili tek bir şey söyleyebiliriz: Bu yok oluş, birkaç on bin yıldan ya da en fazla yüz bin yıldan daha az bir zaman içerisinde gerçekleşmiştir ve milyonlarca yıla yayılmamıştır. Ne var ki jeolojik zaman ölçütü bağlamında değerlendirirsek, bu değişim çok ani bir değişimdir.

Bu konuyla ilgili akıllara gelen sorular büyük bir depremden sonra apaçık ortaya çıkan sorularla aynıdır: Neden oldu, tekrar olabilir mi ve tekrar olacaksa ne zaman? K-T olayında, yok oluşun diyelim ki 60 milyon veya 55 milyon yıl değil de 65 milyon yıl önce meydana gelmiş olmasına sebep olan tetiklemeye dair çok iyi bir adayımız var. Tam olarak aynı yaştaki çok yüksek tesirli bir meteorun kalıntıları, şimdilerde Meksika'daki Yucatan Yarımadası olarak bilinen yerin altında bulunmuştur. Dünya üzerindeki 65 milyon yıllık katman, yerkabuğunda nadir olarak bulunan, ama bir tür göktaşının bileşeni olarak bilinen ağır metal iridyumun izlerini taşır. Buradan çıkarılacak sonuç şudur: Muhtemelen boydan boya 10 kilometrelik, büyükçe bir kaya uzaydan gelerek dünyaya isabet etmiş ve dünya çapında bir yıkıma sebep olmuştur. İridyum tabakası 10.000 (hatta belki çok daha az) yıldan önce ortalığa yayılmış olacak kadar incedir. Bu da K-T olayının, uzaydan gelen bir darbeyle hemen hemen aynı zamanda tetiklendiğine dair fikirle tutarlıdır.

Bu olayın nasıl meydana gelmiş olabileceği sorunsuzca açıklanabilir. Bir milyar megaton TNT'nin[12] patlamasıyla eşdeğer tesirde bir kinetik enerji, kaya molozlarını büyük parçalar halinde uzaya göndermiş ve bu moloz yığınları da balistik yörüngeler çizerek tüm yerküre çevresinde atmosfere tekrar dahil olmuş olabilir; böylece de tüm dünya genelinde ısı yayılmış ve her yerde sıcaklık yükselmiş olabilirdi. Arizona Üniversitesinden Jay Melosh'un, "'ızgara' üzerindeki bir fırın seti" ile karşılaştırılabilir olduğunu grafiksel olarak gösterdiği

[12] Trinitrotoluen (TNT), bomba yapımında da kullanılan kuvvetli bir kimyasal patlayıcıdır –çn.

biçimde[13] dünya yüzeyinin her metrekaresinde 10 kilowatt'lık bir enerji yayılmış olabilirdi. Sonrasında atmosfere doğru saçılan ufak toz zerrecikleri, tüm yerküre etrafında yayılmış olabilir ve "ızgarada kızartma" etkisiyle başlayan yangınların dumanıyla beraber güneş ışığını tamamen görünmez hale getirip fotosenteze dayalı olarak yaşamlarını sürdüren bitkilerin ölmesine ve geçici olarak gezegenin soğumasına yol açmış olabilirdi. Burada daha fazla detaya girmemize gerek yok; ancak tüm bu senaryonun, üzerinde dikkatlice çalışılarak jeolojik bağlama oturtulduğunu ve üzerinde iyi düşünülmemiş, tuhaf bir fikir olmadığını vurgulamamız lazım. Tüm bunların ışığında söylemek istediğimiz şey şudur: Uzaydan gelen etkiler, dünya üzerindeki yaşam için kötü birer haber olabilir.[14] Bütün hikâye bu değildir elbet. İlk olarak söylemeliyiz ki dünya 35 milyon yıl kadar önce, K-T olayı ölçeğinde bir yok oluşa sebep olmamış olan, ama karşılaştırılabilir derecede başka etkilere de maruz kalmıştır. Aynı büyüklükteki tetiklemelerin hepsi aynı büyüklükte olaylara sebep olmaz. İkincisi, dinozorların ve diğer canlı türlerinin sayısının, Kretase döneminin son birkaç milyonuncu yıllarında zaten bir düşüş halinde olduğu yönünde bazı kanıtlar mevcuttur. Paleontologlar hâlâ bu kanıtların geçerliliği konusunda hemfikir değildir. Bazıları hiçbir suretle bir düşüş olmadığını dahi düşünür ve bu düşüşün ölümcül olup olmadığı konusunda hiçbir netlik yoktur. (Dinozorların sayısı, dünyada gezindikleri 150 milyon yıl boyunca bir sürü iniş-çıkışa uğramıştı.) Yine de Yucatan etkisinin (ki bu etki kesinlikle 65 milyon yıl önce K-T sınırında meydana gelmiştir), zaten başka nedenlerle (kıtaların sürüklenişi nedeniyle oluşan iklim değişikliği gibi) gerilim altında bulunan dünyadaki yaşam ağı içerisinde geniş çaplı yok oluşları tetikleyen, "bardağı taşıran son damla" olması gayet mümkündür. Mesele şudur: Herhangi tekil bir olay özel bir vaka olabilir ve tek başına bu olayı, benzer olayların açıklanmasında veya tekrar meydana gelme ihtimallerinin tahmin edilmesinde kullanmak ancak tek bir depremden yola çıkarak tüm depremleri ve ne sıklıkta mey-

[13] *Nature*, 1990, cilt 343, s.251.

[14] Daha fazla detay için, *bkz. Fire on Earth* adlı kitabımız.

dana geldiklerini açıklamak kadar mantıklı olur. Olan biteni düzgün biçimde anlayabilmemiz ve dinozorların neslinin tükenişinin özel bir olay mı yoksa herhangi bir olay mı olduğunu öğrenmemiz için tüm jeoloji tarihi boyunca meydana gelen yok oluş örüntülerine bakmamız gerekir.

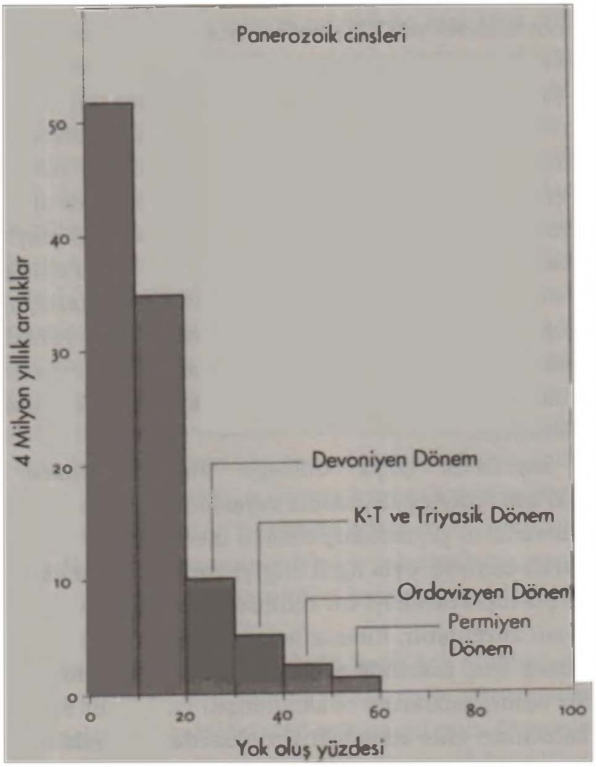
Aslında K-T olayı, jeologların toplu olarak "Büyük Beşli" olarak adlandırdıkları benzer beş felaketten biridir ve kesinlikle bunların en büyüğü değildir. Bu felaketlerin her biri, jeolojik dönemler arasında geçişi gösteren birer simge olarak kullanılır ve hepsi geçtiğimiz 600 milyon yıl içinde meydana gelmiştir. Görece yakın zamanlı jeolojik geçmişe bu kadar odaklanmış olmamızın nedeni, canlı varlıkların ancak o zaman, kabuk gibi kolayca fosilleşebilen özellikler geliştirmiş olması ve bugün üzerinde incelemeler yapılan katmanda iz bırakmış olmalarıdır. Daha öncesinde (Prekambriyen olarak adlandırılan uzun jeolojik dönemde) yaşam yaklaşık dört milyar yılda, yumuşak vücutlu ve tek hücreli varlıklar şeklinde okyanuslarda serpilmiştir ve bize üzerinde çalışma yapabileceğimiz pek bir şey bırakmamıştır. Yaklaşık 590-600 milyon yıl önce Kambriyen olarak bilinen jeolojik dönemin başındaysa, çok hücreli canlılar gibi farklı çeşitler biçiminde kendini gösteren bir yaşam patlaması olmuş ve sonrasında kanlı canlı varlıklar evrilmiştir. Gayet açık biçimde, üzerinde araştırma yaptığımız dönem günümüze ne kadar yakınsa, o dönem boyunca dünya üzerindeki değişen yaşam örüntüleri hakkında o kadar çok bilgi sahibiyiz ve burada ilgi alanımıza giren büyük yok oluşların, ancak Prekambriyen döneminden sonrakileri hakkında net biçimde fikir yürütebiliyoruz

Kronolojik olarak alırsak Büyük Beşli yok oluşları yaklaşık 440 milyon yıl önce (Ordovizyen ve Silüriyen dönemlerinin sınırını simgeleyecek şekilde), 360 milyon yıl önce (Devoniyen ve Karbonifer dönemleri arasında), 250 milyon yıl önce (Permiyen ve Triyasik dönemler arasında), 215 milyon yıl önce (Triyasik ve Jura dönemlerinin sınırında) ve 65 milyon yıl önce (K-T sınırında) meydana gelmiştir. Fosil kalıntılarında daha birçok yok oluşun izleri vardır ve bunlar sık sık jeolojik "takvim"lerde geçişlerin simgesi olarak kullanılırlar. Örneğin Jura ve Kreta-

se dönemleri arasındaki sınır da yaklaşık 145 milyon yıl önce meydana gelen bir yok oluşla belirlenmiştir. Yine de en büyük yok oluşlar bu bahsettiğimiz beşlidir. Bu beşlinin en büyüğüyse Permiyen döneminin sonunda, yaklaşık 250 milyon yıl önce meydana gelendir. Bu yok oluş, o an kara ve okyanuslardaki tüm canlı türlerinin muhtemelen yüzde 80 ila yüzde 95 arasındaki miktarını –10.000 yıldan bile daha az bir süre içinde– yeryüzünden silmiştir. Dünya üzerinde bugüne kadar yaşamış tüm canlı türlerinin topu topu üçte birinden biraz fazlasının kitlesel yok oluşlarda soylarının tükendiği tahmin edilmektedir; ancak aynı zamanda dünya üzerinde bugüne kadar yaşamış canlı türlerinin yüzde 99'unun tamamen yok olduğu da tahmin edildiğinden, daha az önem derecesindeki olaylarda büyük olaylardakilerin iki katı canlının yok olduğu ortaya çıkar. Esas merak uyandıran soru, kitlesel yok oluşların, az önemdeki yok oluşlardan farklı karakterde özel olaylar mı yoksa bariz biçimde diğerleriyle aynı tür olaylar mı olduğudur. Dünya üzerindeki yok oluşlar, tıpkı depremler ve tartıştığımız diğer olgular gibi, ölçekten bağımsız mıdır? Açık yüreklilikle söylemek gerekirse cevabı bilmiyoruz; ama bunun basbayağı bir ihtimal olduğunu iddia edecek kadar kanıt bulunduğunu da söylemeliyiz.

Bu kanıtların çoğu, Chicago Üniversitesinden Jack Sepkoski'nin itinalı çalışmaları sayesinde toplanmıştır. Diğer araştırmacıların yayımlamış olduğu mevcut kayıtlardan, binlerce farklı canlı türüyle ilgili bilgiyi zorlu ve sabır gerektiren bir süreçte toplayarak iyi bir bilimsel kütüphanede devasa bir veritabanı kurmuştur. Elbette hepsi bu kadar değil. Bunu başarabilmek için, üzerinde çalıştığınız canlı türlerini (Sepkoski deniz omurgasızlarına odaklanmıştı) iyi biliyor olmanız ve fosil kalıntıları elde etmedeki zorluklardan kaynaklananlarla gerçek yok oluşları ayırt edecek bir zekâya sahip olmanız, aynı zamanda daha yakın tarihli katmanlardaki kalıntıları bulmanın daha kolay olduğunu ve benzer bir dolu şeyi hesaba katmanız gerekir. Tüm bu çalışmaların sonunda Sepkoski, her 4 milyon yıl uzunluğundaki aralıklarda bulunan yok oluş düzeylerinin geçmiş 600 milyon yıllık zaman dilimi içinde nasıl

dalgalandığını gösteren bir grafik çizmeyi başardı. Grafikteki genel dalgalanmalar gayet rastlantısal gözüküyordu. Görece daha az değişim görülen ve sadece ara sıra birkaç canlı türünün yok olduğu uzun aralıklar, –şimdiye kadar kitapta karşılaştığımız kitlesel türden– çok sayıda yok oluşun meydana geldiği çarpıcı olaylarla kesintiye uğruyordu.

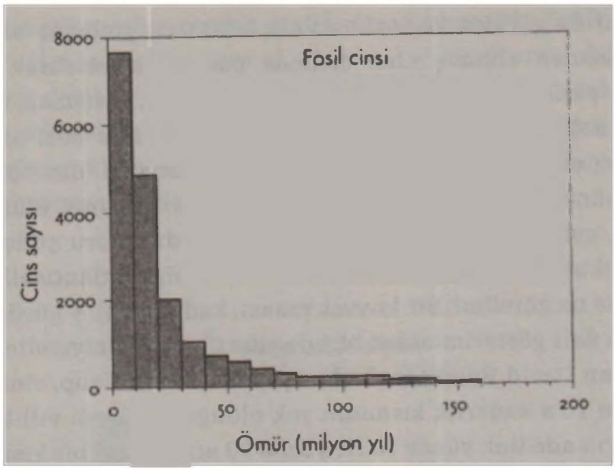


Şekil 5.5 *Her bir 4 milyon yıllık aralıkta meydana gelen yok oluşların miktarını göstermek üzere, Jack Sepkoski'nin verisi bir histogram üzerinde çizilmiştir. Yok oluşların %90'ından biraz daha fazlası, aralıkların sadece %50'sinde meydana gelmektedir. Bu da bir eş dağılıma işaret etmez.*

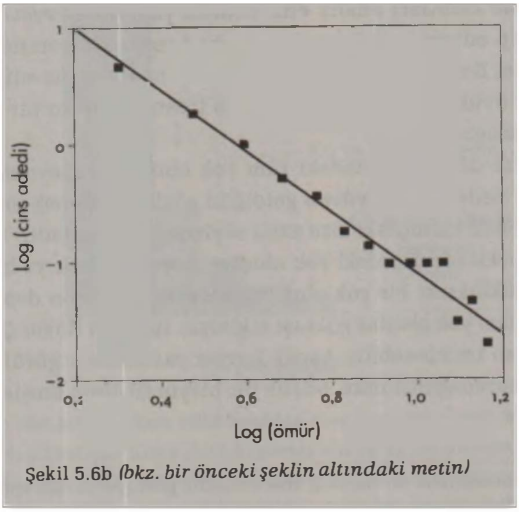
Yukarıda görülen ve Sepkoski'nin 1993'te yayınlamış bir makalesinden alınmış olan çizimde gösterilen yüzdeler, daha önce sözünü ettiğimiz yüzdelerle tam olarak uyuşmaz; çünkü buradakiler canlı türlerine değil ailelere –hatta bazı ailelere (deniz omurgasızlarına)– aittir. Yine de örneğin "dinozorların ölümünün", aynı zamanda "deniz omurgasızlarının ölümüne" denk geldiğini gösterecek kadar uyumludur. Soru şudur: Bu gerçekten de bir rastlantısallıksa ne tür bir rastlantısallıktır? Bir de ne görelim? Bir kuvvet yasası, kadim dost $\frac{1}{f}$ gürültüsü. Buna dair gösterimlerden biri de yine Chicago Üniversitesinde çalışan David Raup tarafından yapıldı. David Raup, cinslerin yüzde 10'a kadarlık kısmının yok olduğu 4 milyon yıllık aralıkların adedini, yüzde 10 ile yüzde 20 arasındaki bir kısmının yok olduğu 4 milyon yıllık aralıkların adedini vs toplayarak, Sepkoski'nin verisini alışılageldik yolla kümelere ayırdı. Sonuçta ortaya çıkan histogram [çubuklu grafik] depremler için gördüğümüz histogramın tıpatıp aynısıydı. Raup aynı zamanda bir cinsin ömrünün ortaya çıktığı fosil kalıntısının, o ömre sahip cinslerin adediyle karşılaştırıldığı bir histogram şeklinde de kanıtları analiz etti. Örüntü yine bir kuvvet yasasını takip ediyordu.[15] Sonradan, Doğu Londra Üniversitesinden Michael Boulter ve meslektaşları tarafından analiz edilen çok daha büyük bir fosil veritabanında tıpatıp aynı tür bir örüntü bulunmuştur.

Artık dünya üzerindeki tüm yok oluşların uzaydan gelen etkiler nedeniyle meydana geldiğini söylememiz pek mümkün değil. Fosil kalıntıları bize şunu söylemek ister gibidir: Her zaman farklı ölçeklerdeki yok oluşlar meydana gelir ve herhangi büyüklükteki bir yok oluş her an olabilir. (Tıpkı depremler gibi.) Bazı yok oluşlar göktaşı etkisiyle, bazıları Buzul Çağı tarafından tetiklenebilir. Ancak kuvvet yasası ve $\frac{1}{f}$ gürültüsünden çıkaracağımız ders, büyük bir olayın fitilinin ateşlenmesi

[15] Kullandığımız terminoloji size anlaşılır gelmiyorsa bile endişelenmeyin; ama söylemiş olalım: Sınıflandırma şemamızın en alt katmanında tür yer alır. Tür, bir cinsin üyesidir ve cins de bir ailenin üyesidir.



Şekil 5.6a *Belirli bir ömür boyunca hayatta kalan cinslere dair sayıların David Raup tarafından, log-log grafiği ve histogram (bkz. bir sonraki şekil) şeklindeki sunuluşu. Cinslerin ömrü, kuvveti 2'ye yakın bir kuvvet yasasına tâbidir.*



Şekil 5.6b *(bkz. bir önceki şeklin altındaki metin)*

için büyük bir tetiklemeye ihtiyaç duyulmamasıdır. Herhangi büyüklükteki bir yok oluş, herhangi büyüklükteki bir tetiklemeyle başlayabilir. Burada önem teşkil eden, kendi kendini düzenleyen, bir enerji akışını geri bildiren ve kaosun eşiğinde bulunan karmaşık bir sistemle, dünyadaki yaşamla uğraşıyor olmamızdır. Tüm bunların yaşamın kendisi için ne ifade ettiğine odaklanmaya neredeyse hazırız. Yine de yaşamın oluşumu ve evrimini anlamamızda önemli yardımı dokunacak bir adımımız daha kaldı. En iyi bilimsel gelenekte, geniş bir karışık (ve karmaşık) durumlar kategorisinde geçerli olan evrensel bir yasa –kuvvet yasası– bulmuş durumdayız. Artık temeller haricinde her şeyin üzerindeki örtüyü aralamak ve bu derin basitlik üzerine inşa edilmiş karmaşık sistemlerin gizemine ışık tutmak için kullanılabilecek, hikâyenin merkezine giden basit bir model bulmak için derinlere bakmak istiyoruz. Tıpkı önce en basit kütleçekimsel sistemi anlayarak kütleçekimin karmaşıklığına ışık tutmaya başlanabileceği, Güneş Sisteminin işleyişine ve galaksilerin evrende hareket ediş biçimlerine bütün ayrıntılarıyla ışık tutmak için başka bir nesne etrafındaki yörüngede bulunan tek bir nesneye bakmamız gerektiği gibi, yaşam ağındaki karmaşıklığın içyüzünü kavramaya da çok daha basit bir sistemi, masa üzerindeki kum yığınını inceleyerek başlayabiliriz.

O zamanlar New York'taki Long Island'da bulunan Brookhaven Ulusal Laboratuvarında çalışan Danimarka doğumlu fizikçi Per Bak, 1980'lerin ikinci yarısında kaosun eşiğindeki sistemlerin karmaşık davranışlarına merak saldı.[16] Bu merakın çıkış noktası, detayları burada bizi çok da ilgilendirmeyen temel fizik çalışmalarıydı. Evrensel değilse bile en azından çok geniş bir olguyla uğraştığını kısa süre içinde anlayan Bak, kuvvet yasalarının ve $\frac{1}{f}$ gürültüsünün her zaman, –bizim karmaşık sistemler adını verdiğimiz– çok sayıda tamamlayıcı parçadan oluşan büyük sistemlerle[17] bağlantılı olduğunu da

[16] Bak (1947-2002), bu kitap tamamlanmak üzereyken hayatını kaybetti.

[17] Aslında bu tam bir totolojidir. "Büyük" sözcüğü kullandığımız bağlamda "birçok parçadan oluşan" anlamına gelmektedir ve bu bü-

fark etti. Tabii ayrıca, sistemler kendi kendini düzenleyen kritiklik olarak bilinegelen duruma, diğer bir deyişle kaosun eşiğine varacaksa bu sistemlerin dışarıdan enerji sağlanan açık sistemler olması gerektiğinin de önemini kavradı. Merakı arttıkça temel fizik dünyası dışında birtakım sistemler aramaya koyulan Bak, Gutenberg ile Richter'in deprem yasasından ve Zipf'in şehirler üzerine çalışmalarından haberdar oldu. Genel bir yasanın geçerli olduğunun farkına varan bir fizikçinin içgüdüsel tepkisi olarak iki genç meslektaşıyla (Chao Tang ve Kurt Wiesenfeld) beraber ne olup bittiğini tarif etmeye yarayacak basit bir model bulmaya niyetlenen Bak, şimdilerde meşhur olan kum yığını modelini ortaya attı.

Başlarda bilgisayarda modellenebilen ve sözcüklerle dahi anlatılabilen bu kavramsal model, sonradan karşımıza çıkacak olan gerçek kum yığınlarını içermiyordu. Modelin ve karmaşık sistemlerin davranışına yönelik sağladığı kavrayışın temelinde, bir masa üzerinde denge halinde sessizce duran (klâsik termodinamikte gördüğümüz dengedeki sistemlerle aynı sıkıcılıkta) bir kum yığınıyla, üzerine teker teker[18] kum taneciklerinin döküldüğü, aynı masa üzerindeki aynı kum yığını arasındaki fark yatıyordu. Gündelik deneyimlerimiz ve deniz kenarında oynadığımız oyunlar, ana hatlarıyla ne olup biteceğinden bizi haberdar eder. Kum, bir öbek halinde –yığının eğimi kritik bir değere erişinceye dek– yukarı doğru yığılacaktır. Sonrasında daha fazla kum eklenmesiyse kum yığınının çökmesine neden olacak bir veya bir dizi kayma yaratacaktır. Kum eklenmeye devam edilirse, kumun bütün masayı kaplayacağı ve kaymaların yaşanacağı eşiğe dek süreç tekrarlanacaktır. Bu durumda, yukarıdaki eşikten eklenen ve masanın ucundan aşağı düşecek kum miktarı aynı miktarda olacak şekilde, yı-

yüklüğün, sistemin fiziksel boyutuyla bir ilgisi yoktur.

[18] Teker teker; çünkü canlı insan bedeni gibi, durağan bir enerji akışı vasıtasıyla geri-bildirim söz konusu olduğunda düzenleri sadece biraz bozulan bir çeşit durağan halde bulunan sistemlerle ilgileniyoruz. Yığının üstüne bir kova dolusu kumu boşaltırsanız işler değişir; tıpkı güneşten dünyaya doğru durağan biçimde akan enerji yerine güneşin tüm enerjisi tek bir devasa patlama sonucu açığa çıkarsa dünyanın başına geleceklerin değişecek olması gibi.

ğındaki kum miktarı ortalama olarak aynı kalacaktır. Sistem, yığına yukarıdan eklenen kum tanecikleri tarafından taşınan bir enerji akışını geri bildiren, kendi kendini düzenleyen bir kritiklik halindedir. Tıpkı herhangi büyüklükteki bir depremin herhangi büyüklükteki uyarıcı tarafından tetiklenebiliyor oluşu gibi tek bir kum tanesinin eklenmesi de, tek bir büyük veya bir dizi küçük çığ yaratabilir veya aynı kum tanesi yığının üzerinde hassas bir dengede de kalabilir. Yine de yığın her zaman kritikliğe yakın kalmaya devam eder.

Bak ve Tang, depremlerin işleyişine ve kuvvet yasasının geçerliliğine dair bir ipucu edinmek için bu fikri temel alarak, dünyanın yer kabuğundaki iki bloğun, dur-kalk şeklinde birbirileri üzerinde kaydığı San Andreas kırığındaki benzer bir deprem bölgesinin davranışını simüle eden bir bilgisayar modeli geliştirdiler. Daha önce de bahsettiğimiz gibi geleneksel deprem modelinde, kırık kenetlendiğinde tek seferde büyük miktarda enerjiyi açığa çıkarır ve gerçekte gerilme tekrar sıfırlanana kadar gerilim birikirdi. Bak ve Tang'ın geliştirdiği *modeldeyse –tıpkı kum yığınında* olduğu gibi– kendi kendini düzenleyen kritik bir halde kaymanın eşiğine gelene kadar gerilim birikir ve kayalar deforme olur. Sonrasındaysa deprem bölgesi, enerjiyi "tek seferde açığa çıkaran" değil de kırığı kritik halde tutacak miktarda ve farklı ölçeklerde kaymalara maruz kalır. İşte bu, geleneksel modellerden farklı olarak, depremlerin neden bir kuvvet yasasına tâbi olduğunu özetler.

Bak ve meslektaşları tarafından bilgisayarlarda geliştirilen "kum yığını" modelleri, yığına eklenecek kum taneciklerinin daireselliği ve yapışkanlığı gibi özelliklerini belirliyordu. Tanecikler yığının yüzeyine rastgele veya hep aynı yerden eklendiğinde farklı olarak ne olduğunu göz önüne alıyorlardı. Aslında canlı sistemler de dahil denge içermeyen sistemleri etkileyen en temel yasalara ışık tutmak için kum yığını oyununu oynayacağınız bir bilgisayara (veya kum yığınına) ihtiyacımız yoktur. Yeni kitabı *How Nature Works*'te Bak, çocukların oynadığı basit lego oyunu kullanılarak kum yığını modelinin iç yüzünün nasıl anlaşılabileceğini izah eder.[19] Bir kareler ör-

[19] Bak, Danimarkalı olduğundan Lego oyununu tavsiye eder; ama talı-

güsü (ideal olarak bir satranç tahtası) kullanarak, diyelim ki maksimum 3 kat yüksekliğinde blokları rastgele karelere yerleştiririz. Böylece bazı karelerde hiç blok olmazken bazılarında ikişer, bazılarında da üçer adet blok (Dama taşı veya bozuk para da olabilir) bulunacaktır. Sonra örneğin kum taneciklerine karşılık gelen blok yığınlarının dört bloğa ulaştıklarında kritikleşeceği ve o yığındaki tüm bloklar kaldırılarak her birinin kritik karenin kenarındaki dört kareye yerleştirileceği veya uygun biçimde tahtanın üstüne "dökületeceği" gibi keyfi bir kural belirleriz. Bunun sonucunda başka bir kare kritik hale gelirse de süreci tekrarlarız. Şimdi blokları birer birer ve rastgele örgüye yerleştirin. (Bloğu yerleştireceğiniz kareyi, zar atarak veya bilgisayardaki rastlantısal sayı üretecisiyle belirleyebilirsiniz.) Her adımda kurallara göre blokları hareket ettirin. Sistemin, farklı ölçeklerde "çığ"lar yaratarak kritik noktaya doğru nasıl hareket ettiğini ve yukarıdan yeni bir malzeme eklendikçe kumların örgünün ucundan nasıl çekip gittiğini göreceksiniz. Kendi kendini düzenleyen bu kritik halde, hem bilgisayar modellerinde hem de bu "modelin modeli"nde, çığlar bir kuvvet yasasına tâbidir.

Bir başka alternatif de tabii ki bunun bir benzerini gerçek kum yığınıyla denemektir. Karşılaşacağınız tek sorun, bildiğimiz kumun, tam olarak basit modeldeki gibi davranmayacak olmasıdır; çünkü kum çok yapışkan değildir ve yüksek miktarda eylemsizliğe sahiptir. Bu yüzden de durmaksızın çığlar meydana gelir. Yığınlar yine kuvvet yasasına tâbidir; ama küçük çığların sayısını katıksız biçimde teşhis etmek zordur. Uzun pirinç tanecikleri, daha fazla sürtünme sağlayarak ya hep ya hiç şeklinde birdenbire bir çığ yaratırcasına düşmez ve daha uzun süre ilginç biçimler halinde kalır. Bu yüzden de "ideal" olarak, uzun pirinç taneciklerinden oluşan öbekler, bilgisayar modellerinin kum yığını için çok daha iyi bir kestirime varmamızı sağlayabilir. Pirinç kullanılarak yapılan deneyler ilk olarak Vidar Frette ve Oslo Üniversitesindeki meslektaşları tarafından tatbik edildi. Bu deneyde işleri daha da basitleştirmek adına kullanılan uzun pirinç tanecikleri, tek pirinç

ta küpler daha da işinize yarayabilir.

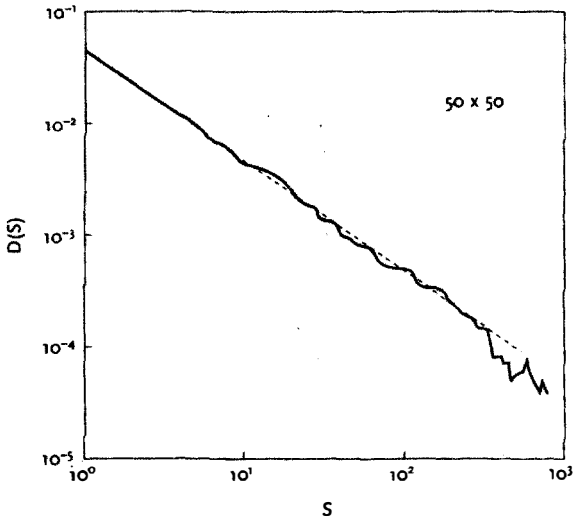
tanesi kalınlığında iki dik cam levhası (çift camlı bir pencere gibi) içine boşaltıldı. (Yine bir fizikçinin, işleri basitleştirme dürtüsüyle karşı karşıyayız.) Bu sayede, tanecikler teker teker dökülürken pirincin nasıl davrandığını da videoya kaydettiler. Olağan yolla yapılan analizler sonucunda görüldü ki, kritik haldeki sistemde meydana gelen çığların büyüklükleri, şimdi öngördüğümüz üzere kuvvet yasasını takip ediyordu. Daha da iyisi, pirinç yığınının –çığların arasına her saplandığında– ucundaki örüntünün anlık görüntüsü çekildiğinde tıpkı Norveç kıyı şeridi gibi fraktal olduğu görüldü. Olayın içyüzüne dair kavrayışların en önemlilerinden biriyse, Norveçli araştırmacılar "pencere"nin tepesindeki boşluktan aşağı doğru bıraktıkları pirinç tanelerinin bazılarını boyayınca ortaya çıktı. Aşağıya doğru bırakılan tanecikler, tahmin etmiş olabileceğiniz gibi, daima yüzeyden aşağı doğru kayıp gitmiyor ve sıradaki çığların bir parçası olmuyordu. Her tanecik, yığının içinde herhangi bir süre kalabiliyordu. Buna karşın hiçbir tanecik de yığının içinde daima kalmıyordu. Yığının en derinliklerindeki tanecikler bile eninde sonunda yüzeye çıkıyor ve çığların arasında kayıp gidiyordu. Bunun nasıl ve neden olduğu hâlâ tam olarak anlaşılmamıştır ama net olan şudur: Herkes tarafından anlaşılabilecek kadar basit, kendi kendini düzenleyen kritiklik örneğinde bile sistemin bütününün, onu tamamlayan tüm parçalar üzerinde ve tüm tamamlayıcı parçaların da sistemin bütünü üzerinde önemli etkisi vardır. Kendi halinde duran ve etliye sütlüye karışmayan hiçbir parça yoktur.

Belirli "tanecikleri" boyama fikri kum yığını oyununun bilgisayar versiyonunda da semeresini verdi. Oyun bundan sonra da adını kum yığını olarak korumasına rağmen aslında bahsettiğimiz durum evvelden öngörülebilmiş olsa pirinç tanecikleri oyunu olarak da adlandırılabilirdi. Pirinç oyununa dair kavrayışlar pirinç yığınına yandan bakılarak sağlanıyorken bilgisayardaki kum yığını simülasyonuna yukarıdan bakma imkânı sayesinde bu oyunda yeni kavrayışlar edinilebiliyordu. (Bilgisayar simülasyonunun avantajlarından biri de tabii ki, her perspektiften hatta isterseniz arakesitleri boyunca bile olan biteni "seyredebilmeniz"dir.) Brookhaven'daki araş-

tırmacılar bu bakış açısıyla, yığının yüzeyinde gözüken kum taneciklerini renklerine göre kodlama komutunu bilgisayara verdiler. Çok ufak çığ ihtimali bulunan ve hiç çığ ihtimali bulunmayan, tamamen yatay veya düşük eğimli bölgelerdeki parçacıklara yeşil, çığın tetiklendiği kritik noktaya yakın dik eğimli bölgelerde bulunanlaraysa kırmızı rengi verdiler. (Aynı şey bizim satranç tahtası versiyonumuzda, üzerinde üç blok bulunan yığınların hepsine kırmızı, diğerlerineyse yeşil renk verilerek yapılabilirdi.)

Deney –tabii ki tamamen bilgisayarda olmak üzere– tümü yeşil renkte olan kum taneciklerini masa üzerine boydan baya serpiştirme işlemiyle başlıyordu. Yığın büyüdükçe nihayet birkaç kırmızı nokta gözükmeye başladı. Kritik hale doğru gittikçe kırmızı noktalar sayıca artmaya ve kum yığınının yüzeyinde boydan boya bir ağ örgüsü gibi koşan ip parçalarına karışıp kaybolmaya başladı. Sadece birkaç münferit kırmızı nokta olduğu zaman –yığının üzerine düşen yeni tanecikler bu noktalardan birinin üzerine inse bile– bunun sadece bölgesel bir etkisi oluyor ve bu düşüş, yığındaki kum taneciklerinin sadece küçük ölçekte bölgesel bir yeniden düzenlemeye maruz kalmasına neden oluyordu. Ağ örgüsü yeterince yoğun olduğundaysa, kırmızı bir noktanın üzerine düşen bir yeni tanecik, yanı başındaki diğer kırmızı noktaları etkileyen bir kargaşaya neden olabilir ve bu da kumun ufak çapta yeniden düzenlemesini tetikleyebilir veya yığının yüzeyinde bir dizi çığa neden olan bir domino etkisi oluşturabilirdi. Önemli olan, sistemdeki kritik noktaların ağ örgüsünün yoğunluğuydu.[20] Aynı önemdeki bir başka şey de, ağ örgüsü ne kadar karışık olursa olsun, sistemin –tıpkı deprem bölgeleri gibi– kendini sıfırlamamasıydı. Kendi kendini düzenleyen kritik halde, ağ örgüsüne tek bir ekstra tanecik düşmesi, kum yığını için daha geniş bir yeniden düzenleme anlamına gelebilir. Ancak bu yeniden düzenlemeden sonra bile hâlâ karmaşık –yalnızca faklı– bir kritik haller örgüsü olacaktır. Ne kadar değişim, o kadar aynı şey.

[20] Bu ağ örgüsü örüntüsünün, evren boyunca yayılmış olan galaksilerin örüntüsünü andırması da bir astronomun ilgisini çeker; ama bu benzerliğin belirgin olduğuna dair elimde bir kanıt yok.



Şekil 5.7 *Kum yığınında meydana gelen farklı büyüklükteki çığların sayısı da bir kuvvet yasasına tâbidir ve bir log-log grafiği üzerinde düz bir doğru oluşturur.*

Sonraki adıma ve yaşamın oluşumuyla ilgili ilk gerçek kavrayışımıza artık hazırız. Karmaşayı köklerine kadar analiz edip üzerindeki örtüyü kaldırmış, deprem dahil türlü türlü şeye, menkul kıymetler borsasına ve insan popülasyonlarına dayanak oluşturan aynı derin gerçeği bulmuş durumdayız. Bütün bunlardan şunu çıkardık: Her şey karmaşık sistemleri oluşturan basit parçaların birbirine bağlı oluşuna, ağ örgülerine dayanmaktadır. Bu tür ağ örgülerinin genel anlamda ve özel olarak yaşamın oluşumu için önemi New Mexico'daki Santa Fe Enstitüsünden Stuart Kauffman tarafından incelenmiştir.

Kauffman'ın, hem karmaşayla ne kast ettiğimizin hem de ortaya çıkan karmaşık sistemlerdeki ağ örgülerinin öneminin görülmesini sağlayan çarpıcı bir benzetmesi mevcuttur. Bizden, bir zemin boyunca yayılmış çok sayıda –mümkünse 10.000 adet– sıradan düğmeyi gözümüzün önüne getirmemizi ister. Düğmeler çiftler halinde birbirine iplerle bağlı olabilir;

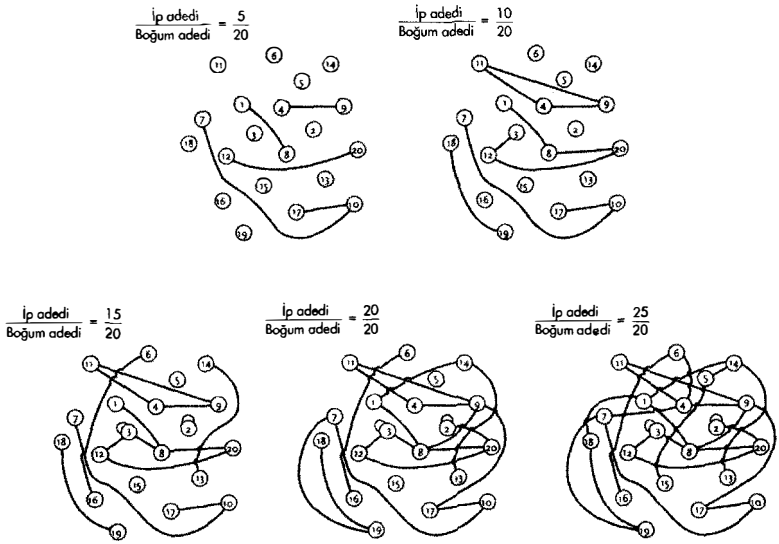
ama düşünce deneyinin başlangıç aşamasında bu tip bağlantılar yoktur. Bu kesinlikle günlük dilde kullandığımız anlamıyla karışık bir sistem değildir; ama düğmeleri bir araya getiriş biçiminiz bu sistemi karmaşık bir sistem haline getirir. Yalnızca yerdeki düğmeler ve ipinizle, hiçbir düğme bir başkasıyla bağlı olmayacak şekilde başlayın. Rastgele bir çift düğme seçin ve zemin üzerinde ilk pozisyonlarında kalacakları şekilde tek bir iple bunları birbirine bağlayın. Bu işlemi birkaç kere tekrarlayın. Halihazırda başka bir düğmeyle bağlanmış olan bir düğmeyi seçerseniz de endişelenmeyin ve bu düğmeyi yine iple başka bir düğmeyle daha bağlayın. Bu işlemleri birkaç kere tekrarladıktan sonra düğmelerin bağlantılarında ufak miktarda bir yapı olacaktır. Zamanla, zaten başka bir düğmeye bağlı bir düğme seçtiğinizi ve bunun böyle ilerlediğini fark edeceksiniz. Hatta bazen, zaten iki bağlantısı birden olan bir düğme seçecek ve büyüyen bir bağlantılar örgüsü haline gelmiş olan üçüncü bir düğmeyle onun bağlantısını kuracaksınız.

Bu ağ örgüsünün ne kadar ilginç bir hale gelmiş olduğunu anlamak istiyorsanız, birkaç düğmeyi tek tek yerden kaldırıp hepsinin başka düğmelerle kaçar bağlantısı olduğunu sayın. Birbirine bağlı her düğme kümesini, ağ örgüsünün bir bileşeni olarak adlandırırız. Düğmeler de –bağlantıların birbirlerine bağlandığı noktaları– boğum noktalarını temsil eder. En büyük kümedeki düğme sayısı (en büyük bileşenin büyüklüğü), sistemin ne kadar karmaşık hale gelmiş olduğunun ölçüsüdür. Başlarda en büyük kümenin boyutu, düğmeleri çiftler halinde bağlayan iplerin sayısı arttıkça, yavaşça ve az çok doğrusal bir biçimde artar; çünkü birçok düğmenin çok sayıda bağlantısı yoktur ve her yeni bağlantının, zaten büyük olan kümeye bir ya da iki düğme daha eklemesi ihtimali zayıftır. İpler sürekli arttığından ve düğme sayısı sabit olduğundan, ip sayısı bir noktada düğme sayısının yarısını geçer. İşte o noktada, yeni ip eklendikçe en büyük kümenin boyutu çok hızlı (temelde üssel) biçimde artmaya başlar; çünkü artık düğmelerin çoğu bir kümeye dahil olduğundan her yeni bağlantının daha küçük bir kümeyi (sadece tek bir düğmeyi de değil) halihazırdaki en büyük kümeye bağlama ihtimali yüksektir. Çabucak, içindeki

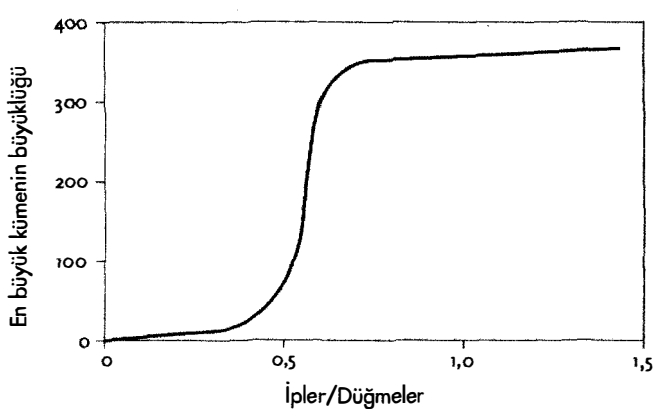
düğmelerin büyük çoğunluğunun bir [1] bileşende birbirine bağlı olduğu tek bir süper-küme oluşur. Sonrasındaysa artık yeni bir ip, çoğu zaman sadece zaten bağlı olan düğmeleri birbirine bağlayacağından, ama yalnızca arada bir süper-kümenin haricinde kalan birkaç düğmeden birini bağlayacağından büyüme hızı yavaşça azalır. Ağ örgüsü her yeni bağlantıda çok değişmiyor olsa da artık bu, hiç şüphesiz karmaşık bir sistemdir.

Aslında düğmelerle oynayarak, iş başındaki bu çeşit bir etkiyi siz de görebilirsiniz (10.000 yerine 50 civarı düğme daha mantıklı olabilir); ama böyle bir sistemin davranış örüntüsü, basit bir bilgisayar modeliyle çok daha net olarak ortaya serilir. Önemli olan, ağ örgüsündeki bağlantıların sayısı boğum noktalarının sayısının yarısını geçince sistemin, aralarında birkaç bağlantı bulunan çok sayıda düğme içeren nispeten sıkıcı bir halden çok daha fazla yapıya sahip, ama artık daha fazla değişimin kendine hareket alanı bulamadığı başka bir durağan hale geçmesidir. Bu, faz geçişi olarak bilinen olgunun basit bir örneğidir ve Kauffman bu geçişi, suyun buza dönüştüğü esnada uğradığı faz geçişine benzetir. Ağ örgüsü içinde, sadece daha fazla sayıda bağlantı eklenmesiyle karmaşıklık doğal biçimde basit bir sistemden türemiştir. Bize ilginç gelen şudur: Köklü değişim, tam olarak sistemin sadece birkaç son bağlantı vasıtasıyla bir halden diğerine dönüştüğü faz geçişi esnasında ve birdenbire meydana gelmektedir.

Bağlantılar tabii ki fiziksel ip parçaları olmak zorunda değildir. Kum yığını modelinde bağlantılar; kütleçekim yasası, kum taneciklerinin yığından aşağı doğru itilmesi, sürtünme yasaları, kum taneciklerinin sabit durmaya özendirilmesi ve benzerlerini kapsayan fizik yasaları tarafından belirlenmiştir. Önemli olan, yığın daha dik hale geldikçe her bir tanecik arasında daha fazla bağlantı yapılıyor olmasıdır; çünkü bir taneciğin hareketi, komşularının durağanlığını artan oranda etkiler. Sığ bir kum yığınında, bir taneciği çıkartmak (veya eklemek) komşularını pek etkilemez. Kritik açıdaysa, bir taneciği çıkartmak, tıpkı bir köprü kemerinin kilit taşını yerinden



Şekil 5.8a *Ağ örgülerinin nasıl oluştuğunu gösteren, Kauffman'ın "düğme" modeli.*



Şekil 5.8b *Bağlantıların sayısı arttıkça, birçok "gevşek" düğme ve birkaç bağlantı bulunan bir halden, neredeyse her düğmenin ağ örgüsünün bir parçası durumuna geldiği hale doğru keskin bir geçiş yaşanır.*

çıkartmak gibi diğer birçok parçanın aşağı düşmesini engelleyen bir yap-boz parçasını çıkartmak anlamına gelir. Bu parça çıkartıldığında kaymaya başlayan diğer tanecikler de başka tanecikleri, onlar da başkalarını etkileyecektir vs. Kum yığınının açısını daha dik hale getirmek de –ağ örgüsünün karmaşıklığını artırmak açısından– düğmeler arasına daha fazla bağlantı eklemekle aynı etkiye sahiptir. Daha önce de gördüğümüz gibi Mars ve Jüpiter arasında bir yörünge izleyen asteroid de –benzer biçimde– sadece güneşin tekil etkisi altında değildir. Bu asteroid, kütleçekimle sağlanmış, prensipte evrende kütleçekim etkisiyle hareket eden tüm diğer nesneleri de kapsayan karmaşık bir bağlantılar örgüsünün –ayrıca daha basit bir düzeyde– Güneş Sisteminin tüm diğer ana gezegenlerini ve güneşi de kapsayan ağın bir parçasıdır. Davranışını öngörülemez kılan da budur.

Kauffman'ın ağ örgüleri üzerinde durmasının nedeni, aynı zamanda ortaya çıkan olguların en önemlisiyle, yaşamın nasıl olup da yaşamsızlıktan ortaya çıktığıyla da ilgileniyor olmasıdır. Dünyada (veya başka yerlerde de) bazı kimyasalların kendini kopyalayan sistemlerle birleşmesini sağlayan kimyasal "ilkel çorba"nın içinde meydana gelen neydi? 1939 doğumlu Kauffmann, önce New Hampshire'daki Dartmouth Kolejinde ve daha sonra da 1961'den 1963'e kadar Marshall bursuyla Oxford Üniversitesinde okudu. Oxford'da felsefe bölümüne ilk başladığında kendini felsefeci olarak görüyordu; ama bu bölümde, dünyanın kafamızdaki imgeleri ile gözlerimiz ve sinir sistemimizin dış dünyadan aldıkları bilgiyi yorumlayışının fiziksel biçimi arasındaki ilişki gibi meselelere öğrencileri yöneltmek için felsefenin yanında hatırı sayılır düzeyde biyoloji de öğretiliyordu. Felsefenin kendine dönük halinden çok büyük bir düş kırıklığına uğrayan ve biyolojiye merak duyan Kauffman, doktor olmak üzere San Francisco'daki California Üniversitesinde tıp okumaya yöneldi. Genlerin, hücre içinde nasıl işlediği ve yaşamın kendisinin nasıl oluştuğuyla ilgili merakını geliştirdiği yer de orası oldu. Kauffman tıp eğitimini tamamladıktan sonra 1969 yılında geçtiği Chicago Üniversitesinde resmi olarak teorik biyolog olsa da, yaşamın oluşu-

munun temellerine olan ilgisini 1980'lere kadar nadasa bırakmak zorunda kaldı; çünkü tekrar işe koyulamayacak kadar yoğundu. (Önce Chicago'da, sonra Ulusal Sağlık Enstitüsünde ve daha sonra da Pennsylvania Üniversitesinde çalışmalarda bulundu.) Bu konudaki temel çalışması, nihayet 1986'da yayınlandı. Çalışmanın çekirdeğindeki düşünce özet olarak, bu kitapta ele almakta olduğumuz ağ örgüleridir. O zamanlar hâlâ kadrolu olarak bulunduğu Pennsylvania Üniversitesinde ders veriyor olsa da Kauffman'ın araştırma üssü Santa Fe Enstitüsüydü. Fikirleri de, oradaki meslektaşlarıyla işbirliği halinde, kaos, karmaşa ve kendi kendini düzenleyen kritiklik fikirleri üzerinde akıl yürütmelerin sürdüğü disiplinler arası bir çevrede gelişti.

Tek yapmanız gereken, ilkel kimyasal karışımın içinde bulunan maddelerin, BZ tepkimelerinde iş başında olan katalitik süreçlere benzeyen ve diğer maddelerin oluşumunda katalizör görevi gören maddeler olduğunu gözümüzün önüne getirmektir. A kimyasalı B kimyasalının oluşumunu katalize eder. Etraftaki kimyasal hammadde çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda,[21] A'nın B'nin oluşumunu sadece az miktarda teşvik ediyor olmasına rağmen B'nin karışım içindeki konsantrasyonunu artırıyor olmadığını görmek zordur. Şimdi B'nin mevcudiyetinin C'nin oluşumunu teşvik ettiğini, C'ninse D'nin oluşumu için bir katalizör görevi gördüğünü vs varsayın. Belli bir noktada ilgili bileşiklerden biri, A'nın oluşumunu katalize eder ve siz de kendi kendini idame ettiren bir etkileşimler döngüsü elde edersiniz. İş başındaki bu döngü de mevcut hammaddeyi kendi yararına kullanan ve güneş ışığından gelen enerjinin ya da yanardağ ağızlarından gelen ısının yardımıyla daha da fazla bileşeni döngüye katar. Kauffman'a göre, yaşam

[21] Günümüzde evrenin tüm ayrıntılarıyla incelenmesi sonucunda ortaya çıkmıştır ki, dünyamıza benzer gezegenlerin oluşmasına ön ayak olan bulut türleri, aminoasitleri de içeren çok farklı çeşitlerdeki molekülleri içerir. Aminoasitler ise, henüz Güneş Sistemi gençken ve daha gezegenimizin tohumlarını –yaşamın kendisini olmasa da en azından kesinlikle yaşamın hammaddelerini– ekmekteyken, kuyrukluyıldızlar vasıtasıyla dünya yüzeyine taşınmış olabilir. Bu konuya daha sonra yeniden değineceğiz.

bu şekilde –ağ örgüsündeki boğumlar arasındaki bağlantıların yeterli sayıda olduğu bir kimyasal sistemdeki faz geçişi olarak– ortaya çıkmıştır. Bu argümanın can alıcı ve ikna edici yönü şudur: Düğmeler ve iplerden oluşan ağ örgüsündeki süper-kümenin oluşumu gibi bu da bir "ya hep ya hiç" olayıdır. Ağ örgüsü yeterince bağlı değilse yaşam yoktur; ama bir iki bağlantı daha eklenirse yaşam sadece mümkün hale gelmez, aynı zamanda kaçınılmaz da olur. Yaşamın oluşması için, muhtemel görünmeyen bir kimyasal olaylar zinciri inşa etmeniz gerekmez ve sistemin canlı mı yoksa ölü mü olduğundan tam olarak emin olmadığımız yarı yarıya haller mevcut değildir.

Gerçek kimyasal etkileşimlerin detaylarını ve bir dizi etkileşim meydana gelmesi için hammaddelerin nasıl yeteri miktarda birbirleriyle yakınlaştığının göz önünde bulundurma ihtiyacını içeren tartışmalara dair değinilmesi gereken birçok mesele daha var. Bir ihtimal de şudur: Bu hammaddelerin ince bir malzeme tabakasında (yapışkan bir sıvının yüzeyi boyunca veya bir çamur yüzeyine bağlı bir tabaka içinde) konsantre olmuş olabilirler. Bu düşüncelerin spekülatif ve tartışmalı olduğunu, herkesin bu argümana ikna olmadığını ve yaşamın nasıl başlamış olacağıyla ilgi başka fikirlerin de bulunduğunu vurgulamamız gerekir; ancak diğer fikirler de herkesi ikna edememiştir ve yaşam, yaşamsızlıktan ortaya çıkarken neler meydana geldiğini de kimse kesin olarak bilmemektedir. Kauffman'ın modelinde bile kontrol edilmeyi bekleyen birçok detay vardır. Yine de özellikle, yaşamın oluşumunu, sık sık her yerde benzerlerini bulduğumuz basit yasalara dayanan aynı karmaşık sistemler kümesine uygun bir kalıba yerleştirmiş olduğu için bu fikirler bütününü ikna edici buluyoruz. Kauffman'ın da söylediği gibi: "Yaşam, kritik bir moleküler çeşitlilikte kristalleşir; çünkü katalitik sistemin kendisi kristalleşir."[22] Yaşamın *kökeni* ne olursa olsun ağ örgüleri, bağlantılar ve kendi kendini *düzenleyen kritiklikleri* kapsayan fikirler, yaşamın bir kez oluştuktan sonra nasıl işlediğine dair yepyeni ve güçlü kavrayışlar sağlar. Bunlara kitabın sonraki bölümünde değineceğiz;

[22] *bkz.* Stuart Kauffman, *At Home in the Universe [Evrende Evimizdeyiz].*

ama ondan önce Kauffman'ın, yaşamın bir kez oluştuktan sonra nasıl işlediğiyle ilgili spekülatif fikirlerinden de bahsetmemiz gerekir. Yaşamın nasıl oluştuğuyla ilgili fikirlerinden daha az tartışmalı olmasa da, Kauffman'ın bu konudaki fikirleri canlıların (tüm evrendeki en karmaşık şeylerin) karmaşıklığının pekâlâ derin basitliğe dayandığını gösterebilecek, akıllara durgunluk veren bir örnek sunar.

Kauffman, bazen kabaca hücrenin mekanizması olarak da adlandırılan şeyleri işleten komutları sağlamakla görevli genler düzeyinde hücrelerin nasıl çalıştığıyla da ilgileniyordu. (Hâlâ da bu konuya ilgi duyuyor.) Komutlar en nihayetinde genlerin kendisini de oluşturan uzun moleküllerde –DNA'da– kodludur; ama vücudun motoru ve de yapısı aslında proteinlerden oluşur. Tıpkı kanımızdaki oksijeni taşıyan hemoglobin ve temelde yaşam için önem taşıyan kimyasal tepkimeleri teşvik eden biyolojik katalizörler olan enzimler gibi, saç, tırnak ve kas gibi şeyler de protein biçimleridir. Proteinler kendileri de, aminoasit adı verilen alt birimlerden oluşan büyük moleküllerdir. Bu yüzden de aminoasitlerin, güneş ve akraba gezegenlerinin de oluştuğu yıldızlararası bulut çeşitlerinde var olduğunun keşfi oldukça ilgi çekicidir. DNA'daki genetik kodlar, proteinlerin yapımıyla ilgili komutları kapsar ve daha sonra bu proteinler de yaşamın işleyişini yürütür. Bir gen aktive edildiğinde (nasıl ve neden olduğu buradaki tartışmamızın kapsamını aşar), ilgili bilgi parçası önce RNA adı verilen çok benzer bir molekül parçasına kopyalanır. Sonra hücre mekanizması RNA'yı okur ve uygun proteini yapmak için komutlara göre hareket eder. Bu iki aşamalı süreç, yaşamın nasıl vücut bulduğunu anlatıyor olabilir. En azından RNA'nın DNA'dan daha önce "icat edilmiş" olması mümkündür. Kauffman'ın senaryosunda yaşamın "kristalleşmesi" protein düzeyinde, yaşamın ilk otokatalitik ağ örgüsünün ortaya çıktığı ve aminoasit bakımından zengin bir kimyasal çorbada meydana gelmiştir. Model, RNA'nın ilk aşamada olaya dahil olduğu ve sonrasında da farklı otokatalitik ağ örgüleri arasındaki rekabetle ilişkili evrimsel baskıların bugün gördüğümüz sisteme yol açtığı ihtimaliyle kolayca bağdaşır. Neyse, biraz konu dışına çıktık.

Kauffman'ın hücrelerin işleyiş biçimiyle ilgili araştırmasına dayanak oluşturan noktalar, genlerin, hücrenin işleyiş biçimini kontrol etmek için hareket etmesi ve daha da can alıcısı, bir genin başka bir geni açıp kapatması şeklinde genlerin birbirlerini etkiliyor oluşudur.[23] Kauffman'ın hücrelerin işleyiş biçimlerini ağ örgüleri bağlamında araştırması, tıp öğrencisiyken ağ örgüleri üzerine geliştirdiği gayri resmi merakına kadar eskiye uzanır; ama bunun meyvelerini alması ancak 1980'lerin sonunda Santa Fe Enstitüsündeki çalışmalarında mümkün olmuştur. Kauffman bu çalışmayı yürüttüğü sırada, insan genomu olan DNA'da 100.000 civarı farklı gen bulunduğu düşünülüyordu. O tarihlerden itibaren insan genomu üzerine yapılan araştırmalarsa bu sayının abartılı olduğunu göstermiştir ve bir insan olmayı belirleyen genlerin adedinin daha önce tahmin edilenin yaklaşık üçte biri olduğunu ortaya koymuştur. Tüm bu genler insan vücudundaki her hücrenin DNA'sında bulunur; ama vücuttaki her hücrede aktif değildir. Farklı tür hücreler farklı görevler için uzmanlaşmıştır ve bu yüzden karaciğer hücreleri, örneğin kaslardaki hücrelerden oldukça farklı işlevler görür. Hücrelerin uzmanlaşmış biçimlere farklılaşması embriyonun gelişimi esnasında olur. Bu gelişim ve hücre uzmanlaşmasını anlamak da en önemli biyolojik araştırma sahalarından biridir. Süreç nasıl gelişiyorsa gelişsin, tamamen gelişmiş bir insanda 256 tür uzmanlaşmış hücre vardır. Her durumda, sadece uygun DNA kısımları (uygun genler) yaşamın normal süresince her zaman "açıktır" ve bu yüzden de bir karaciğer hücresi her zaman sadece bir karaciğer hücresidir. Yine de, uzmanlaşmış bir hücredeki DNA'nın bir yumurta hücreye kopyalanıp sonra da DNA'nın geldiği kopya olan yeni bir yetişkine dönüştüğü klonlama sürecinde de gösterildiği gibi, geri kalan tüm genetik bilgi hâlâ oradadır.

---

[23] Genetik mühendisliğinin, bazı kaynakların sizi inandırmış olabileceği kadar basit olmayacağının ana sebebi budur. Tek bir gen üzerinde değişiklik yapmak, diyelim ki akciğerlerin kapasitesini arttırmak mümkün olsa bile (ki bu pek olası gözükmez) bu geni değiştirerek, aynı ağ örgüsü içerisindeki diğer genlerin davranışını da –şimdilik öngörülemez biçimde– değiştirmiş oluruz.

Bir hücrenin işletilmesine ilişkin ağ örgüsü, her gen için tek bir boğumun bulunduğu ve daha önce gösterdiğimiz modelde düğmeleri bağlayan iplere benzer şekilde genleri bağlayan bağlantıların olduğu bir bağlamda tanımlanabilir. 30.000 ile 100.000 civarı sayıda genin dahil olduğu böyle bir ağ örgüsünün davranışını tanımlamanın, en modern bilgisayarlar kullanılsa bile ne kadar karışık olacağını tahmin edebilirsiniz. Kauffman, ağ örgüsündeki boğumların, kablolarla rastgele bağlanan ampullere karşılık geleceği bir benzetme kullanır. Böyle bir sistemde tüm ampuller kapalı veya tüm ampuller açık olabilir. Bu iki uç ihtimalin arasında da, farklı ampul kombinasyonları şeklinde bazılarının açık bazılarının kapalı olduğu çok sayıda farklı hal bulunur. Daha net bir şekilde ifade edecek olursak, N adet böyle ampul varsa, her bir ampul bu iki halden herhangi birinde (açık ya da kapalı) bulunabileceğinden tüm sistem için hal sayısı 2^N'dir. Tek bir ampul için iki, iki ampul için dört, üç ampul için sekiz vs hal bulunur. Kablolarla rastgele birbirlerine bağlanmış sadece 100 ampul için 2^{100} (yaklaşık 10^{30} adet) farklı hal söz konusudur. Bu kadar büyük bir sayıyı insan hafzalasının alması mümkün olmasa da bir karşılaştırma yapmak faydalı olabilir. Evrenin doğduğu Büyük Patlamadan beri toplam $4x10^{17}$ saniye geçmiştir ve 10^{30}, 10^{17}'den –13 değil– tamı tamına 10^{13}, diğer bir deyişle on trilyon kat büyüktür.

Yine de Kauffman ve meslektaşları gayet gözü pek biçimde, bu denli büyük ağ örgülerinin nasıl davrandığını bilgisayar modelleriyle araştırdılar. Bu zahmetli araştırmada belli bir ampulün açık ya da kapalı olması, o ampulün kabloyla bağlı olduğu diğer ampulün haline bağlıydı. Kauffman ve meslektaşları Boole cebirini[24] uyguluyordu ve bu yüzden de, iki diğer lambaya kabloyla bağlı olan belli bir ampulün açık olması için ancak diğer iki ampulün her ikisinin birden açık olması (VE işlemi) veya diğer iki ampulden bir ya da ikisinin ışık veriyor olması (VEYA işlemi) gerekiyordu vs. Araştırmacılar her biri farklı sayıda ampul içeren ağ örgülerinin genel davranış

[24] İsim babası, bu fikri geliştiren İngiliz matematikçi George Boole'dur (1815-1864). Boole cebiri birçok programlama dili için önemlidir.

örüntülerini incelemeye koyuldu. Bu ağ örgüleri içerisindeki boğumların her birine de farklı sayıda bağlantı eklenmiş ve farklı Boole operatorü fonksiyonları rastlantısal olarak tahsis edilmişti. İncelemeler de bekleneceği üzere yıllar sürdü.

Ekibin aradığı şey basit yasalar sonucu oluşan durağan örüntülerdi. Sayı absürd derecede büyük olsa da bu sistemlerin her birinin sonlu miktarda hali vardır. Sistemi, bazı ampullerin açık bazılarının kapalı olduğu rastgele seçilmiş bir halde başlatırsanız, müracaat edilmiş olan belli Boole yasaları kümesi gereğince ışıklar, titremeler halinde yanıp sönecektir. Yeterince şanslıysanız da sistem –kendi kuyruğunu kovalar gibi– aynı haller çevriminin etrafında durmadan tekrar eden bir örüntüye yerleşecektir. (Konunun bağlamı gereği "hal çevrimi" adını verdiğimiz çevrim –özünde– daha önce bahsettiğimiz "limit çevrimi"nden farksızdır.) Hal çevrimi, örüntüyü fark etmenize izin verecek kadar kısa veya evrenin ömrü boyunca bekleyip hiçbir tekrar edişe tanıklık edemeyeceğiniz kadar uzun olabilir. Bir diğer ihtimalse sistemin, bazı ampullerin açık bazılarının kapalı olduğu bir halde donakalması ve bir daha sonsuza dek yanıp sönme olmamasıdır. Hal çevrimleri, sistemin birer çekicisi olarak davranabilir hatta bazı durumlarda çok güçlü birer çekiciye dönüşebilirler ve böylece, sistemi hangi halde başlatırsanız başlatın sistem çabucak bu hal çevrimlerden birine doğru hareket eder. Hücresel yaşamın sırrı da bu olabilir.

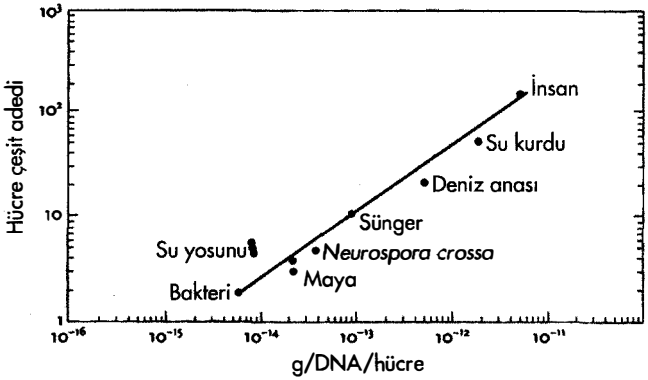
Kauffman ve meslektaşları fark ettiler ki her ampul için tek bir girdi varsa, –kaç boğum olursa olsun ve Boole cebirinin hangi yasaları geçerli olursa olsun– ilgi çekici hiçbir şey meydana gelmez. Sistem ya çok kısa bir hal çevrimine girer ya da donakalır. Her boğumdaki bağlantı adedi 2'den fazla olursa da kaos hüküm sürer. Çekiciler yine vardır. Gel gelelim çekicilerin devasa sayıda hali mevcuttur ve bu çekiciler, –klâsik Kelebek Etkisine çok benzer biçimde– küçük bir değişikliğin bile sistemi başka bir çekici lehine kaydırabileceği kadar duyarlıdır. Hem ilgi çekecek kadar karışık hem de anlaşılabilmeleri mümkün olacak kadar kararlı davranan sistemler *sadece*, her boğumun tam olarak iki adet başka boğuma bağlı olduğu sis-

temlerdir. İlgi çekici şeyler, kaosun eşiğinde meydana gelir ve onları ilgi çekici kılan esas unsur da geri-bildirimdir. Sadece bu sistemlerde, her hal çevrimi boğum sayısının karekökünе denk gelecek uzunluktadır. Az evvel tanımladığımız, sistemdeki 2^{100} ihtimal arasında yalnızca bu şartlar altında sistem, içinde sadece 10 (100'ün karekökü) adım bulunan ve izleyen herkes tarafından örüntünün görülebileceği bir hal çevrimine yerleşir. 100.000 boğumlu bir sistemde bile tipik bir hal çevrimi sadece 317 adım uzunluğunda olacaktır. Daha da ötesi, bu hal çevrimleri güçlü çekicilerdir ve sistem, herhangi bir rastgele halde kurulursa çabucak bu çevrimlerden birine doğru hareket ederek –küçük kargaşalara duyarlı olmayacak şekilde– oraya yerleşir. $2^{100.000}$ (yaklaşık $10^{30,000}$) farklı hali bulunan bir sistem kurar ve bu sistemi rastgele seçilmiş bir örüntüde başlatırsanız, sistem neredeyse kelimenin tam anlamıyla göz açıp kapayıncaya kadar aynı düzenli tertipte bu 317 hali tekrar tekrar ziyaret eden kararlı bir çevrime yerleşecektir.[25]

Sadece bu kadar da değil. Aynı tür bir istatistik, böyle bir sistemde var olabilecek farklı hal çevrimlerinin sayısı için de –daha yaklaşık biçimde olmakla beraber– geçerlidir. Az evvel tanımladığımız tür sistemlerde, yaklaşık olarak boğum sayısının karekökünе eşit sayıda farklı çekici bulunmalıdır. 100.000 farklı boğumda yaklaşık olarak 317, 30.000 boğumdaysa 173 farklı çekici vardır. İnsan genomu içinde 30.000 ile 100.000 arası bir sayıda gen ve insan vücudunda da 256 farklı tip hücre bulunur. Her hücre tipi, içinde belirli genlerin açık diğerlerinin kapalı olduğu insan genomu için belirli bir hal çevrimini temsil ediyor olabilir miydi? Kauffman bu ihtimali test etmek için, farklı organizmalar içindeki genlerin ve hücre tiplerinin sayısını karşılaştırdı. Bakterilerin bir ya da iki, mayaların belki üç, sirkesineğininse 60 (vs) farklı tip hücresi vardı. Hücre tiplerinin sayısı, organizmada bulunan DNA sayısının karekökүyle orantılı olarak artıyordu ve tüm canlı türlerinin genetik taslağı henüz elde edilmemiş olsa da gen sayısının DNA miktarıyla orantılı olması akla yatkın gözüküyordu.

---

25. Boole yasalarının seçimiyle alakalı, bu sistemleri etkileyen bir parametre daha mevcuttur; ama bu bir çeşit ince ayar yapmaktır ve burada üzerinde durduğumuz temel noktayı etkilemez.



Şekil 5.9 *Bir hücredeki DNA miktarı ile farklı organizmalardaki farklı tür hücrelerin sayısını karşılaştıran log-log grafiği. Kauffman'ın, yapısal ve düzenleyici genlerin sayısının hücredeki DNA sayısıyla orantılı olduğu varsayımından hareketle öngördüğü gibi, 0,5 eğimli (bir karekök yasası ya da $\frac{1}{2}$ kuvveti), neredeyse tam bir düz doğruyla karşılaşırız.*

Hücre tipi adedi, tam da gen sayısının karekökündeki artışla beraber artmaktadır! Buradan yapılacak çıkarım şudur: Kum yığınlarına ve ampullerin ağ örgüsünü yöneten yasaların aynıları, vücudumuzdaki hücreler için de geçerlidir. Yuvarlak bir hesapla, birkaç yüz tip insan hücresi olduğunu ve bunun, Boole cebirinin yasalarına uygun olarak birbirleriyle etkileşime giren on binlerce genin ağ örgüsünde çekici olarak bulunan birkaç yüz hal çevrimi olmasından kaynaklandığını söyleyebiliriz. Her bir tip hücrede, genlerin çoğu "kapalı" halde donmuş durumdadır; az sayıda gen ise, birkaç yüz adım uzunluğundaki bir çevrimin içinden geçen ve bu çevrim boyunca hücrenin kimyasal makinesini o hücrenin tekrardan önceki tipiyle uyum içinde çalıştıran bir örüntü içinde birbirlerini açıp kapayarak yanıp söner. İşte hücreler düzeyinde yaşamın sırrı budur.

Bu konudaki çalışmalar hâlâ sürmektedir ve dahası, bu etkileyici ve güçlü fikirleri bütünlüklü bir hücre farklılaşması ve gelişimi teorisine dönüştürmek için yapılması gereken çok şey vardır. Ne var ki bizim gibi evrenin en karışık sistemleri olan varlıkların bile basit yasalar üzerine inşa edildiğini ileri

süren bu teori şimdiye kadar iyi yoldadır. On binlerce genden oluşan etkileşim halindeki sistemin tüm görünen karmaşıklığı, dünyanın derin basitliği sayesinde birkaç yüz mümkün hale indirgenir. Kauffman'ın da söylediği gibi: "Bizler daha derin bir düzenin doğal dışavurumuyuz." Şimdi bu basit düzenin, sadece genler ve diğer kimyasallar arasındaki değil aynı zamanda tüm dünya genelindeki farklı canlı organizma çeşitleri arasındaki etkileşimleri de nasıl etkilediğine geçelim.

6

Yaşamın Gerçekleri

Evrim bir gerçekliktir; tıpkı güneş çevresindeki bir gezegenin yörüngesinin eliptik şekli gibi. Hem fosil kalıntılarında hem de dünya üzerindeki mevcut yaşamla ilgili çalışmalarda evrimi, bir canlı türünü diğerine dönüştürürken iş başında görebileceğimiz bol miktarda kanıt vardır.[1] Tıpkı Isaac Newton tarafından on yedinci yüzyılın ikinci yarısında ulaşılan ve gezegenlerin neden eliptik yörüngeler izlediğine dair açıklama getiren bir model olan kütleçekim teorisi gibi, birbirlerinden bağımsız biçimde on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında Charles Darwin ve Alfred Russel Wallace tarafından ulaşılan doğal seçilim teorisi de evrimin niçin meydana geldiğini açıklayan bir modeldir. Her iki teori (ya da model) de konularında söylenebilecek son sözleri söylememiştir. Newton'un teorisi, yirminci yüzyılın başlarında, kütleçekimin nasıl işlediğiyle ilgili daha bütüncül bir model olan genel görelilik teorisini bulan Albert Einstein tarafından ilerletildi. Einstein'ın teorisi, Newton'unkinden daha bütüncüldür; çünkü Newton'un teorisinin, içinde yaşadığımız evreni tanımlamakta (özellikle de yüksek kütleçekimsel alan bulunan koşullar altında) yetersiz

[1] Örn. *bkz.* Carl Zimmer, *Evolution* veya Jonathan Weiner, *The Beak of the Finch.*

kaldığı durumlarda yüksek bir kesinlikte geçerliliği vardır. Ne var ki Einstein'ın teorisinin doğru olduğu gerçeği, Newton'un teorisinin yanlış olduğu anlamına gelmez. Newton'un kütleçekimsel teorisi, örneğin dünya üzerinde bir elmanın ağaçtan yere düşüşünü veya dünya ile ay arasında seyahat eden bir uzay aracının yörüngesini tanımlamak için hâlâ büsbütün yeterlidir. Sadece, bazı koşullar altında resmin bütününü görebilmek için Newton'un kütleçekimsel teorisinden daha fazlasına ihtiyacınız vardır.

Yirminci yüzyılın sonuna gelindiğindeyse, bazı koşullar altında (özellikle de bir ekosistem içinde etkileşim halinde olan çok sayıda canlı türü olduğunda) evrimin nasıl işlediğiyle ilgili resmin bütününü görmek için Darwin-Wallace teorisinden daha fazlasına ihtiyacınız olduğu netleşmiştir. Ne var ki bu da Darwin-Wallace modelinin büsbütün yetersiz olduğu anlamına gelmez. Darwin-Wallace teorisi de bazı evrimsel durumları (özellikle de birbirleriyle ve fiziksel çevreleriyle etkileşim halinde olan birkaç canlı türü bulunanları) tanımlamak için hâlâ büsbütün yeterlidir. Bu teoriye "Darwinci evrim" dememizin nedeni, teoriyi (1859'da yayımlanan kitabı *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*'da *[Türlerin Kökeni]*) geniş kitlelerle ilk olarak Darwin'in tanıştırmış olması değil Wallace'ın bizzat kendisinin, teoriyi asıl keşfedenin Darwin olduğunu söyleyen ilk kişi olmasıdır. Birbirleriyle etkileşim halindeki çok sayıda canlı türünden oluşan ekolojik ağ örgülerindeki karmaşık etkileşimler ağını da işin içine katarak resmi çok daha bütüncül bir şekilde önümüze koyan yakın zamanlardaki çalışmaların önemini anlamamız için, önce Darwinci evrimin tam olarak ne hakkında olduğuyla ilgili net bir fikir edinebilmemiz lazım.

Darwinci evrimin özü, neredeyse bir totoloji kadar dolambaçsız bir mantık zinciri kurarak üç adımda özetlenebilir. (Bu mantık zinciri o kadar dolambaçsızdır ki Darwin'in çağdaşlarından biri ve doğal seçilim fikrinin destekçisi olan Thomas Henry Huxley bu mantık zinciriyle ilk karşılaştığında "Nasıl bunu ilk düşünemeyecek kadar aptal olabilirim?"[2] demiştir.)

[2] *bkz.* Carl Zimmer, *Evolution.*

İlk olarak, yavru, ebeveynlerini andırır. Karakteristik özellikler bir nesilden sonrakine kalıtım yoluyla aktarılır. İkincisi, karakteristik özellikleri bir nesilden sonrakine kopyalayan süreçler (her ne ise) mükemmel değildir; bu yüzden de her bir nesildeki bireyler, hatta kardeşler arasında ufak (hatta bazen hiç de ufak olmayan) farklılıklar bulunur. Örneğin herkesin burnu vardır; ama bazı insanlarınki diğerlerinden daha büyüktür. Büyük burun bir ailenin karakteristiği olabilir, ama o aile içindeki iki kardeş –yine her ikisinin de sizden büyük birer burnu olacaksa da– tam olarak aynı büyüklükte burunlara sahip olmayacaktır. Son olarak ve Darwin'le Wallace'ın ikisinin de benimsediği önemli nokta olmak üzere, her nesilde dünyaya gelen bireylerin sayısı, hayatta kalarak birer yetişkin olan ve sıraları geldiğinde de üreyen bireylerin sayısından fazla olur.[3] Peki *neden* bazı bireyler üremek üzere hayatta kalabilirken bazıları bunu başaramıyordu? Huxley'i, bahsettiğimiz meşhur yorumuna iten kavrayış şudur: Hayatta kalan bireyler, çevresine en iyi uyum sağlayanlar veya diğer bir deyişle yiyecek bulma, eş bulma (veya cezbetme) ve başka bir şeye yem olmama konusunda iyi olanlardır. "En uyumlu olanın hayatta kalması"[4] ile anlatılmak istenen budur: Mutlaka fiziksel olarak fit ve atletik olan bireyler değil, çevrelerine (başka türlerin varlığıyla sağlanan "çevre" de dahil) en iyi uyum sağlayanlar. Tıpkı bir yap-bozdaki boş yere uyan parça veya kilidi açmaya uygun anahtar gibi. Fiziksel olarak *sağlıklı* olanlar değil, *uyum* sağlayanlar.

Şimdi mantık zincirinin en başına dönelim: En iyi uyum sağlayan bireyler hayatta kalır ve ürer. Böylece karakteristiklerini (onları ilk aşamada başarılı kılanlar da dahil olmak üzere) sonraki nesle aktarırlar. Çevre aynı kaldığı sürece (ama sonra göreceğimiz gibi "ancak ve ancak" bu şartta) bu süreç, canlı türünün üyelerine, ekolojik nişlerine [yaşam alanlarına]

---

[3] Aynı argüman elbette bitkiler için de geçerlidir. Burada sadece hayvanlar açısından durumu tanımlamamızın nedeni, bizler için de geçerli olduğunu vurgulamak isteyişimizdir.

[4] *Survival of the fittest. "Fit"* sözcüğü İngilizce'de aynı zamanda uymak, uyum sağlamak anlamına gelir –çn.

ilelebet zarifçe uyacakları şekilde ince bir ayar yapar. Doğrusu, Darwin'i doğal seçilim fikrine iten gözleme dayalı kanıtın bir kısmı (olayı tam olarak kavraması bayağı uzun bir süre almış olsa da), Galápagos takımadalarındaki farklı adalarda bulunan ispinozlar üzerine yaptığı çalışmalara dayanır. Farklı adalardaki kuşlar aynı ailenin üyeleri olsa da, kuşların zor çatlatılan ve sert tohumlardan beslendiği bir adada ispinozların kısa ve güçlü gagaları vardı. Kuytu ve çatlaklar didiklenerek besin sağlanabilen diğer bir adadaysa kuzen ispinozlar daha uzun ve daha ince gagalara sahipti. Her biri kendi adasındaki yaşama iyi adapte olmuştu; ama bir adadaki kuşlar diğerine götürülüp salıverilseydi tam bir hayatta kalma mücadelesi vermeleri gerekirdi.

Vurgulamamız gerekir ki bu mücadele ispinozlar ile diğer canlı türleri, hatta tohumlarından beslendikleri bitkiler arasında olmazdı. Besin sağlamak için yapılan rekabet *aynı türün üyeleri arasındadır*. Verdiğimiz örnekte, sadece sert tohumların bulunduğu adada yaşayan bir kuş olsanız daha güçlü bir gagaya sahip olmak sizi diğer kuşlardan avantajlı kılar. Bu da daha fazla besin bulabileceğiniz ve sağlam gaganızı kalıtım yoluyla alacak daha büyük bir yavru kuluçkanızın olması anlamına gelir. Kısmen az sağlam birer gagaya sahip kuşlar da buna bağlı olarak daha az besin elde edebilecektir ve bir sonraki nesilde gagalar ortalama olarak bir önceki neslinkinden daha sağlam olacaktır.[5] Benzer şekilde, tilkiden kaçan bir tavşan da evrimsel anlamda tilkilerle değil, diğer tavşanlarla rekabet halindedir. En hızlı koşan ve en beklenmedik zikzakları çizenler hayatta kalacak ve yavrulayacak, başaramayanlarsa yem olacaktır. Bu yüzden tavşanlar, takip eden nesillerde hız-

[5] Bu satırları okuyan herkes muhtemelen şu fikirlerden haberdardır: Bir bedenin fiziksel karakteristikleri (fenotip), hücreleri içindeki genler kümesi (genotip) tarafından belirlenir ve fenotipteki değişimler, genotipteki değişimler (örneğin DNA'nın kopyalanması esnasında meydana gelen ve bazen mutasyon adı da verilen hatalar) sonucunda meydana gelir. Tüm bunlar hakkında tekrar fikir edinmek istiyorsanız, Richard Dawkins'in herhangi bir kitabı veya John Gribbin'in *In Search of the Double Helix* adlı kitabı işinize yarayabilir.

lı, ama düzensizce koşma konusunda daha başarılı olacaktır. Tabii ki tilkiler de diğer tilkilerle rekabet halindedir. En hızlı koşan veya avını yakalamak için en büyük kurnazlığı yapan tilkiler hayatta kalacak ve bu tilkilerin karakteristiklerini kalıtım yoluyla edinen yavru sayısı, daha yavaş ve aptal tilkilerden sayıca fazla olacaktır. Burun büyüklüğündeki çeşitlilik örneğimize dönelim. Çevremizdeki bir değişimin belli bir çeşit buruna sahip olanları dezavantajlı kılacağı bir durum düşünün. (Bir tür hava kirliliği buna neden olabilir.) Bu durumda küçük burunlu yavruların, bebeklik çağında ölmesi daha yüksek ihtimal dahilinde olacaktır. (Unutmayın ki karakteristikleri bir nesilden sonrakine kopyalayan süreçteki kusurluluklar, kardeşlerin bile farklı büyüklükte burunları olmasına neden olabilir.) Büyük burunlu aileler yeni çevreye küçük burunlulardan daha iyi uyum sağlayacak, ama bu aileler içinde bile daha büyük buruna sahip çocuklar kardeşlerinden daha başarılı olacaktır.[6] Popülasyonun ortalama burun büyüklüğü de nesiller içinde artacaktır.

Darwin'in ne olup bittiğine dair gözünün açılmasına neden olan bahsettiğimiz ispinoz popülasyonlarında tam da bu tür bir etki gözlemlenmiş olduğundan, aslında sadece varsayımsal örneklerden gitmemiz gerekmez. 1970'lerin başında, Princeton Üniversitesinden bir karı koca olan Peter ve Rosemary Grant, Galápagos'taki Daphne Adası kuşlarını inceleyen uzun bir çalışmaya başladı. Ada, tohumları çatlatmak için güçlü birer gaga kullanan bir tür kara ispinozuna, *orta yer ispinozuna [Geospiza fortis]* ev sahipliği yapıyordu. 1977 yılında, çalışma için gözlemlenen 1000-1200 civarı ispinozun öldüğü şiddetli bir kuraklık yaşandı. İspinozlar öldü; çünkü besin için bel bağladıkları çok sayıda bitki ölmüştü ve bu yüzden de kuşlar arasında besin için çok acımasız bir rekabet yaşanıyordu. Hayatta kalan ispinozların tümü, daha küçük kuşların çatlatıp açamadığı tohumları yiyebilenlerdi. Tamamen kuraklık sonrası hayatta kalan kuşların soyundan gelen yeni kuşlardan oluşan yeni popülasyonun gagalarını ölçen Grant çifti, bu

6 "Daha iyi", "daha fazla yavrulamak" anlamına gelir; evrimsel başarı bağlamında tek kriter budur.

kuşların gagalarının kuraklık öncesinden ortalama olarak %4 daha büyük olduğunu gördü. Darwinci evrimin özü budur ve bu öz, Galápagos adalarındaki yaşam gibi klâsik bir örnektekine benzer, sadece birkaç canlı türünü içeren görece durağan durumları açıklama konusunda epey başarılıdır. Bu türden bir doğal seçilimin, tam bir yenişememe halini veya evrimsel durağan strateji (ESS – Evolutionary Steady Strategy) adı verilen şeyin sonucunda yaşamın iki mümkün hali arasında bir dengeyi meydana getirebileceğini göz önünde bulundurarak bu argüman dizisinin mantıksal sınırlarını çizebiliriz.

Olayın içyüzünü, oyun teorisinin matematiksel yasalarını evrimsel biyolojiye uygulayarak anlayabiliriz. Sevimli ismine ve satranç ile damaya da uyarlanabiliyor olmasına rağmen oyun teorisi, esas olarak Soğuk Savaş boyunca savaş "oyun"ları (farklı askeri ve politik strateji çıkarımların değerlendirildiği varsayımsal senaryolar) ile ilgili olarak çok dikkat çekmiştir. Bu tekniklerin evrimsel yarışlara ve silahlanma yarışlarına da uyarlanabilir olduğu ortaya çıkmıştır. Evrim çalışmalarına bu şekilde yaklaşmayı öneren birinden, Sussex Üniversitesinden John Maynard Smith'ten bir örnekle devam edelim.

Smith bizden popülasyonun her üyesinin, iki karakteristik yoldan birini seçip o şekilde davrandığı tek bir hayvan türünden oluşan bir popülasyon düşünmemizi ister. Bu iki davranış ihtimalinden biri, popülasyonun diğer üyeleriyle besin konusunda yaşanan anlaşmazlıklarda saldırgan olmayı ifade eden "şahin" davranış, ötekisiyse bu tip anlaşmazlıklarda daha teslimiyetçi bir tavır takınmayı ifade eden "güvercin" davranış olsun. (Gerçek güvercinler Maynard Smith'in de kabul ettiği gibi, aslında daha ziyade saldırgan kuşlardır; ama çoğunlukla barış sembolü olarak görüldüklerinden buradaki bağlamda bu ismin seçilmesi uygun görülmüştür.) Şahinimiz bir parça besin bulduğunda, ortamda türün başka bir üyesi daha varsa her zaman besin için kavga edecektir. Rakip de kavgayı seçerse, ikisinden biri eninde sonunda pes edecek ve kavga ölümcül bir hale gelmeden besini galibe bırakacaktır. Bir güvercinin başına aynı şey geldiğindeyse asla bir kavga başlatmayacaktır. Saldırıya uğrarsa hemen geri çekilecek, uğramazsa da bir

tehdit gösterisi sergileyecektir. Ne var ki iki kuş birbirlerine karşılıklı olarak bu tip bir gösteri sergilediğinde, eninde sonunda ikisinden biri vazgeçecek ve iyi kötü bir nezaket içinde meydan okumayı bırakarak arenayı terk edecektir. Oyun teorisinin önerdiği en önemli şey, bu senaryolara sayıların yerleştirilmesi ve farklı stratejilerin sayısal biçimde karşılaştırılmasıdır. Biz de bu örneğimizde, besinin hayvan için 50 birim değeri olduğunu varsayalım. Hayvan besini yiyebilirse 50 puan kazansın, kaçarsa da hiçbir şey elde edememiş olsun; ama bu kaçışın da hiçbir maliyeti olmasın. Ayrıca besini için kavga ederse yaralanıp 100 puan kaybetsin veya kavgayı kazanırsa yine 50 puanlık ödülü alsın. Kaçmadan veya besini yemeden önce tehdit gösterisi sergiliyorsa da bu gösterinin ona maliyeti 10 puan olsun.

Buradan yapılacak çıkarımları incelemeye tamamen "güvercinler"den oluşan bir popülasyonla başlayalım. Her birey tüm meydan okumalarda gösterinin bedeli olarak 10 puan kaybeder, ama besini yiyebilen 50 puan kazanır (toplamda 40 puan). Bireyler, her meydan okumada ortalama olarak 15 (40 eksi 10, bölü 2) puan alır. Kimse yara almaz ve herkes bir şekilde yiyeceğini yer. Bu model neredeyse ütopik bir sonuca imkân vermektedir.

Şimdiyse popülasyonun içinde, bir mutasyon dolayısıyla tek bir "şahin" in ortaya çıktığını düşünelim. Şahin her karşılaşmada besini ve dolayısıyla 50 puanı, hiçbir maliyeti olmaksızın alır. Sadece birkaç şahin bulunduğu sürece diğer meydan okumaların çoğu güvercinlerin kendi arasında olur ve ortalama ödül de 15'e çok yakın bir puana karşılık gelir. Açık biçimde, işler şahin için tıkırında olacak ve kendi kavga yanlısı eğilimlerini taşıyan çok sayıda yavru dünyaya getirecektir.

Peki herkes "şahin" olursa ne olur? Tam bir felaket. Her karşılaşma bir kavgaya neden olur ve galip 50 puan alırken mağlubun 100 puan kaybettiği ve ortalamanın da -25 olduğu berbat bir durum ortaya çıkar. Etrafta hiç kavga çıkmadan alınabilecek kadar yüksek miktarda besin olmadığı sürece böyle bir popülasyonun nesli kısa zamanda tükenecektir. Ya tek bir mutant güvercin ortaya çıkar ve bu mutant hiç kavgaya girme-

yip her "ihtilafta" sıfır çeker, ama halihazırda boşta bulunan besinin hepsini alırsa? Bu güvercin, şahinlerden daha başarılı olacak ve güvercin karakteristikleri tüm popülasyona yayılacaktır.

Hiçbir uç ihtimal durağan değildir ve her iki uçtan da ortaya doğru bir evrim söz konusudur. Her yedi şahine karşılık beş güvercinin bulunduğu durumda (ve sadece bu durumda) aslında denge sağlanır. Her bireyin, anlaşmazlık durumunda ortalama olarak 6,25 puan aldığı bir durum ortaya çıkar. Farkında olunması gereken ilk nokta şudur: Durağan bir durum (ESS) mevcuttur ve evrim, popülasyonu o duruma doğru götürür. Aynı önemde bir başka noktaysa, bunun, ihtimaller içinde en iyisi olmadığı ve 6,25'lik senaryonun, herkesin güvercin olduğu ortalama 15'lik senaryoya göre hayli kötü olduğudur. *Durağan* senaryo *en iyi* senaryo (kendi ortak çıkarları doğrultusunda hareket eden bireylerin mantıksal bir araya gelişi) olmak zorunda değildir. Ayrıca hemen göze çarpmayan ve ilgi çekici bir noktaya daha parmak basmak gerekir: Popülasyonda her beş güvercine yedi şahin düşseydi veya popülasyonun her üyesi, önceden bunu planlamadan olsa, her karşılaşmada rastgele birer senaryo seçerek on iki durumun beşinde güvercin gibi; on iki durumun yedisinde de şahin gibi davransa durum yine aynı olurdu.

ESS yaklaşımının, bazı popülasyonlarda görülen davranışların gerçek örüntülerinin içyüzüne ışık tutmak konusunda faydalı olduğu kanıtlanmıştır. Ne var ki bu yaklaşım, adından da anlaşılacağı üzere gerçekte hiçbir değişim olmayan, klâsik termodinamiğin evrimsel dengi sayılabilecek durağan durumları ele alır. Bu durumlarda, birbirleriyle etkileşen bileşenlerin sayısı çok düşüktür. (Verdiğimiz örnekte, şahin stratejisi bir bileşen, güvercin stratejisi de diğer bileşendir ve bu bileşenler de birbirlerine tek bir bağlantıdan oluşan bir geri-bildirimle bağlıdır.) ESS'yi iş başında görebileceğimiz, biraz daha karmaşık örnekler de mevcuttur. Yine de bunların hepsi, Boole mantığının yasalarına uygun olarak birbirlerine bağlanmış birkaç ampulden oluşan ve tek bir hale veya can sıkıcı sayıda az halin çevrimine dolanan basit ağ örgülerine benzer. Ne var ki, yal-

nızca içindeki her iki bileşen (ya da tüm bileşenler) diğerlerine yetişmek için olabildiğince hızlı evrimleştiği için dengede duran, diğer bir deyişle aslında sürekli değişiyor olmasına rağmen durağan halde gibi gözüken bir ekosistem ihtimali de vardır. Bu ihtimalin, Soğuk Savaştaki silahlanma yarışını çok andıran, çok da fazla üzerinde durmak istemediğimiz birçok yanı vardır. Bu ihtimal, evrimsel biyolojideki genelgeçer adı olan "Kızıl Kraliçe etkisi"ni de, Lewis Carroll'ın *Through the Looking-Glass [Aynanın İçinden]* adlı eserinde, yerinde durabilmesi için koşabildiği kadar hızlı koşması gereken karakterden almıştır.[7]

Kızıl Kraliçe hipotezinin tam olarak ne olduğunu anlamak için bir örnek düşünelim. (Kauffman, hayali bir sinek türüyle beslenen hayali bir kurbağa türüyle bu örneği anlatmaktan yanadır.) Sinekleri yemek isteyen kurbağalar ile yem olmamaya çalışan sinekler birbirleriyle çok sayıda farklı yolla etkileşim halindedir. Kurbağalar, sinekleri yakalama amacıyla daha uzun dilli kurbağalara, sinekler de kaçmak için daha hızlı uçan sineklere evrilirler. Sinekler nahoş bir tat geliştirebilir, hatta kurbağalara zarar verecek bir zehir salgılayabilirler vs. Bu –varsayımsal– ihtimallerden birinin üzerinde duracağız. Bir kurbağanın bilhassa yapışkan bir dili varsa sinekleri daha kolay yakalayacaktır. Sineklerin bilhassa kaygan vücutları varsa da dil onlara dokunsa bile daha kolay kaçacaklardır. Belli sayıda kurbağanın bir gölette yaşadığı ve etraflarındaki sineklerin belli oranını her sene yediği durağan bir durum düşünün. Bu bir çeşit dengedir; ama kararsız bir dengedir ve bir mutasyon (veya sadece bireyler arasındaki doğal çeşitlilikler) vasıtasıyla ekstra yapışkan bir dil geliştiren kurbağayı hatırlayarak da anlayabileceğiniz gibi bir ESS değildir. Bu kurbağa, diğer kurbağalara nazaran daha başarılı olacak ve ekstra yapışkan dil genleri kurbağa popülasyonuna yayılacaktır. İlk aşamada, eskisinden daha yüksek oranda sinek yem olur. Yem olmayanlarsa daha kaygan olanlardır ve böylelikle de ekstra

[7] Kızıl Kraliçe etkisi terminolojisi, Chicago Üniversitesinde çalışan evrimsel biyolog Leigh Van Valen tarafından 1970'lerin başında geliştirilmiştir.

kayganlık geni sinek popülasyonuna yayılacaktır. Bir süre sonra göletteki kurbağaların sayısı eski sayıya dönecek ve her yıl aynı oranda sinek yem olacaktır. Hiçbir şey değişmemiş gibi gözükse de artık kurbağalar daha yapışkan dillere, sinekler de daha kaygan vücutlara sahiptir.

Gerçek hayatta bu tür şeyler her zaman, her nesilde (sadece mutasyonlar sonucu da değil) olmaktadır. Her yeni nesilde, diğerlerinden daha yapışkan dilli bazı kurbağalar ve diğerlerinden daha kaygan vücutlu bazı sinekler vardır. Böylelikle nesiller ilerledikçe ufak adımlarla, daha yapışkan diller ve daha kaygan vücutlara doğru yol alan bir mekanizmanın çarkları dönmeye başlamıştır. Bu eğilimin bariz bir sonu yoktur. Kurbağalar o ya da bu şekilde sinekleri yakalamada gittikçe daha başarılı olurken sinekler de kurbağalardan kaçma konusunda gittikçe daha başarılı hale gelir. Her biri, oldukları yerde kalabilmek için koşabildikleri kadar hızlı koşmak zorundadır.

Elbette gerçek hayatta birbirleriyle etkileşen tür adedi ikiden fazladır. Bu da bir ölçüde, çok daha fazla canlının, olduğu yerde kalabilmek için koşmak zorunda olduğu anlamına gelir. Ne var ki tıpkı ampullerden oluşanlarda olduğu gibi bu ağ örgüleri arasında da canlı türlerinin birbirlerine bağlanma şekillerinden (artık bunları, bir ağ örgüsündeki boğumlar olarak da düşünebiliriz) kaynaklanan önemli farklar vardır. Bir türün herhangi bir biçimde etkilenişi, tüm diğer türleri de doğrudan etkiliyorsa, sözde durağan bir Kızıl Kraliçe durumunun oluşması bile imkânsızdır. Sistemde su katılmamış (ama belirlenimci) bir kaos vardır; çünkü küçük değişikliklerin bile geniş çapta ve öngörülemez etkileri olur. Oysa gerçek yaşam böyle değildir. Gerçek yaşamda bir türü etkileyen şeyler –sonrasında bu etki bir etkileşim dalgası halinde bambaşka diğer canlılar üzerinde etkili olsa da– sadece birkaç başka türü doğrudan etkiler. Bunu, geniş aralıklarla birbirine bağlanmış ampullerin ağ örgüsünde olanlara veya bir kum taneciğini hareket ettirişimizin sadece en yakın komşularını doğrudan etkilemesine, komşuların hareketininse, komşuların komşularını etkilemesine benzetebiliriz.

Gerçek yaşamda olan bitene dair kestirim yapmak için kullandığımız başka bir örnek taşı gediğine koyabilir. Tilkiler tavşanları yer; bu yüzden de tilkilere olanlar (diyelim ki herhangi bir nedenle tilki popülasyonunun artması veya azalması) tavşanları ve tavşanlara olanlar da tilkileri doğrudan etkiler. Bunlar ağ örgülerindeki bağlantı boğumlarıdır. Tilkiler otları yemediği içinse tilkilere olanlar otları bu düzeyde doğrudan etkilemez. Tilkiler ve otlar doğrudan birbiriyle bağlı değildir; ama tavşanlar otları yer (bu iki boğum birbirine bağlıdır), bu yüzden de tilkilere olanlar, tavşanları etkilemesi nedeniyle otlar üzerinde de etkili olur. Daha fazla tilki (diğer her şey sabit olmak koşuluyla) daha az tavşan demektir. Bu da otların daha çok uzamasına imkân vererek sonrasında otla beslenen diğer canlı türlerini etkiler vs. Kauffman'ın kurbağalarına geri dönelim. Kurbağalar (veya yavruları) doğrudan gölette yaşayan balıklara ve balıklar da yakınlardaki bir ormanda yaşayan ayılara yem oluyorsa, sinek popülasyonu yok olduğunda (örneğin insanlar bölgeyi sineklere karşı ilaçladığında) ayılar aç kalacaktır. Gerçek ekolojik ağ örgüleriyse tabii ki bundan daha karmaşıktır ve bazı (yüksek sayıda olmasa da) ara bağlantılar barındırır. (Örneğin balıklar kurbağaları yediği gibi sinekleri de yiyor olabilir.) Kauffman gibiler tarafından ağ örgüsü teorisi bu sistemlere uyarlanmadan önce dahi, halk arasında bu tür sistemlerden "yaşam ağı" olarak söz edilmesi yine de gayet ilginçtir.

Tüm bunlarla ilgili heyecan verici olan şudur: Bir ağ örgüsündeki bir canlı türü değiştiğinde bütün türlerin değişiyor olduğu, birlikte evrim süreci; karmaşık ekosistemleri, kaosun eşiğindeki faz geçişinde bulunan kendi kendini düzenleyen kritiklik noktasına doğru her iki uçtan kendiliğinden itiyor oluşudur. Bir organizma grubu durağan bir strateji içinde kilitlendiğinde canlı türlerinden biriyle ilgili bir mutasyonun, ağ örgüsünün evrilmesine müsaade edecek biçimde kilidi açması muhtemeldir. Doğal seçilim yoluyla evrim, ilgili canlı türüne zarar veren bir değişikliğin izlerinin nesiller geçtikçe silineceğini garanti etse de faydalı olan bir değişiklik yayılacak ve yayıldıkça da sistemi kaosun eşiğine doğru itecek şekilde daha

fazla ağ örgüsünün kilidini açacaktır. Faz geçişinin diğer tarafında, kaotik rejimdeyse, aynı şey tersten meydana gelir. Yaşam oyununun kuralları her nesilde değişirken, kendisini kaostan bir nebze yalıtabilen her birey topluluğu, dış dünyayla bağlantılarının sayısını azaltarak, sağlanan fırsatlardan faydalanabileceği bir duruma doğru doğal seçilim yoluyla evrimleşme şansı elde edecektir. Bu ikna edici argümanın mantığı, Kauffman ve meslektaşları tarafından yürütülen, birbirlerine kablolarla farklı şekillerde bağlanmış ampul kümeleriyle yapılan deneyler ve sayısal simülasyonlarla desteklenmiştir. Basitçe söylersek, canlı türünün her birinin tek tek kendi evrimsel uyumluluğunu maksimize edecek şekilde davranmasıyla tüm ekosistem kaosun eşiğine doğru evrilir. Bu evriliş, ağ örgüsüne tek bir canlı türünün eklenmesinin (veya örgüden tek bir türün çıkartılmasının) yığına tek bir kum taneciğinin eklenmesine (veya yığından tek bir taneciğin çıkarılmasına) karşılık geleceği kum yığını modelini andırır. Aynı zamanda, tek bir türün eklenmesi veya çıkarılmasının tek bir ampulün şalterinin açılıp kapatılmasına karşılık geleceği ampul modeliyle de özü itibariyle aynıdır. Karmaşık sistemler doğal olarak, kaosun eşiğindeki faz geçişine doğru evrilirler.

Tüm bunlar, evrimsel biyologların zaten aşina olduğu bir dille anlatılabilir duruma gelmiştir ve modeli, ona öncülük edenler tarafından hayal dahi edilmemiş biçimde genişletmiştir; ama biz bunun bir benzerini Ilya Prigogine'nin klâsik termodinamiği genişletmesinde de görmüştük. İngiltere'de bir araştırma merkezi olan Rothamsted Deney Üssünde 1920'li yıllarda R. A. Fisher tarafından yürütülen çalışmalarıyla ortaya çıkan model, uyumluluk sahası olarak bildiğimiz şeyi barındırır. Popülasyonun her bir üyesi üzerinde etkin olan doğal seçilim sonucunda popülasyonun tümündeki gen dağılımının nasıl değiştiğini hesaplayan Fisher, evrimsel biyolojiyi matematiksel temellere oturtan ilk kişiydi. Ne var ki tıpkı klâsik termodinamikçiler gibi Fisher da yalnızca her evrimsel probleme en mümkün matematiksel çözümü tarif eden (ilk adım için gayet makul biçimde) denge durumlarıyla ilgileniyordu.

Bu yaklaşım 1950'lerin başında Yale Üniversitesinde çalışan Sewall Wright (1889-1988) tarafından bir adım öteye taşındı. Wright tarafından ortaya konan benzetme, tepelerin başarılı evrimsel stratejileri ("iyi genler"i veya daha net söylersek beraber çalışan iyi gen gruplarını) ve vadilerin ("kötü genler"in) başarısız evrimsel stratejileri temsil ettiği bir sahaydı. Aslında tepelerin çekici görevi gördüğü bir tür faz uzayı olan bu sahada herhangi bir birey, tek bir noktayla temsil edilebilir; ama bir canlı türünün üyeleri birbirleriyle tıpatıp aynı olmadığından (hatırlayın ki bu, Darwinci evrimin kilit noktalarından biridir) bir canlı türü, saha üzerinde küçük bir koyun sürüsünü andıran küçük bir noktalar kümesiyle temsil edilir. Yamacın biraz üzerindeki koyunlar her nesilde daha başarılı ve en fazla yavrulayanlar olurken, yamacın aşağısındakilerse daha başarısız olacak ve daha az yavrulayacaktır. Böylece nesiller geçtikçe bu küçük sürü, zirveye erişinceye dek yamacın tepesinde yerleşecekleri yere doğru hareket edecektir.

Evrimi anlamak için konuyu bu şekilde ele almamız, tam da Darwin'in Galápagos'ta gördüğü ispinozların koşullarına benzer durağan bir çevrede, sadece birkaç başka canlı türüyle etkileşen bir türe ne olacağını anlamak için idealdir. Bu ispinozların, geçmişte bir zaman adaya yolları düşmüş birkaç kuşun soyundan (belki de üreyen tek bir çift kuştan) geldiği düşünülür. Bu kuşlar aslen, sadece adalarda bulduğu besinleri yemek üzere adapte olmuş tek bir türün üyeleriydi. (Tıpkı uyumluluk sahasının tepeleri arasındaki bir vadide oturan küçük bir sürü gibi.) Sürünün bazı üyeleri daha uzun gagalar geliştirecek şekilde evrimleşip sahadaki belli bir tepeye doğru hareket ederken, diğerleri, nihayetinde başka bir canlı türü haline gelene dek daha sağlam gagalı bir hale evrilmiş ve başka bir tepeye tırmanmıştır. Gaga, besinini kırmadan sondajlayamayacak kadar çok uzun ve ince veya tohumları elde edemeyecek kadar hantal biçime geldiğinde bu süreç sona erer.

Fisher'ın matematiğiyle temeli oluşturulan uyumluluk sahası, kullanılan matematik ne kadar basit olsa da çok güzel ve basit bir tasvir ortaya koyar. Yine de bir sorun vardır. Türün evrildiği zirvenin sadece bir bayır olduğunu ve civarda çok daha

yüksek zirveler (evrimsel açıdan daha avantajlı haller) bulunduğunu düşünün. Bu durumda türün, aradaki vadiyi geçerek o diğer zirvelere tırmanmasının hiçbir yolu yoktur; çünkü bunu yapabilmek için önce şu an bulunduğundan dahi daha kötü (daha az uyumlu) hallere doğru evrimleşmesi gerekir. Aslına bakılırsa tür hiç kaçışı bulunmayan bir çıkmaza doğru evrilmiştir. Fisher'ın bize sunduğu saha sadece durağan değil, aynı zamanda canlı türlerinin sadece yerel bir dengeye erişebilecekleri ve orada kalmak zorunda oldukları bir sahadır.

Kızıl Kraliçe etkisi, türler arasındaki etkileşimlerin bu basit resmi nasıl değiştirebileceklerini gösteren bir örnektir. Bir canlı türü mutasyon veya en olağandışı durumda yok oluş yoluyla değişime uğradığında o türün etkileşim halinde olduğu tüm türler bundan etkilenir. Bu etki, uyumluluk sahasındaki zirvelerin yüksekliğinin değişmesine benzer. Her bir tür sahada kendisine en yakın zirveye doğru evrimleşir, ama birlikte evrim dolayısıyla bu zirvelerin konumları ve yükseklikleri de sürekli değişmektedir. Statik rejimde hiçbir şey değişmezken kaotik rejimde saha o kadar çabuk değişir ki hiçbir ilginç şeyin oluşmasına bile zaman kalmaz. Kaosun eşiğinde saha sürekli, ama genellikle yavaşça değişir ve bu da ekosistemdeki her bir canlı türü ve tür grupları için yeni evrimsel olanakların kapısını aralar. Lastiksi dışyüzeyi[8] üzerinde canlı türleri gezinirken gevşek bir trambolin gibi esneyen lastiğimsi ve sonsuza değin değişen bir sahadır bu. Bu da sonu olmayan evrime imkân sağlar. Bu durum kurbağa ve sinek örneğimizde, kutu kutu sinek ilaçlarıyla ortama gelen insanların, üzerinde sineklerin oturduğu zirveyi yerle bir etmesi ve sineklerin vadinin derinliklerine doğru bırakılmasına karşılık gelir. Yine de sinekler, tamamen yok olmazlarsa, popülasyonları bu geçici başarısızlıktan kurtuldukça başka bir zirveye doğru tırmanıp ilaçlara dayanıklı hallere de evrilebilir. İşaret edilmesi gereken şudur: Bu zirve, orada bir yerlerde ilaca dayanıklılığa karşılık gelecek şekilde her zaman bulunuyordu. Dolayısıyla da bu yeni

[8] Bu hoş tasvir, Sewall Wright'ın sunduğu, türlerin aşağılarda değil de zirvelerde bulunabildiği sahanın ters düz edilmiş halidir. Resmi ana hatlarıyla anlamışsınızdır

bir zirve değildir, ancak ortalıkta ilaçlama başlayınca artık daha yüksekte bir yerdedir; çünkü artık ilaçlamaya dayanıklı olma yeteneği ilaçlama sayesinde daha faydalı hale gelmiştir. Bütün bunlara rağmen önceki zirve çökmüş olmasaydı sinekler bu zirveye vadilerin üzerinden geçerek çıkamazdı. Fisher'ın senaryosunun aksine canlı türlerinin evrimsel sahada yerleşeceği tek bir "en iyi yer" bulunmaz. Bir nesilde daha iyi olan şey sonraki birkaç nesil içinde daha kötü hale gelebilse de canlı türünün yapabileceği tek şey, ne zaman bir imkân ortaya çıkarsa daha iyi bir yere doğru hareket etmektir.

Yalnız akılda tutulması gerekir ki bu artık her bir canlı türünün daha iyi bir hale doğru hareket edişleriyle alakalı değildir. Ann Arbor'daki Michigan Üniversitesindeki John Holland, gruplar içinde beraberce çalışan ayrı ayrı canlı türlerinden oluşan ekosistemlerin alt-birimlerine verilmesi gereken öneme dikkat çekmiştir. Aslında beraberce çalışan ayrı ayrı türler grubu tasviri, bir grup genin hücrenin işleyişindeki bir safhayı kontrol eden bir birim olarak çalışmasından, bir grup hücrenin beraberce –örneğin karaciğer olarak– çalışmasına, hatta etkileşim halindeki birçok canlı türünün ağ örgülerinde –ESS ve tam bağımsızlık arasında bir ihtimalde– bağlantılı olmasına kadar geniş bir yelpazede geçerlidir. Holland'ın ortaya koyduğu gibi: "Evrimin 'deneme yanılma' şeklinde hareket edişi sadece iyi bir hayvan inşa etmek için değil, aynı zamanda çok sayıda iyi hayvan meydana getirmek için bir araya getirilebilecek iyi inşa blokları bulmak içindir."[9] Holland'ın meşhur benzetmesi, bilgisayarlar icat edilmeden önce şüphelilerin yüzlerinin görgü tanıklarının tasvirlerine dayanarak çizilmesi için "robot resim"lerin bir araya getirilişiyle ilgilidir. Her biri on çeşitten oluşan, on farklı yüz özelliğini (saç hizası şekli, burun büyüklüğü vs) seçerek herhangi seçilmiş bir bireye benzeyen "resim"i üretebilmek şaşırtıcı derecede süratli ve kolay olur. 10^{10} adet kombinasyonun, diğer bir deyişle bugün dünya üzerinde yaşayan insan sayısından da fazla olan on milyar farklı yüzün hakkından gelmeye çalıştığınızı düşündüğünüzde şaşkınlığınız daha da artabilir. Holland, evrimin "deneme ya-

[9] Mitchell Waldrop'un *Complexity* adlı eserinde geçer.

nılma" mekanizmasının, aynı zamanda farklı evrimsel birimler olarak çeşitli biçimlerde işleyen etkileşim halindeki canlı türleri, ağ örgüsü şeklindeki "iyi inşa blokları" bulmak için çalıştığına işaret ederek daha da öteye gidebilirdi. Bir başka deyişle birlikte evrim, sadece evrim değildir.

Kendisi bu şekilde ifade etmiş olmasa da, 1973'te Kızıl Kraliçe etkisi fikrini ileri sürmesi konusunda da ona yardımcı olan deniz fosilleri üzerine yaptığı çalışmalar aracılığıyla Leigh Van Valen tarafından keşfedilmiş olan şey buydu. Van Valen, bir grup içerisindeki cinsin (örneğin kemikli balıkların) yok oluşu ve fosil kalıntılarından kaybolmasının sabit bir olasılığı olduğunu buldu. Cinsin neslinin tamamen tükenmiş olma olasılığı, halihazırda ne kadar uzun ya da kısa süre varolmuş olduğundan bağımsız olarak, seçilmiş herhangi bir jeolojik zaman aralığı için aynıdır. Bunun aynısı yaşam ağlarındaki diğer düzeylerde de geçerlidir. Bu bağlamda, canlı türleri zaman geçtikçe hayatta kalma konusunda ne daha iyi (evrime rağmen) ne de daha kötü hale gelirler; yok oluş rastlantısaldır. Van Valen bu kanıtı, hayatta kalma mücadelesinin tam da eski zorluğunda olduğu şeklinde yorumladı. Mücadele birbirleriyle etkileşim halindeki bireyleri içerdiğinden bunun anlamı şu olmalıdır: Bir canlı türünü (veya bir cinsi) yaşam sahnesinden tamamen indirecek bir şey meydana gelene kadar tüm canlılar evrimsel olarak sürekli daha verimli hale gelir. Bu sahneden iniş ise, mevcut ekolojik nişleri içindeki canlı türlerine kâğıtların yeniden dağıtılmasına yol açar ve akabinde de her türün yerinde saymak için bile çok daha fazla uğraşmasını gerektirecek yeni bir silahlanma yarışı başlar. Tüm canlı türleri, diğer türlerin hızına yetişmek için olabildiğince hızlı evrimleşmek zorundadır. (Bu noktada Kızıl Kraliçe etkisi kadar "konu komşudan eksik kalmama" etkisi de devreye girer.) Tüm bu etkileşimin bazı evrimsel biyologları son derece heyecanlandıran bir sonucu da, başarılı türlerin aslında zaman geçtikçe evrimleşmek konusunda daha başarılı hale gelmeleridir. (Bir türün değişen çevreye daha çabuk adapte olmasını sağlayan bir mutasyonun kendisinin de başarılı olması ve popülasyona yayılması ihtimali yüksektir.) Bunun bir örneği de, –iki ebeveynin genetik

maddelerini bir yavruda birbirine karıştırarak– evrimi hızlandıran üremenin biçimi olan cinselliğin evrimidir. Bu evrim, bizim gibi büyük, yavaş üreyen, çok hücreli varlıklara küçük ve çabucak üreyen bakteri, parazit gibi organizmalara karşı silahlanma yarışında ayakta kalabilme şansı vermiştir.[10]

Şimdi burada bir mola verip muhtemelen bazı evrimsel biyologları rahatsız eden, ancak herkese açık ve akademi dışındakilere de kabul edilebilir gelecek olan, kullanacağımız bir miktar evrimsel terminolojiden bahsedelim. Bu tartışmanın büyük bir kısmında yok olan canlı türlerinden ve türlerin bir bütün olarak evriminden bahsettik. Tabii ki evrimin birey düzeyinde faaliyet gösterdiğinin ve hayatta kalma mücadelesinde başarısız olanların –hiç yavru bırakamayan– en az uyumlu bireyler olduğunun pekâlâ farkındayız. Bu başarısız oluş canlı türünün yeterli sayıdaki bireyi için geçerli olursa da tür tamamen yok olur. Altta yatan mekanizmanın bireysel seçilim olduğunu bilsek de bir bütün olarak evrimleşen canlı türlerinden bu şekilde bahsetmek ve hatta belli türlerin "mutasyona uğramasıyla" ekolojik ağ örgüsündeki bir boğumda diğer türleri de etkileyecek biçimde dalgalar halinde yayılan bir değişiklikten söz etmek makul görünmektedir. Alt tarafı, herhangi bir anda on bir oyuncudan, tüm sezon boyuncaysa bundan çok daha fazlasından oluşuyor ve teknik direktör ile saha dışındaki ekibin yeteneklerine de dayanıyor olsa bile tek bir vücutmuşçasına kupa kazanmak için tek rekabet eden bir futbol takımından bahsediyoruz.

Evrimsel değişimleri, bireyler düzeyinde seçilime odaklanmak yerine tüm türün "mutasyona uğrayışı" bağlamında tanımlamanın daha makul olduğunu söyleyebiliriz. Bunu göstermek için, evrimsel değişikliklerin canlı türünün üyelerini tek tek etkileyişine dair çok basit bir örneğe göz atalım. Bu değişimler bir insanın yaşamı süresince fark edilemeyecek kadar küçüktür; ama jeolojik anlamda birdenbire bile denilebilecek şekilde bir tür başka bir türün yerini alır. Bu da değişimlerin, ani ve çarpıcı biçimde fosil kalıntılarında kendini

[10] *bkz.* John Gribbin ve Jeremy Cherfas, *The Mating Game* (Penguin,2001).

göstermesine yol açar. Meşhur örneğimize, yavaşça fil benzeri bir şeye evrimleşen varsayımsal bir fareyle başlayabiliriz. Bir bebek farenin, ebeveynlerinden $\frac{1}{20.000}$ oranda daha büyük hale geldiğini ve takip eden her nesilde aynı artışın devam ettiğini düşünün. Bu şartlar altında günümüz filleri boyutundaki bir süper-farenin "evrilmesi" 20.000 nesil alacaktır. Fareler çok hızlı, fillerse çok yavaş ürer. Bu yüzden varsayımsal örneğimizin amacına uygun olarak, her neslin olgunluğa erişmesinin –fare ve fillerin ortalamasına karşılık gelecek biçimde– beş yıl sürdüğünü varsayalım. O zaman bir fareden süper-fareye doğru bir değişim 100.000 yıl sürecektir. Fosillerin zaman çizelgesinden bakarsak bu süreç çok anidir. Farklı tarihlere dayanan ve aralarında 100.000 yıl bulunan fosiller bulmak neredeyse imkânsızdır. Ayrıca bir canlı türünde bu tip bir evrimsel değişim gerçekleşiyor olsaydı fosil kalıntılarında göreceğimiz şey; bir tabaka katmanında fare boyutundaki kalıntılar ve sonraki tabaka katmanında fil boyutundaki kalıntılar olurdu. Bu iki katmanın arasında da başka bir şeye rastlanmazdı.

Gerçek yaşamda böyle çarpıcı bir değişim soyutlanmış biçimde meydana gelmezdi. Diğer canlı türleri de süper-farenin evrilişinden etkilenirdi (elbette böyle bir değişimin herhangi bir şekilde mümkün olduğunu varsayarsak) ve biz de fosil kalıntılarında "ani" olarak meydana gelen, takım halinde değişiklikler görürdük. Yine de tüm bunlar, Darwinci evrim yasalarına uygun şekilde, bir nesilden sonrakine yavaşça gerçekleşen değişimlerin sonucu olurdu.

Bunu vurgulamamız önemli; çünkü uzmanlar arasında, evrimsel biyologların "kesintili denge" [sıçramalı evrim] adını verdiği bir kavram etrafında dönen hararetli bir tartışma vardır. Kesintili denge, fosil kalıntılarında az miktarda veya tamamen sıfır evrimsel değişimin olduğu uzun aralıkların, bazı canlı türlerinin nesillerinin tamamen yok olduğu bazılarınınsa yeni biçimlere evrildiği kısa (bazen çok ani görünen) ve heyecan verici değişikliklerle "kesinti"ye uğradığı bir örüntüdür. (Uzun süren az/sıfır değişim aralıklarında istisnaî olarak, canlı türlerinin, ekolojik nişlerine Kızıl Kraliçe etkisi vasıtasıyla hiç olmadığı kadar uyum sağlaması mümkündür.) Bazen

–olaya çok daha hâkim olması gerekenlerce bile– Darwinci evrim fikirleriyle bu sürecin çeliştiği öne sürülür ve bu çelişkinin altını çizmek için de süreç "adım adım değişim" olarak adlandırılır. Oysa ortada bir çelişki yoktur. Görünürde çok ani değişikliklerin yaşandığı aralıklar süresince dahi, bireysel düzeyde olup biten şey yine Darwinci evrim, doğal seçilim ve en uyumlunun hayatta kalması vasıtasıyla evrimdir. Sadece canlı türlerini uyumlu hale getiren yasalar artık farklıdır ve değişim bir nesilden sonrakine yalnızca yavaşça gerçekleşir. (Şöyle ki, fare bir fil doğurmaz ya da tersi biçimde fil bir fare doğurmaz.) Doğrusu, Darwin'in üzerinde çalıştığı ve onu evrimin işleyişine dair aydınlatan Galápagos ispinozlarına olan şey de bir kesintili denge örneğidir. Adaya varan ispinozlar, geldikleri kara parçasına uygun yaşam tarzına harikulade uyumluydular. Galápagos'taki mevcut ekolojik nişlerine uyum sağlamak için de çabucak (jeolojik standartlara göre çabucak, ama aslında bir nesilden sonrakine ufak değişimlerle) evrimleştiler. Bir kere bu yeni yaşama adapte olduktan sonraysa, artık onları çevreleyen koşullara gayet iyi uyum sağlamış olduklarından, sadece ufak değişimler göstermeye başladılar. Darwin'in kendisi de, gayet kesintili denge fikriyle haşır neşir olabilir ve fikirlerinin bu yeni dengeyle de çelişmediğini düşünebilirdi.[11]

Konuyu, kum yığını benzetmesiyle daha da netleştirebiliriz. Kum yığını, kendi kendini düzenleyen kritik haldeyken, uzun ve görece hareketsiz aralıkların arasına serpiştirilmiş ani kaymalar yaşanır. Yine de kum taneciklerinin hepsi, her zaman aynı fizik yasalarına (Newton'un hareket yasaları, sürtünme, kütleçekim vs) tâbidir. Bahsettiğimiz iki durum arasında zaman ölçeği dışında temel bir fark yoktur. Yığının üzerine her saniye kum tanecikleri bırakılıyor, ama siz yığına sadece yarım saatte bir bakıyorsanız, yığın her bakışınızda farklı olacak ve sürekli değişen bir haldeymiş gibi görünecektir. Yığına her mikrosaniyede bir baktığınızdaysa, her bakışınızda kum yığınını bir önceki bakışınızla neredeyse aynı pozisyonda görece-

[11] Daha yakın geçmişe gidecek olursak, Galápagos'ta 1977 yılında meydana gelen kuraklığa ilişkin olayları da bir kesintili denge örneği olarak değerlendirebilirsiniz.

ğinizden yığının ancak adım adım değiştiğini düşünürsünüz. Bir ekolojik ağ örgüsündeki durum yüz milyon yıl boyunca hemen hemen aynı kalıyorsa, o zaman değişimler bir milyon yıl civarı bir sürede meydana geliyordur ve değişikliklere maruz kalan canlı türleri etraflarındaki heyecan verici değişimlerden haberdar olmasa da bu kesintili bir dengedir. Değişim aralıkları yüz milyon yıl, sakin dönem bir milyon yıl kadar sürüyorsa da o zaman pekâlâ "kesintili kaos" olduğunu söyleyebiliriz; ama yine seyrek bağlarla örülü bir ağ örgüsü için geçerli olan evrimsel yasalar bu durum için de geçerlidir. Şunu söyleyebiliriz ki, seyrek bağlarla örülü ağ örgüleri doğal olarak, denge aralıklarının değişim aralıkları tarafından kesintiye uğradığı bu çeşit bir hale evrilir. Bu tip ağ örgülerini kavrayışımızın, dünya üzerindeki yaşamın ağ örgüsünden darbe yemiş gibi gözüken, kesinti ve denge arasına mahsus teraziye dair özel bir durum olup olmadığını söylemek için henüz hiç yeterli olmadığını da es geçmemek gerekir. Yine de bu canlı ağ örgülerinin, kaosun eşiğindeki faz geçişine sürüklenmesi için gerekli olan son bileşene dair küçümsenmeyecek fikirlere sahibiz. Küçük ama gayet önemli olan bu noktayı, son bileşen fikrini Kauffman gözden kaçırdıysa da 1990'ların ortasında Per Bak ve meslektaşları ortaya koymuştur.

Etkileşim halindeki canlı türlerini içeren ağ örgülerinin evrimini bilgisayar modelleri kullanarak simüle etmeyi amaçlayan bu tip çalışmaların ilk aşamalarında araştırmacılar, "mutasyon"a uğrayacak canlı türünü rastgele seçmiş ve mutasyon sonucunda ortaya çıkan dalgalanmanın –kum yığını modelindeki kum tanecikleri çığına benzer biçimde– ağ örgüsüne yayılış biçimini gözlemişlerdi. Bu da görünüşte kum yığınına çok benzeyen ama kaosun eşiğine evrilmeyen simülasyonları beraberinde getirmişti. Danimarka'daki Niels Bohr Enstitüsünden Kim Sneppen'ın, Bak'ı 1993'te Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Brookhaven'da ziyaret edişiyse tam bir dönüm noktası oldu. Sneppen, yüzeyler arasındaki etkileşimlerle ilgileniyordu. Bak'ın bu konuda kullandığı örnek de bir kâğıt mendil üzerine dökülen kahvenin –mendilin ıslak ve kuru kısımları arasındaki sınır arayüz olmak üzere– yayılışıydı; ama

Sneppen'ın hesaplamaları, fiziğin geniş yelpazesindeki olgular için de geçerliydi. Sneppen, sınırdaki (veya arayüzdeki) değişikliklerin, uygun bir parametrenin en büyük ya da en küçük değerinde, "ekstrem dinamik" adı verilen durumda meydana geldiğini buldu. Neredeyse herkesin iyi kötü bir fikir sahibi olabileceği, bahsettiğimiz dökülen kahve örneğinde sıvı, daha kolay akma olanağına sahip olduğu ve en geniş gözeneklerin bulunduğu bölgelerde daha rahat yayılıyordu. Bak ve Sneppen, mutasyona uğrayacak canlı türlerinin rastgele seçilmesi yoluyla simülasyonda ekolojik ağ örgülerinin faz geçişine doğru evrilmemesiyle ilgili fikir alışverişlerinde bulundu. İkili bu fikir alışverişlerinin sonucunda şunu fark etti: Bu simülasyonlarda da bir çeşit ekstremum dinamik uygulamak daha uygun düşebilirdi. En nihayetinde, kum yığını örneğinde bile çığ olayları, rastgele konumlarda değil kumun eğiminin en dik olduğu noktada meydana geliyordu. Depremler de –sonuçta şiddetleri, kum yığınındaki çığın şiddeti gibi, başka faktörler tarafından belirleniyor olsa da– birikmiş olan gerilimin belli bir kritik eşiği aştığı noktada oluşmaya başlıyordu.

Kauffman ve Bak gibilerin üzerinde çalışmakta olduğu, ekolojik ağ örgülerindeki olağandışı durumlar, çevrelerine en iyi uyum sağlayan canlı türleri ve en az uyum sağlayanlardı. Peki ya Bak'ın ekibi, simülasyonları baştan yürütse, ama simülasyonun her aşamasında değişikliğe uğrayacak türleri, sadece en az uyum sağlayan türlerden seçse karşılarına ne çıkacaktı? Sonuç, Darwinci evrimin başka bir deyişle en az uyum sağlayanın yok olması olurdu; ama tür mutlaka yok olmak zorunda değildir; sadece değişim olması da mümkündü. Herhangi gerçek bir ekolojide en az uyum sağlamış türler, bu düşük uyumlarıyla öylece oturup beklemezler. Bu türler ya tamamen yok olacak ya da tıpkı Darwin'in ispinozları gibi, çevrelerindeki ortama daha uyumlu hale evrileceklerdir. En uyumlu türlerse –Kızıl Kraliçe etkisi yoluyla değişim haricinde– çevrelendikleri ortama bir şey olmazsa çok az değişeceklerdir. (Çevrelendikleri ortamın başına gelebileceklere bir örnek olarak, sinekler tamamen yok olursa mükemmel adapte olmuş kurbağaların gireceği büyük sıkıntı gösterilebilir.) En az uyum sağlamış

olan türler, nesillerinin tükenmesine yol açacak bir değişiklik haricinde tüm değişikliklerden neredeyse kesin olarak olumlu etkilenip evrimsel sahanın bayırlarından yükseklere çıkacaktır. Böyle bir canlı türü alçak bir tepeden başlayarak yola koyuluyorsa, bu ilk tepeden ayrılarak bir vadiyi aşmak ve yakınlardaki daha yüksek bir tepeye çıkmak da onun açısından görece kolay olacaktır. Tüm bunlar Sneppen ve Bak'a mantıklı geliyordu ve bilgisayar simülasyonlarını yürüttüklerinde daha da mantıklı gelecekti.

İkilinin ortaya koyduğu model şaşırtıcı derecede basittir. Sadece bin "canlı türü" alınır ve her biri, 0 ile 1 arasında, Darwinci uyumluluklarını ifade edecek tek bir rastgele sayıyla temsil edilir. Yüksek bir sayı, ağ örgüsünün bütünüyle iyi bir uyum yakalamış ve uyumluluk sahasında yüksek bir zirvede oturan canlı türüne; düşük bir sayıysa, yan anlamıyla yaşam mücadelesi veren ve uyumluluk sahasındaki alçak bir zirveye güvensizce konuşlanmış bir türe karşılık gelir. Bu bağlamda "uyum"un miktarı da sahadaki zirvenin yüksekliğiyle ifade edilmiş olur. Ağ örgüsündeki boğumlar arasındaki bağlantıların seyrek olduğunu hesaba katmak içinse, her "canlı türü"nün sadece iki diğer türle etkileşim halinde olmasını sağlamak amacıyla sonuçta karşımıza çıkmış olan her sayı rastlantısal biçimde iki başka sayıyla ilişkilendirilir. (Kurbağalar sadece sinekleri yiyip, sadece balıklara yem olacakmış gibi.) Daha sonra model, popülasyonun en az uyum sağlayan üyesinin ve *iki ortağının* çıkartılarak, bunların yerine yine rastgele sayılar tahsis edilecek olan üç "yeni" canlı türünün ekleneceği biçimde programlanır. Bu yeni türlerin tam anlamıyla yeni canlı türleri olarak düşünülmesi gerekmez. Dikkat edilmesi gereken husus şudur: Ağ örgüsünün en uyumsuz üyesinin uyumluluğu rastgele değişmektedir ve bu da her iki ortağının (ekolojik ağ örgüsündeki komşuları olarak da düşünebilirsiniz) uyumluluğunu rastgele ve başladıkları düzeye bakmaksızın değiştirmektedir. İşte karşımızda lastiksi saha. Şimdi bilgisayarda iterasyonlar halinde bu basit işlemi tekrar edince neler olduğuna bakalım.

En başta, ağ örgüsünü rastgele kurmuş olduğumuzu varsayarsak, 0 ile 1 arasındaki tüm yelpazeyi kapsayacak uyum-

luluk değerleri olan boğumlarla karşılaşırız. Dolayısıyla en az uyumlu "canlı türleri" çok düşük uyumluluk değerlerine sahip olacaktır. Bu en az uyumlu türler çıkartılıp yerlerine rastgele tahsis edilmiş uyumluluk değerlerine sahip yenileri eklendiğindeyse bu yeni türlerin daha yüksek uyuma sahip olması kuvvetle muhtemeldir; çünkü 0 ile 1 arasındaki rastgele bir sayının, eski türün uyumunu temsil eden çok düşük sayıdan daha yüksek olması muhtemeldir. Sadece her iterasyonda "en az uyumlu" tür ve iki komşusu çıkartılıp rastgele sayılar tahsis edilmiş yeni türler yerlerine eklendiğinde bu bilgisayar simülasyonları, bütün boğumlar görece yüksek zirvelerle eşleşene kadar süratle tüm ağ örgüsünün genel uyumluluğunu yükseltir. Sistem, burada tanımladığımız kurallar dahilinde, belirgin biçimde tüm türlerin en az üçte ikilik uyumlulukta olduğu bir duruma yerleşir. Gerçek yaşamda buna karşılık gelen durum, her ayrı türün, uyumluluk sahasında yüksek bir zirveyi işgal ettiği kararlı bir ekolojik ağ örgüsüdür. Böyle bir durumun uzun süre devam etmesi beklenir. Peki yok oluş veya mutasyon yoluyla bu türlerden biri, diğer iki komşusunun sahasını da etkileyecek bir uyumluluk kaybı yaşarsa ne olur? Şimdiyse tek istikamet dosdoğru aşağıyadır. Görece yüksek uyumluluk değerlerine sahip bu üç canlı türünün çıkartılıp rastgele birer uyumluluk değeri tahsis edilmiş türlerin yerlerine eklenmesinin, bu küçük boğumlar kümesinin genel uyumluluğunu yükseltmesi çok muhtemel değildir. Bunun anlamı da şudur: Bu üç yeni (veya mutasyona uğramış) canlı türü ve komşuları, sonraki iterasyonlardan en çok etkilenmesi beklenen ve değişimin orijinal mevkisinden yayılan bir yok oluş (ya da en azından uyumluluk düşüşü) dalgası yaratması en muhtemel olanlardır. Hatırlayınız ki bir uyumluluk düşüşü mutlaka bir canlı türünün değişeceği anlamına gelmez; değişen şey uyumluluk sahasıdır ve bu yüzden bir duruma mükemmel adapte olmuş bir tür de kendisini bambaşka bir durumda bulur. Sistem tekrar ayarı yapana ve tüm uyumluluk değeri düzeylerinin üçte ikiden yüksek olduğu bir hali tekrar inşa edene kadar bir çeşit çığ veya deprem sistemin içinden geçer; sonrasındaysa sistem tekrar, diğer bir sakin aralığa yerleşir. Hem sakin aralıklarda

hem de nesil tükenmelerinde (yok oluşlarda) aynı yasalar geçerli olsa da, model kendiliğinden, durağan aralıkların birbirlerinden kitlesel yok oluşlarla ayrıldığı bir durum yaratır. Yine şaşırtıcı olmayan biçimde bir kuvvet yasasıyla karşı karşıyayız. Diğer bir deyişle, bu kuvvet yasasının değeri (kuvvet yasası grafiğindeki eğimin dikliği) fosil kalıntılarındaki asıl yok oluşların kuvvet yasasına tam olarak uymasa da yok oluşlar kendine-benzerdir.

Bu çalışmayı eleştirenler, modellerin gerçekçi olamayacak kadar veya gerçek ekosistemlerin ve evriliş biçimlerinin karmaşıklığına ışık tutamayacak kadar basit olduğunu öne sürüp durdular. Kauffman, Bak ve meslektaşlarının yaklaşımlarının ne kadar sade olduğunu düşündüğümüzde bu eleştiriler bize şaşırtıcı gelmeyecektir. Oysa bu tarz eleştiriler bir noktayı gözden kaçırır: Basit modeller, gerçek dünyanın güzel birer tasvirini yapar. Bu modeller kuvvet yasalarıyla tarif edilen yok oluş örüntüleri elde edememiş olsalardı kimse onları ciddiye almazdı. İyi bir model ne kadar basit olduğuyla değil, gerçek sistemlere ne kadar ışık tuttuğuyla test edilir. Örneğin atom fiziğinde atomlar, merkezî çekirdekleri etrafındaki bir "yörüngede" elektronları olan minyatür güneş sistemleriymiş gibi davranmak ilk bakışta neredeyse gülünç bir basitleştirme olarak düşünülebilir. Atomların bundan çok daha karmaşık olduğunu biliyoruz. Yine de Dane Niels Bohr tarafından 1910'larda geliştirilmiş olan bu basit model, farklı elementlerin tayflarında görülen çizgilerin dalga boyunu tamı tamına tahmin etme konusunda gayet başarılıdır. Dolayısıyla atomların "gerçekte" öyle olmadığını bilsek de bu iyi bir modeldir. Sadece yok oluşların bir kuvvet yasasına tâbi olduğunu değil, aynı zamanda bu yasadaki kuvvetin gerçek değerini de tam olarak tahmin edebilen bir model başlı başına, en az Bohr'un atom modeli kadar değerli olur ve dünyaya temel teşkil eden basitlik hakkında derin bir gerçeği de gözlerimizin önüne sermiş olurdu. Atomların davranışlarıyla ilgili daha karışık özellikler, Bohr'un modeline daha fazla detay eklenerek, ama modelin bize sağlamış olduğu kavrayış bir kenara atılmadan tanımlanır. Kauffman ve Bak'ınki gibi basit modellerin, gerçek yok oluşlarla ilgili asli

özellikleri –onların ölçekte değişmezliklerini– doğrudan doğruya yeniden ürettiği gerçeği de aynı şekilde araştırmacıların doğru yolda olduğunu gösterir. Araştırmacıların, modeli daha gerçekçi bir hale getirmek için sadece birkaç detay daha ekleyerek model ile gerçek dünya arasında daha iyi bir uyum sağlamaları gerekir. Hatta aslında modele yalnızca bir detay daha eklemek, doğru kuvvet yasasını tam olarak bulmak için yeterli olacaktır.

Bu konuda hâlâ sürmekte olan bir dolu çalışma vardır ve söylememiz gerekir ki, bugün –yirmi birinci yüzyılın ilk on yılı içinde– gerçek evrimsel ağ örgüleri hakkında bildiklerimiz, ancak yirminci yüzyılın ikinci on yılında Bohr'un gerçek atomlar hakkındaki bilgisi kadardır. Yirminci yüzyılın sonunda, 1999 yılında MIT'den Luis Amaral ve Boston Üniversitesinden Martin Meyer'ın o hayati (ve can alıcı önemdeki) detayı modele katmasıyla bu tür modellere yapılan en ilgi çekici rötuşla karşılaştık. İkili, gerçek dünyayla ilgili diğer bir derin gerçeğin basit bir gösterimini modele ekledi: "Bazı canlı türleri diğer türleri yiyordu." Amaral ve Meyer, Bak ve Sneppen'ın tasarlamış oldukları oyuna avcı hayvanları ve avları ekledi. Yine bu da, gerçek dünyanın işleyişinin basit bir versiyonuydu; ama model ve gerçeklik arasındaki uyumu sağlama konusunda çarpıcı bir ilerlemeyi temsil ediyordu.

Oyunun şimdi bahsettiğimiz versiyonunda, besin zincirinin altı katmanı vardır. Her düzeydeki ayrı canlı türlerinin, altlarında bulunan düzeylerdeki muhtelif türlerle beslenmelerine izin vardır (dahası, beslenmeleri gerekir) ve her düzeyde –Bak ve Sneppen'ın versiyonunda bulunan boğumlara denk olacak şekilde– bin adet ekolojik niş bulunur. Oyun, bu ekolojik nişlerin çoğunun boş olduğu ve zincirin en alt düzeyindeki nişlere rastgele birkaç türün tahsis edildiği biçimde başlar. Her iterasyonda geçerli olacak kuralların ilki şudur: Düşük bir olasılıkla, iterasyon adımının başlangıcında, mevcut her tür iki farklı türe ayrılarak (tıpkı Galápagos'ta ispinozların atalarının farklı türlere ayrılması gibi) ebeveynlerinin aynı, bir alt veya bir üst düzeyindeki boş bir ekolojik nişe rastgele yerleştirilecek yeni bir tür üretebilir. Ayrıca bu şekilde ortaya çıkan her

tür için, bir alt düzeyinde yer alacak ve avı olacak birkaç tür tahsis edilir. İkinci kuralsa, en alt düzeydeki birkaç türün her iterasyonda rastgele yok olmasıdır. Burada Bak ve Sneppen'ın modelinden farklı olan, bir tür yok olduğunda, o türün komşularının değil de o türden beslenen avcıların etkileniyor olmasıdır. Besin kaynaklarının daha fazlasını kaybeden avcılar, görece az kaybedenlere göre daha başarısız olur ve en uç ihtimal olarak tüm avları yok olan bir avcı ise tamamen yok olur. Bu da besin zincirinde onun üstündeki katmanda bulunan avcıları etkiler. Sadece bu basit kuralların geçerli olduğu ve rastlantısal başlangıç koşullarının bulunduğu bir örüntüye zaten aşinayız. Bu örüntüde oyun kendi kendini kaosun eşiğindeki kritik bir duruma organize eder. Bu kritik durumda, besin zincirinin en altındaki tek bir av türünün yok olması, –muhtemelen bir üst düzeydeki avcılara tamamen yem olduklarından– üstlerindeki avcı ve av katmanlarına doğru dalgalar halinde yayılan bir yok oluş dalgasını tetikleyebilir. Bu sefer sadece bu dalganın örüntüsünün ölçekte değişmez olduğu ve bir kuvvet yasasını takip ettiği gerçeğiyle karşılaşmayız. Aynı zamanda bu yasadaki kuvvetin tam değerinin, dünyadaki gerçek yok oluşlarla ilgili yasanın kuvvetiyle aynı olduğunu da görürüz. Bir ekolojik ağ örgüsünde etkileşim halindeki canlı türleri, –hiçbir dış müdahaleye gerek kalmaksızın– bir kuvvet yasasına tâbi olan kitlesel yok oluşların meydana geleceği, kendi kendini düzenleyen bir kritik hale doğru yol alırlar.

Gerçi dış müdahalelerin –klâsik bir örnek olarak, dinozorların ölümü esnasında dünyaya çarpan göktaşının– bulunduğunu biliyoruz. K-T sınırındaki yok oluşların başlıca nedeninin bu göktaşı olmadığını farz etsek bile dünya üzerindeki yaşamı bir şekilde etkilediğini kabul etmek durumundayız. Böyle ekstra bir etkinin, yok oluşlar örüntüsünü nasıl etkilediğini çözümlemek kuşkusuz ki önemlidir; ancak hesaplamalara bir başka karmaşıklık katmanı ekleyecektir. Modellemecilerin doğal olarak ilk içgüdüsü –karşılarındaki "yeni" olguyu anlamaya başlamak için– ihtiyaçları olmayan her şeyden modeli temizlemek ve olabildiğince basit yeni bir modelle yola koyulmaktır. 1990'ların ortasında Cornell Üniversitesinden Mark Newman, yok oluşların *tek* nedeninin dış etkiler olduğu ve

lastiksi uyumluluk sahasında canlı türleri arasında meydana gelen etkileşimlerin yok oluşlar üzerindeki etkisinin göz ardı edildiği bir model araştırmaya karar verdi. Newman'ın umudu şuydu: Hem dış şokların yokluğunda, türler arasındaki etkileşimler sonucu meydana gelen hem de bu etkileşimlerin yokluğunda dış şoklar sonucu meydana gelen yok oluşları inceleyerek, hangi versiyonun gerçekliğe daha yakın olduğunu ve bu iki etkinin nasıl bir araya getirilebileceğini görebilirdik.

Newman'ın modelinin kurulumundaki temel, Bak ve Sneppen'ınkine çok benzer. Aralarındaki farklardan ilki, sadece tek bir "en az uyumlu" canlı türünün çıkartılması yerine 0 ile 1 arasında bir uyumluluk düzeyinin model tarafından seçilmesi ve bu düzeyin altındaki *tüm* türlerin tek seferde çıkartılmasıdır. (Dünyaya çarpan göktaşının, en iyi uyum sağlamış türler haricinde tüm türleri yok edişine denk biçimde.) Daha sonra, oyunun kurallarının değiştiğini (evrimsel sahanın kaydığını) hesaba katmak için orijinal ekolojik ağ örgüsündeki en uyumlu birkaç tür çıkartılır ve yerlerine rastgele seçilmiş bu uyumluluğa sahip başka türler geçer. Bunun dengiyse, o nişlerdeki orijinal canlı türlerinin uyumluluklarını başkalaştırmaktır. Bilgisayar modelinin her yürütülüşü için özel olarak kuralların belirlenmesine yönelik son bir seçenek olarak, araştırmacılar görmek istedikleri dış şok çeşidini önceden seçebilirler. Araştırmacıların seçebileceği kombinasyonlar sınırsızdı: Sadece en az uyumlu türleri simülasyondan çıkartan küçük şokların, görece yüksek oranda bulunması ve neredeyse ağ örgüsündeki her şeyi yok eden büyük şoklarınsa birkaç adet olması; bunun tam tersi veya büyük ve küçük dış şokların herhangi birer istatistiksel oranda bulunması mümkündür. Yine de model her iterasyonda, önceden belirlenmiş istatistiksel kurallara uygun biçimde rastlantısal olarak bir sonraki şokun büyüklüğünü seçer. Karşımıza çıkan şaşırtıcı ve çarpıcı sonuç şudur: Birkaç istisnai durum dışında oyun; yok oluşların örüntüsünün, asıl fosil kalıntılarındaki yok oluş örüntüsünde gördüğümüze benzer bir kuvvet yasasına uyduğu kritik bir hale yerleşir.[12]

[12] Matematikçi arkadaşlarımız bu halin, onların terimi katı tarif ediş biçimlerindeki "kritik hal" olmadığına işaret etmemiz konusunda ısrarcılar. Yine de, onların tanımı bizim kritik halimize çok yakındır ve bu anlaşmazlık vurgulamak istediğimiz noktayı etkilemez.

Bunu şu şekilde de düşünebiliriz: Tıpkı deprem bölgelerinde, açığa çıkana kadar gerginliğin birikmesi gibi (önceden bu "açığa çıkış"ın hangi büyüklükte olacağını söyleyemeseniz de) "Darwinci adım adım evrim" de, tüm ağ örgüsü (ya da bir kısmı) bir darbe alıp çökene kadar, Kızıl Kraliçe etkisi vasıtasıyla ekolojik ağ örgüsünde bir gerginlik biriktiriyormuş gibidir. Tıpkı San Francisco'yu vuracak yeni depremin büyük mü küçük mü olacağını tahmin etmemizin mümkün olmadığı gibi, ekolojik ağ örgüsünü silip süpürecek olan sıradaki dalganın büyük mü yoksa küçük mü olacağını öngörmenin de bir yolu yoktur. Canlı ve cansız sistemler aynı boyunduruk altındadır.

Model yine çok basittir. Biz de, bu model, dışarıdan kaynaklı bir afet vurduğunda gerçek bir ekolojik ağ örgüsüne ne olacağını mükemmel bir biçimde tarif ediyormuş gibi davranamayız. Yine de bizlere söylediği şey şudur: Yok oluşların kuvvet yasası örüntüsü, şokların ağ örgülerini etkileyiş biçiminin çok sarsılmaz bir özelliğidir. Model öncelikle, uygulanan dış etki çeşidinin, varlıkları öldürdüğü sürece özünde bir önemi olmadığını salık verir. Sık meydana gelen küçük şoklar ve ara sıra meydana gelen büyük şoklar veya bu ikisinin herhangi bir kombinasyonu (küçük şokların ara sıra meydana geldiği kombinasyonlar da dâhil olmak üzere) aynı örüntüyü üretir. O zaman bu doğal olayların (dünyaya çarpan göktaşı, yoğun volkanik patlama, Buzul Çağı ya da her neyse) her bir kombinasyonu, her biri kendi örüntüleriyle, bir araya gelerek yok oluşların kuvvet yasasına benzer bir resmin aynısını önümüze koyacaktır. Bundan bile iyisi, bu kitapta zaten gördüğümüz gibi, ekolojik ağ örgüsündeki evrimsel değişimler de kendi başlarına –herhangi bir dış şok *olmaksızın*– aynı kuvvet yasası örüntüsünü üretir. Tüm bunlar, zamana yayılmış fosil kalıntılarında gördüğümüz esas örüntünün neden bu kadar basit olduğunu da açıklar. Farklı etkilerin hepsi aynı örüntüyü üretir! K-T sınırında yaşanan olayların başlıca nedeninin göktaşı etkisi mi, evrimsel değişim mi yoksa büyük bir volkanik aktivite mi olduğunu asla söyleyemeyiz. Tek söyleyebileceğimiz şey, bu etkilerin (ve muhtemelen başka etkilerin) bir kombinasyonunun, bu yok oluş dalgasını tetiklediğidir. Tıpkı

Agatha Christie'nin, *Şark Ekspresi'nde Cinayet* adlı eserindeki gibi: Herkes suçlu olabilir.

Her biri kendi biricik hipotezlerinin geçerliliğine kanıtlar bulmayı uman biyolog, jeolog veya astronomların perspektifinden bakarsak bu durum sinir bozucu olabilir. Öte yandan, etkileşim halindeki yaşam biçimlerinden oluşan karmaşık ağ örgülerinin nasıl evrimleştiğini anlamaya çalışan biri açısından bakarsak bütün bunlar, ilgi çekici ve hatta cesaret vericidir. Tüm bu modellerin olağanüstü basitliğine rağmen, doğanın işleyiş biçimiyle ilgili temel bir gerçekliği, özel olarak ilgilendiğimiz canlı sistemler de dahil olmak üzere herhangi bir sistemin dengeden uzaklaşması için geçerli olan bir gerçeği keşfettik. Hangi başlangıç koşullarıyla başlarsınız başlayın ve canlı sistemlere hangi şoku (dışsal, içsel veya her ikisi de) uygularsanız uygulayın, çok geniş bir ihtimaller yelpazesi içinden, kaosun eşiğindeki kritik bir duruma ulaşırsınız. Bu kritik durumda da çok küçük bir tetikleme bile –kimi zaman– sistemin bütününde çok büyük bir değişim meydana getirebilir. Yaşam gerçekten de böyledir.

Newman'ın çalışmasının da vurguladığı gibi fiziksel çevre değiştiğinde uyumluluk sahası da değişir; ama yaşamın kendisi de bizzat uyumluluk sahasını değiştirir ve tarihin herhangi belirli bir anında dünyadaki yaşamı oluşturan bileşenlerin her birinin kaderi, bu iki etkinin birbirleriyle etkileşimine bağlıdır. Permiyen döneminin sonunda meydana gelen ve tüm kitlesel yok oluşların en büyüğü olan felaket de yine buna güzel bir örnek olarak verilebilir. Gördük ki bu büyük yok oluş dalgasının bile sorumlusu küçük bir tetikleme olabilir; ama bu ancak, tetikleme esnasında canlı türlerinin çoğu aslında tek bir ekolojik ağ örgüsü içinde bulunuyor olması ihtimalinde mümkündür. Bugün böyle bir felaket Kuzey Amerika'yı vurursa (ki hatırlayınız böyle bir felaket bu bağlamda tek bir türün yok olarak bir yok oluş dalgasını tetiklemesiyle bile mümkündür), etkileri hem Kuzey hem de Güney Amerika boyunca kendini gösterebilir. Yine de bu etkinin Avustralya, Afrika veya Avrasya'daki canlı türleri için bir sorun teşkil edeceğini söylemek pek mümkün değildir. Küresel ölçekte meydana gelen kitlesel

yok oluşları açıklayabilmek için tamamen küresel ölçekteki olaylara (örneğin büyük göktaşı çarpması sonrasında meydana gelenler gibi) başvurulmasının nedenlerinden biri budur. Oysa Permiyen döneminin sonlarında gezegenimizin tüm kara kütlesi, Pangaea adı verilen bir süper-kıta içinde toplanmıştı. Bu da, dünya yüzeyindeki ve süper-kıtaya kıyısı olan tüm sığ denizlerdeki yaşamın, özünde tek bir ekolojik ağ örgüsünün parçası olmasına imkân veriyordu. Bu ağ örgüsünün bir kısmını etkileyen bir şok, o anda canlı olan her şeyi etkisi altına alacak şekilde yayılmış olabilirdi. O vakit gerçekleşen şeyin bu olduğuna dair bir kanıt yoktur ve hiçbir zaman olamaz da; ama değinmek istediğimiz şey bu değil. Şunu söylemek istiyoruz: Permiyen döneminin sonlarında, 250 milyon yıl önce, küçük bir tetikleme o an çevrede bulunan canlı türlerinin çoğunun yok olmasına neden olmuş olabilirdi; oysa bugün tek bir kıtayı etkileyen, 250 milyon yıl öncekiyle mukayese edilebilecek küçük bir tetikleme aynı şeye neden olmayabilir. Fiziksel çevre ve biyolojik çevre, ilk bakışta göründüğünden çok daha sinsice birbirlerine bağlıdır.

Peki bu bağlantı ters şekilde de işliyor olabilir miydi? Dünyanın biyolojik çevresi fiziksel çevresini etkileyebiliyor ve böylece de bu ikisi beraberce, aynı derin basitlikteki yasalar kümesine tâbi tek bir ağ örgüsünün parçasını oluşturuyor olabilir miydi? İngiliz bağımsız bilim insanı Jim Lovelock tarafından ortaya konan "Gaia hipotezi"nin özü, böylesi bir akıl yürütmeden ileri gelir. Lovelock'un, –Gaia hipotezine can veren– kavrayışının kökenleri 1965'e kadar gider ve tanımlamakta olduğumuz, karmaşa ve ortaya çıkışla ilgili çalışmaların çoğunun öncesine uzanır. Yine de şimdi Lovelock'un bu fikirlerinin dikkate alınması, gezegenimizin bütünündeki kaos, karmaşa ve ortaya çıkış üzerindeki çalışmaları genişleterek Güneş Sistemimizin ötesinde yaşamın evrilmiş olabileceği biçimlere dair ipuçları verir.

7

Ötedeki Yaşam

Buradan itibaren yaşama bakış açımız çok daha farklı olacak. Daha önce yaşamın içinden dışına doğru bakıyorduk; şimdiyse dışından içine doğru bakacağız. DNA ve aminoasitler gibi moleküllerin hücrelerin içinde nasıl etkileşim halinde olduklarını ve hücrelerin hep birlikte çalışarak bir vücudu nasıl oluşturduklarını inceleyerek yaşamın işleyişinin içyüzünü anlamak adına bir hayli yol kat edebilir ya da günlük yaşantısında gezinmekte olan bir insanoğlunu (veya bir köpeği ya da bir denizanasını) seyrederek yaşamın neyden ibaret olduğu hakkında farklı bir bakış açısı edinebilirsiniz.

Dünya üzerindeki doğanın bütününe yönelik yeni kavrayışlar sağlayan "değişen bu bakış açısının" baş göstermesine imkân verenler, tek bir adamın çalışması ve muhteşem bir resimdi. Bunların her ikisi de uzayın keşfine çıkılmasıyla bağlantılıydı. Muhteşem resim, Apollo astronotlarından birinin çektiği ve dünyayı, siyah bir çölle çevrelenmiş bir tanecik mavi-beyaz vaha haliyle uzaydaki evimiz olarak gösteren fotoğraftı. Adamsa karasal çevreye ait canlı ve cansız öğelerin, dünya üzerindeki yaşama elverişli kararlı koşulların devamlılığını sağlayan bir ağ örgüsü içerisinde etkileşim halinde olduğu fikrini ortaya atan Jim Lovelock'tu. Lovelock'un kavrayışı ter-

modinamiğin prensiplerine ve önceden bahsetmiş olduğumuz dengedeki sistemler ile dengede olmayan sistemler arasındaki farklara doğrudan dayanıyordu. Oysaki onun bu kavrayışı, daha önce de değinmiş olduğumuz, dengede olmayan termodinamiğin, kaosun eşiğindeki sistemlerin yer almış olduğu durumlara uyarlanmasına ilişkin çalışmadan –kendisinin geçmişi dolayısıyla– bağımsız olarak gelişmişti.

1919 doğumlu Lovelock, Manchester Üniversitesini 1941'de kimya diplomasıyla bitirmesini izleyen 20 yılını tıbbi araştırmalara adadı ve bu süreç içerisinde, ekipmanlarının çoğunu kendi tasarlayıp inşa eden "aktif" bir deneyci olmak adına yeteneklerini geliştirdi. Lovelock, şöhretini borçlu olduğu bağımsızlığına giden ilk adımları attığında tarih henüz 1960'ların başıydı. En nihayetindeyse icat ettiği bilimsel aletlerden kazandığı gelirle kendisine sermaye sağlayarak dilediği şeyi araştırma özgürlüğüne kavuştu. Esasında Lovelock zaten daima bağımsızca düşünen ve bir zamanların bilimsel araştırmacılarının tuhaf standartlarına dahi boyun eğmeyen bir isyankâr olmuştu.[1] Bağımsızlığına giden o ilk adımları atışı, NASA ve Jet Propulsion Laboratuvarında (JPL), aya ve Mars'a inip burada bulunan yüzey numunelerini analiz etmesi istenen uzay araçlarına ait aletlerin tasarımına danışmanlık yaptığı döneme rastgeliyordu. Programın kimyasal yönüne elinden gelen tüm katkıyı sağlamasından sonra Lovelock, donanımı tasarlayan mühendislerin tarafına yöneldi ve her iki alana da hakim biri olarak, bu mühendisler ile Mars'ta yaşam bulunduğuna dair delil aranmasına yönelik planlar yapan biyologlar arasında bir köprü kurdu. Bu kitabı okuyan çoğu kişi, bir televizyon tamircisinin iyi kötü geçim sağlayabildiği 1960'lı yıllara ait sıradan elektronik cihazların ilkelliğini muhtemelen hatırlamıyordur. O tür bir aygıtın uzaya fırlatılması, Mars'a indirilmesi, orada çalışması ve dünyaya faydalı bilgileri sadece 100 wattlık (sıradan bir ampul gücündeki) bir verici kullanarak göndermesi düşüncesi insanlara inanılmaz gelmişti.

[1] Lovelock'un enfes otobiyografisi *Homage to Gaia*, onun geçmişini kimi zaman hüzün verici olsa da kitap boyunca elden hiç bırakılmayan bir dürüstlükle anlatır.

Lovelock'un deyişiyle, televizyon Romalılar çağı mühendisliğine göre ne kadar ileri bir teknoloji ürünüyse, bu verici için ihtiyaç duyulan mühendislik de o dönemde evde kullanılan bir televizyon setine göre o kadar ileri bir teknolojiydi. Beklentinin aksine gerçekten de başarılı olundu; ama bu cılız vericinin gönderebileceği bilgi miktarı son derece kısıtlıydı ve –araç başarıyla Mars'ın yüzeyine indiği takdirde– neyin ölçüleceğine karar verecek şeyin bu bilgi miktarı olması bunu fazlasıyla öncelikli bir husus haline getiriyordu.

Lovelock'un hatırladığı kadarıyla, onu Gaia kavramına götüren mühim kavrayış Eylül 1965'te kendisini göstermişti. O sırada İngiltere'de yaşıyor olmasına rağmen danışmanlık yaptığı JPL'yi düzenli olarak ziyaret ediyordu.[2] Ziyaretlerinden birinde, 1964 yılında, Mars üzerinde yaşama dair izler aranması için uzay aracında yer verilecek deneyler üzerine tartışmak amacıyla bir araya gelen ekibin toplantısına katıldı. Tartışılan fikirlerin hepsinin dillere destan "bildiğimiz yaşam"ı bulma varsayımına dayandığını fark eden Lovelock şaşkına döndü. Lovelock'a göre deneyler, Los Angeles yakınlarındaki JPL üssünün hemen doğusunda kalan Mojave Çölünde yaşam bulmakta başarılı olabilirdi. Mars'taki yaşamın, dünyanın en şiddetli koşulları altındaki yaşamdan bile tamamen farklı olabileceği ihtimalini kimse göz önünde bulunduruyormuş gibi durmuyordu. Gerekli olanın, yaşamın kendine has türlerinden ziyade genel özelliklerini arayacak bir deney tasarlamak olduğunu ileri süren Lovelock'tan nasıl bir deneyin bunu yapabileceğini açıklaması istendiğinde kendisinin verdiği cevap, entropi düşüşü arayan bir deneyin tasarlanması gerekliliğiydi. Bu kitapta daha önce görmüş olduğumuz ve Lovelock'un da takdir ettiği gibi canlı sistemler, kendilerine özgü bir biçimde sistemlere

[2] Lovelock İngiltere'nin kırsal alanındaki evinde bağımsız olarak çalışan bir araştırmacı olmasına rağmen 1970'lerde Reading Üniversitesinde onursal profesör unvanıyla misafir olarak görev yaptı. Bu karşılıksız hizmet ona kendi deyişiyle "itibar sağlayan bir maske" sağlamış ve bu sayede, şahsi adreslerden gönderilen mektuplardan şüphe duyan editörlerin çalıştığı dergilerde makalelerini yayımlatması kolaylaşmıştı. Hatta, fikir alışverişinde bulunabileceği diğer araştırmacılar ve öğrencilerle olan irtibatını da buna borçluydu.

yerel düzen getirir ve böylelikle de faydalanabilecekleri dış kaynaklı bir enerji olduğu sürece entropinin "ters yönde çalışmasına" sebebiyet verir. Uzay keşfinin ilk dönemlerindeki "başarabilme" ruhunu son derece iyi yansıtan biçimde Lovelock'a, entropi düşüşünü ölçecek bir deneye yönelik uygulanabilir bir fikir bulabilmesi için birkaç gün verildi. Aslında ima edilen, lafla peynir gemisinin yürümediğiydi. Problem üzerinde yoğunlaştığında, Lovelock çözüme giden yolda hiçbir engel olmadığını fark etti. Mars'ta entropi düşüşünden sorumlu olan iş başındaki süreçleri aramanın en iyi yolu, gezegenin atmosferinin kimyasal kompozisyonunu ölçmek olurdu. Şayet Mars'ta yaşam yoksa atmosferindeki gazlar, karbondioksit gibi kararlı bileşiklerin egemen olduğu termodinamik ve kimyasal bir denge halinde olacaktı. Aksine Mars'ta yaşam varsa, yaşam süreçlerinden kaynaklanan atık maddeler Mars'ın atmosferine boşaltılıyor ve bu da atmosferin entropisini düşürecek olan metan ve oksijen gibi reaktif gazların ortaya çıkmasına yol açıyor demekti.

Lovelock'un, bir kısmını *Nature* dergisindeki bir makalede ayrıntılarıyla açıkladığı başka ihtimaller de mevcuttu ve bu ihtimallere, Mars'ın atmosferindeki seslerin dinlenip analiz edilmesi de dahildi. Canlıların çıkardığı sesler görmüş olduğumuz gibi, rastlantısal dalgalanmaların beyaz gürültüsünün tam aksine bilgi (negatif entropi) içerir ve $\frac{1}{f}$ "gürültüsü" olarak tanımlanır. Mevcut ses örüntülerinin (ister kuş ötüşünün, ister cırcırböceği cırıltısının, isterse Mozart'ın Mars'taki karşılığı olsun) basit birer analizi yaşamın varlığını açığa kavuşturacaktı. Bu ve bunun gibi fikirler –çoğu biyologu etkilemese de– JPL'deki planlamacıların merakını uyandırdı. NASA planlamacıları da bir o kadar etkilenmişti. Bunların üzerine, tasarlanacak bir Mars görevinde kullanılmak üzere bu tür fiziksel yaşam keşfi deneylerini geliştirmekten sorumlu Başyardımcı Bilim İnsanı pozisyonuna terfi etmesi Lovelock'u hayrete düşürdü. Bu terfi gerçek olamayacak kadar güzeldi. Ne var ki tasarlanan görev için ihtiyaç duyulan kaynağa ABD Kongresi Eylül 1965'te onay vermeyince, bir kısmı Lovelock'un tasarımlarına dayanan biyolojik deneylerden oluşan standart bir

paketin yer verildiği, çok da iddialı olmayan Viking projesiyle araçlar 1975 yılında Mars'a indirildi. (Biyologlar Lovelock'un biyoloji anlayışına güvenmemelerine rağmen onun teknik uzmanlığından faydalanmaya niyetliydi.) Bunca emeğin, sonu kaçınılmaz olan bir projeye harcanmasına şahit olmanın nasıl bir his olduğu sorusunu Lovelock, "Sahra Çölünde yaşam belirtileri arayacak bir robot tasarlayıp eline bir balık oltası vermek gibi" diye cevaplıyordu. Balıkların var olduğunu ve canlı sistemlerin birer örneği olduklarını biliyoruz. Dolayısıyla Sahra'da bulunacak bir balık, çölde yaşam olduğuna dair bir kanıt oluşturacaktır. Gelgelelim Viking aracındaki biyolojik deneylerden alınan olumsuz sonuçlar, aslında Mars'ta yaşamın varlığına dair neredeyse hiçbir şey ortaya koymadı. Ortaya koyulan şey, Mojave Çölündeki yaşam çeşidinin Mars'ta bulunmadığıydı; tıpkı Sahra Çölüne yapılan balık tutma yolculuğunun hüsranla sonuçlanmasıyla orada yaşam bulunmadığının değil, sadece balık bulunmadığının ispatlanacağı gibi. Mars'ta yaşam olmadığına dair bugüne dek toplanan en sağlam deliller uzay araştırma araçları vasıtasıyla değil, Mars atmosferinin kompozisyonunun spektroskopik incelemeleri vasıtasıyla sağlanmıştır. Bu spektroskopik incelemeler Viking uzay aracının, harika tasarlanmış olsa da işe yaramaz olan "balık oltaları"nı Mars'ın yüzeyine indirmesinden on yıl evvel, ilk olarak Eylül 1965'te de tesadüf eseri rapor edilmişti.

Aynı ay içerisinde, Fransız Pic du Midi Gözlemevindeki astronomların, Mars'tan gelen tayfın kızılaltı kısmındaki ışığın analizinden, Mars'ın atmosferi hakkında detaylı spektroskopik bilgi edinmiş olduğu haberi JPL'ye ulaştığı anda Lovelock da oradaydı. Spektroskopi, bir cisimden gelen ışığın prizma veya başka bir alet aracılığıyla gökkuşağı tayfına ayrıştırılıp incelenen cismin içerisindeki atom veya moleküllerin meydana getirdiği tayftaki çizgilere bakılarak yapılan analiz işlemidir. Bu çizgiler bir barkottaki çizgilerin örüntüsünü andırır ve aynı barkotlar gibi kendine özgüdür; belirli bir örüntü demirin varlığını net bir şekilde açığa vururken, diğerleri (mevcut konuyla alakalı olarak) oksijen, metan veya karbondioksite özgüdür. Fransızların incelemeleri ilk olarak, Mars atmosferi-

nin neredeyse tamamen karbondioksitten oluştuğunu ve diğer mevcut gazlardan yalnızca eser miktarda bulunduğuna işaret etti. Bu, yüksek entropi halindeki kararlı ve reaktif olmayan, başka bir deyişle termodinamik dengede olan bir atmosferdi ki termodinamik dengede ilginç hiçbir şeyin gerçekleşmediğini hatırlarsınız. Lovelock'un Mars'a entropi ölçecek bir deney götürme ümitlerinin suya düştüğü tam o ayda, bu yere bağlı gözlemler deneye gerek kalmadığına işaret etmişti. İlgili ölçümler kendi adına yapılmış ve Mars'ın bugün ölü bir gezegen olduğu açıkça gösterilmişti. (Yine de bu ölçümler, milyonlarca ya da milyarlarca yıl önce Mars'taki koşulların nasıl olabileceğiyle ilgili elbette bir şey söyleyemezdi.)

Fransa'dan gelen bu haber Lovelock'u, karbondioksitin egemen olduğu Mars atmosferi ile nitrojenin hakim olduğu, diğer yandan en az reaktif gazlardan biri olan oksijenin yüzde 21 oranında yer aldığı ve eser miktarda reaktif olmayan karbondioksitin bulunduğu yeryüzü atmosferi arasındaki zıtlık hakkında düşünmeye itti. Atmosferdeki nitrojen, sürekli olarak atmosferdeki oksijenle tepkimelere giriyor (bir çeşit yavaş yanma); bu tepkimeler sonucunda nitrik asit meydana geliyordu. Nitrik asitse, denizde çözünerek havaya nitrojeni geri döndürmek üzere bakteriler tarafından (güneş enerjisi kullanılarak) parçalanan kararlı nitratları meydana getiriyordu. Tüm bunlar Lovelock'un bilgisi dahilindeydi. Dünya atmosferinin yüz milyonlarca yıl boyunca kararlı gözüken bu halde kalması için gerekli olan şeyin ne olduğu Lovelock'a aniden bir vahiy gibi indi: "Atmosferin sabit kompozisyonunda kalması için işleyişinin bir şey tarafından regüle ediliyor olması gereklidir. Kaldı ki gazların çoğu canlılardan kaynaklanıyorsa, bu regüle etme görevini yüzeydeki yaşam üstleniyor demektir."[3] Lovelock, bunu daha da derinlemesine irdelemek için hiç vakit kaybetmeden o zamanki arkadaşları olan NASA'daki meslektaşı Dian Hitchcock ve JPL'nin bir diğer ziyaretçisi astronom Carl Sagan'a bu kavrayışından bahsetti. Kendi kendini regüle eden bir sistem halindeki dünya, diğer bir deyişle Gaia fikrinin tohumu bu şekilde atılmış oldu. (Bu isim Lovelock'un İngilte-

[3] *bkz.* Lovelock, *Homage to Gaia.*

re'deki komşusu, yazar William Golding tarafından şans eseri önerilmişti.)

Konuya birazcık farklı bir açıdan bakmak isterseniz, yaşam faaliyetleri vasıtasıyla sürekli yenilenmemesi halinde dünya atmosferindeki yüksek ölçüde reaktif olan tüm oksijene ne olacağı sorusunu sorabilirsiniz. Gezegenden tüm yaşamı çekip aldığınız takdirde, kısa bir süre içerisinde oksijenin tamamı; nitratlar, karbondioksit, su, demir oksit, silikat kayaları gibi kararlı kimyasal bileşiklerin içerisine hapsolacaktır. Daha açıklayıcı bir tabirle, yaşamın müdahalesi olmasaydı atmosferdeki oksijenin tamamı on milyon yıldan kısa bir sürede alıkoyulacaktı. Bu, gezegenimizin kararlı gözüken fiziksel çevresinin yaşamın varlığına (ya da yokluğuna) ne kadar duyarlı olduğunun bir ölçüsüdür. Bir insanın zaman ölçeğindeyse bu durum o kadar da endişe verici değildir. (Amazon yağmur ormanlarının yok olması halinde, ertesi gün hepimizin nefessiz kalıp boğulacağını söyleyen meşhur efsane gerçeğin çok uzağındadır.) Gelgelelim on milyon yıl dünyanın ömrünün sadece yüzde 0,2'sine karşılık gelir. Şayet dünya gibi bir gezegeni gözlemleyen bir astronom olsaydınız ve bu gezegenin oksijen yönünden zengin bir atmosferi olduğunun farkına varsaydınız, bunun ya gezegen üzerindeki ender karşılaşılan, kısa süreli bir olay olduğunu ya da o atmosferin dengeden uzak bir halde tutuluyor olduğunu söylerdiniz.

Yaşamın, bugün dünyanın yüzeyinin fiziksel doğasını (en azından, okyanusun dibinden troposferin bizim yaklaşık 15 kilometre üzerimizdeki tepesine kadar uzanan ince tabakayı temsil eden "yaşam alanı"nda) belirleyen kendini regüle eden bir sistemin parçası olduğu fikri en başta biyologların sert tepkisiyle karşılaştı. Hâlâ da bu fikre karşı çıkanlar vardır ve bu kişilerin çoğu; (hata ederek) fikri mistik ve yarı-dini imalarda bulunması nedeniyle desteklemezler. Sahiden de Lovelock ve meslektaşlarının söylediklerinin yanlış anlaşılmasına dayanan mistik ve yarı-dini bir Gaia hareketi vardır. (Bu Lovelock'u, hemen hemen Tolkien Topluluğunun J.R.R. Tolkien'i ettiği kadar rahatsız eder.) Dahası, konunun neyden ibaret olduğunu tamamen yanlış anlayanlar da vardır. *Britannica Ansiklopedisi*'nin

CD versiyonunun elimdeki kopyasında ansiklopedinin şöhretine yakışmayan şu ifade yer alır: "Gaia hipotezi oldukça tartışmalıdır; çünkü türlerin bireylerinin (örneğin antik anaerobik bakterilerin) tüm canlılar uğruna kendilerini feda edebileceklerini ima eder." Kesinlikle etmez! Bu cümle, Darwin teorisinin, tavşanların tilkiler için kendilerini feda ettiklerini ima etmesi nedeniyle tartışmalı olduğunu söylemek kadar anlamsızdır. Dolayısıyla belki biz de Lovelock'un; Gaia'nın Tanrı olduğunu, Toprak Ananın bizi kolladığını veya bir türün diğer tüm türler uğruna fedakârlıklar yaptığını *söylemediğini* uzun uzadıya anlatmalıyız. Lovelock sadece, dünyada yaşamın müdahil olduğu tüm süreçleri açıklamanın bir yolunu buldu. Bu süreçler geleneksel olarak cansız fiziksel süreçler olduğu düşünülen birçok süreci de içeriyor ve karmaşık bir etkileşimler ağ örgüsünün, kendi kendini regüle eden (veya kendi kendini düzenleyen) bir sistemin parçasını oluşturuyordu. Bu sistemse; ilginç ancak dengenin çok uzun zaman aralıkları boyunca herhangi bir insan standardı tarafından sağlanabildiği, diğer yandansa (biyolojik evrimin kesintili dengesi gibi) dengeden uzakta ani dalgalanmaların meydana gelebildiği kritik bir hale evrilmişti. Bir de önceki bölümde kullandığımız dille açıklayalım: Lovelock'un kastettiği, dünyadaki yaşamın davranışının fiziksel sahayla (buradaki "fiziksel", atmosferin kompozisyonu gibi şeyleri içerir) beraber biyolojik sahayı başkalaştırdığı ve bu her iki değişimin de uyumluluk sahasını etkileşimlerin önemli bir öğesi olan geri-bildirimle etkilediğidir. Genel olarak bu kitapta ele alınan fikirler bağlamında, Gaia kavramı daha önce değindiklerimizden geliştirilmiş, mantıklı ve anlaşılır bir kavramdır. Lovelock'un önsezi gücünün bir göstergesi olan şaşırtıcı şeyse, burada ele aldığımız fikirlerin çoğunun saygın bilim mertebesine erişmesinden bile önce kendisinin Gaia kavramını geliştirmeye başlamış olduğudur. Dolayısıyla her şeyin nasıl da yerli yerine oturduğunu, edinmiş olduğumuz birikimimizle ancak şimdi anlayabiliyoruz ve –Henry Huxley'in, doğal seçilim yoluyla evrim teorisini Darwin'den ilk öğrendiğinde yapmış olduğu yorum gibi– "Bunu kendim düşünemeyecek kadar büyük bir aptal mıyım?" diye aklımızdan geçiriyoruz.

Gaia'nın nasıl saygın bilim mertebesine eriştiği hikâyesinin ayrıntısına girmeye gerek yok; ama edinmiş olduğumuz bu birikimimiz sayesinde Gaia'nın iş başında görüldüğü iki örneğe değinebiliriz. Bunlardan birincisi teorik bir model, diğeriyse canlı bir gezegenin biyolojik ve fiziksel bileşenlerinin birbiriyle olan etkileşiminden kendi-kendini regüle etmenin hangi yollarla doğduğunu su yüzüne çıkaran, gerçek dünyadan alınmış bir örnektir. Model Daisyworld[4] adını taşır ve Sagan'ın Lovelock'a JPL'deki vahiy anından hemen sonra sunduğu yap-bozu hem çözmesi hem de doğrudan temel alması sebebiyle bilhassa yerinde bir örnektir. Aynı zamanda kitabımızın ana teması olan ortaya çıkış fikri (bütünün kendisinin, parçalarının toplamından büyük oluşu) için de bu model düzgün bir örnek teşkil eder. Lovelock'a göre bu, onun "en çok övündüğü keşfi"dir.

Daisyworld'un çözdüğü yap-boz paradoks değil, gerçekten de daima sadece bir yap-boz olarak kalmasına karşın astronomlarca "soluk genç güneş paradoksu" olarak bilinir ve Lovelock sayesinde artık bir yap-boz olarak anılmaz. Yap-boz, güneşin gençken bugünküne oranla çok daha az ısı yaydığını astronomların büyük bir özgüvenle söyleyebiliyor olmaları gerçeğinden kaynaklanır. Dünyamızda geçekleştirilen deneylerden edinilen nükleer etkileşimlere ilişkin bilgiler ile yıldızların içerisindeki koşulların bilgisayar simülasyonlarının birleştirilip bunların hesaplamalarının sonuçlarının, farklı yaş ve boyutlardaki yıldızların enerji çıktıları ile kompozisyonları hakkındaki spektroskopi vasıtasıyla elde edilen bilgilerin karşılaştırılması sonucunda astronomlar bu bilgiye ulaşır. Bu, yirminci yüzyıl fiziğinin en muhteşem (ve büyük ölçüde değeri anlaşılmayan) başarılarından biri olsa da bunu burada ayrıntılı biçimde incelemeye yetecek yerimiz yok. Astronomların yıldızların işleyişi hakkında bilgi sahibi olduğu gerçeğini şimdilik kabul etmeniz gerekecek.[5] Konumuza ilişkin noktaya

---

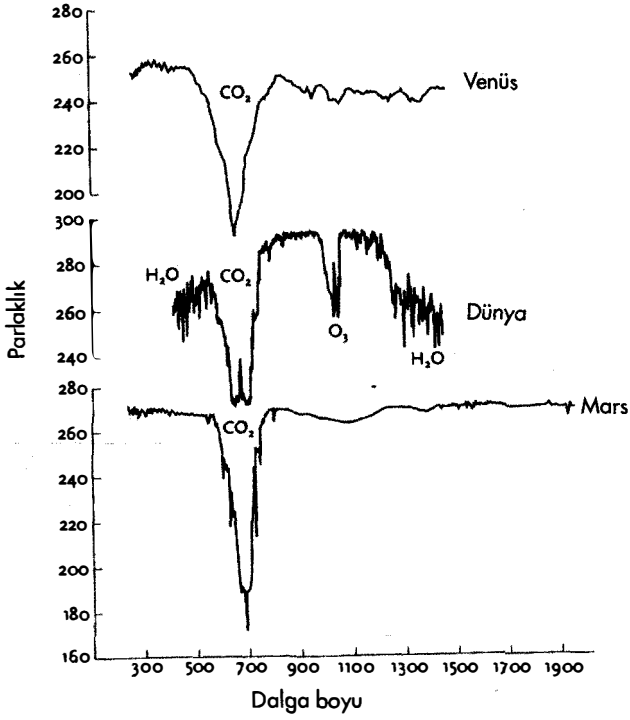
[4] Daisyworld sözcüğü, İngilizce'de papatya anlamına gelen "*daisy*" ve dünya anlamına gelen "*world*" sözcüklerinin bir araya getirilmesiyle türetilmiştir –çn.

[5] Bu hikâyenin tamamını *Stardust* isimli kitabımda görebilirsiniz.

gelelim: Güneşin gençken, bugün olduğundan yüzde 25 ile 30 arasında bir oranda daha serin olduğunu güvenle söyleyebiliriz. Açıklamayı tersten yapmak gerekirse: Güneş kararlı bir yıldız haline yerleştiğinden bu yana, enerji çıktısı yüzde 33 ile 43 arasında bir artış göstermiştir. Yaklaşık 4,5 milyar yıl önce Güneş Sisteminin hemen hemen günümüzdeki yapılanışına yerleşmiş olduğu ve dünyanın yüzeyindeki var olan en yaşlı kayalarda bulunan fosil kalıntıları sayesinde hem sıvı halindeki suyun hem de yaşamın 4 milyar yıl önce gezegenimiz üzerinde var olduğu bilgisine sahibiz. Buradaki yap-bozu doğuran soru, kabaca 4 milyar yıl boyunca artış gösteren güneşin ısı çıktısının neden gezegenin yüzeyini kaynatıp kurutarak yaşamı silip süpürmediğidir.

Güneşin serin olduğu dönemde dünyanın neden donmuş bir buz topu olmadığına dair açıklama getirmek hiç de güç değildir. Venüs atmosferinde, Mars'ta olduğu gibi karbondioksitin baskın olduğunu ve karbondioksit ile su buharının, volkanik faaliyetler tarafından açığa çıkarılan gazların başında geldiğini biliyoruz. Dünyanın ilk zamanlarındaki atmosferinin, ona en yakın iki komşu gezegeninkinden herhangi bir şekilde farklı olduğunu düşünmemiz için ortada hiçbir sebep yoktur. Bununla beraber, karbondioksit yönünden zengin bir atmosferin, güneşten gelen ısıyı gezegenin yüzeyine yakın bir yerde hapsedeceğini ve böylece sera etkisi sayesinde sıcak kalacağını da söyleyebiliriz. Bir sera içerisindeki havanın sıcak kalmasının esas nedeni bu olmasa da (sera tavanındaki cam çatının, sıcak havanın konveksiyon yoluyla yükselip kaçmasını önlemesi bunu büyük ölçüde etkiler) sera etkisinin anlaşılması kolaydır. Güneşten gelen gözle görülebilir ışık, karbondioksit gibi gazların içinden soğurulmadan geçer ve dünya yüzeyini ısıtır. Isınan yüzey, enerjisini yeniden yayarak onu tayfın kızılaltı kısmında yer alan daha uzun dalga boylarında uzaya doğru geri gönderir. Karbondioksit (ve aslında, aynı zamanda da su buharı [ancak nitrojen veya oksijen değil]) bu kızılaltı radyasyonun bir kısmını soğurur ve soğurduğu enerjiyi tüm doğrultularda yeniden yayar. Bu enerjinin bir miktarı gezegenin yüzeyine yönelip onun ısınmasına yol açarken, diğer bir

kısmı uzaya kaçar. Burada varılan genel sonuç şudur: Dışarıdan bakıldığında gezegenden gelen ışığın tayfındaki, ışığın atmosferde soğurulmasına karşılık gelen dalga boylarında sert bir düşüş görülür. Yeterince hassas bir teleskop ve spektrometreye sahip Mars üzerindeki bir astronom, dünya atmosferinde karbondioksite dair belirtiler bulunduğunu –tıpkı Pic du Midi ekibinin Mars atmosferindeki karbondioksiti teşhis ettiği gibi– bu karakteristik kızılaltı radyasyonu ölçerek söyleyebilir. Yine de dünya atmosferinde Mars'takinden çok daha az oranda karbondioksit bulunduğunu belirtmemiz gerekir.



Şekil 7.1 *Venüs, Mars ve dünyanın tayflarının bu karşılaştırması, gezegenlerden hangisinin denge halinde olmadığını ve yaşama ev sahipliği yapmasının daha muhtemel olduğunu ortaya koyar.*

Dünya yüzeyinin bugünkü ortalama sıcaklığı ile güneşe bizimle gerçekte aynı uzaklıktaki atmosfersiz ayın ortalama sıcaklığını karşılaştırarak sera etkisinin gücünü görebiliriz. Ayda ortalama yüzey sıcaklığı -18 °C'yken, dünyada bu sıcaklık 15 °C'dir. 33 °C'lik bu fark tamamen, atmosferde bulunan yüzde 0,035 oranındaki karbondioksitin yanı sıra yine sera gazları olan su buharı ile eser miktardaki metan gibi gazların da bulunmasından kaynaklanır. Atmosferimizin yüzde 99'undan fazlası (nitrojen ve oksijen) sera etkisine hiçbir katkıda bulunmaz. Bugün sera gazlarının bu kadar az bir miktarı bu denli büyük bir etkiye yol açabiliyorsa, güneş solukken dahi genç dünyanın neden donmadığını anlamak güç değildir. Dahası, dünya yaşlandıkça da kızarmamış ve güneşin sıcaklığının giderek arttığı dört milyar yıllık süreç boyunca kayda değer orandaki eş dağılımlı bir sıcaklığı bilfiil korumuştur.

Atmosferin kompozisyonundaki değişimler, gezegenin sıcaklığının hangi yollarla sabit kalmış olabileceği hakkında kafa yormamızı hayli kolaylaştırır. Lovelock, Gaia nosyonunu öne sürmeden önce Carl Sagan gibileri de benzer çerçeve dahilinde yetersiz çeşitli argümanlar üretmişti. Bu argümanlar, teorisyenlerin dünyadaki sıcaklığı sabit tutma arzusu dışındaki herhangi bir gerekçelendirmeden yoksundu. Ne tür bir doğal süreç bu kararlılığa neden olabilirdi? Kimse bu soruya yanıt bulamıyordu. Yoksa bu sadece şanstan mı ibaretti? Aranan sebep ne olursa olsun, dünya yaşlandıkça, atmosferdeki sera gazlarının güneşten gelen ısı artışını dengelemek için mutlaka giderek azalmış olması gereklidir. Bunun nasıl gerçekleşmiş olabileceğini anlamak genel anlamda kolaydır. Dünyadaki fotosentez yapan ilk yaşam biçimleri (*Britannica*'nın atıfta bulunduğu o "antik anaerobik bakteriler") havadan karbondioksiti alıp vücutlarını inşa etmekte kullanmışsa da bu sefer başka bir sera gazı olan –ancak karbondioksitten farklı kızılaltı soğurma özelliklerine sahip– metan gazını havaya bırakmış olacaktı. Denge, bakterilerin faaliyetleri arttıkça metanın tarafına doğru, azaldıkçaysa karbondioksitin tarafına doğru kayar.

Bunun doğadaki işleyişinin nasıl olduğunu anlamak için atılması gereken ilk kritik adım, hesaplamalara geri-bildirimi katmaktı. Lovelock, güneşin artmakta olan ısı çıktısını dikkate alan bir model aracılığıyla, bakterilerin büyüme hızının sıcaklık 25 °C'yken maksimum düzeyde olduğunu, öte yandan daha yüksek veya düşük sıcaklıklarda bu hızın biraz azaldığını ve sıcaklık 0 °C–50 °C aralığının dışına çıktığındaysa ortadan kalktığını kabul ederek dünyanın aşağı yukarı ilk bir milyar yılı süresince sıcaklığının değişmeden tutulabildiğini gösterdi. Daha sonraysa, bilhassa havaya oksijen salan başka yaşam biçimlerinin ortaya çıkmasıyla başka süreçler devreye giriyordu. Oksijen, metanla tepkimeye girerek bu bileşeni ağ örgüsünden çıkarıyordu. Eonlar boyunca adım adım azalan karbondioksit yoğunluğu da müdahil olan bu diğer süreçlerden biriydi. Tüm bunlar akla yatkın bir işleyiş çerçevesine oturtulabilse de yaklaşıma yönelik eleştiriler, bunun büyük oranla halihazırdaki edinmiş olunan birikime bağlı olduğu ve canlı türleriyle fiziksel çevre arasında iş gören bağlantıların berrak olmaktan çok uzak olduğu yönündeydi. Çoğuna göre, dünyanın sıcaklığını istikrarlı kılan süreçte fiziksel çevreyi kendi yararına şekillendiren bir yaşam (bilinçli olarak değil, geri-bildirim vasıtasıyla) yerine yalnızca şans faktörü rol almıştı. İşte Daisyworld de tam burada sahneye adım atıyordu.

Daisyworld ilk olarak Lovelock ve meslektaşları tarafından 1980'lerin başında geliştirildi ve henüz bu tarihte (muhtemelen olması gerektiği gibi) ipini kopardı; muhtelif kişilerce değişik biçimleri geliştirilen modele 1990'ların başında "SimEarth" adlı bir bilgisayar oyununda dahi yer verildi. Lovelock bu fikri 1981 yılının Aralık ayında, Gaia hipotezinin ilk versiyonlarına yöneltilen eleştirilere cevaben ortaya attı. Fikrini 1982'de Hollanda'daki bir toplantıda sunduktan sonra, eski doktora öğrencilerinden Andrew Watson'un da yardımıyla modelin 1983'te *Tellus* dergisinde yayımlanan daha matematiksel bir versiyonu üzerinde çalıştı. Daisyworld modelinde, güneş gibi bir yıldızın yörüngesinde olan, dünyaya benzeyen –ancak yaşamsız– bir gezegenle yola çıkılır. Bu gezegen ile yıldızın arasındaki mesafe de, güneş ile dünyanın arasındakiyle

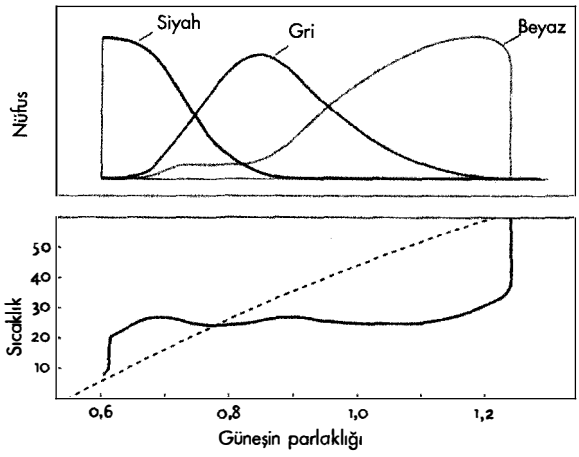
aynıdır. Modelin en basit versiyonlarında gezegenin yüzeyinin çoğu, papatya yetişmesini mümkün kılmak amacıyla karadan oluşurken, sürekli bir sera etkisi elde etmek adına atmosferin kompozisyonu sabit tutulmaktadır. Siyah veya beyaz olan papatyalar 20 °C'de serpilir. Sıcaklık bu optimum seviyenin altına düştüğünde papatyaların büyümeleri belli oranda yavaşlarken, 5 °C'nin altına düştüğünde durur. Büyüme optimum sıcaklığın üzerine çıkılınca da yavaşlar; 40 °C'nin üzerindeki sıcaklıklardaysa durur. Model ilerledikçe, tıpkı gerçek güneşin genç halindeki sıcaklığının yavaşça artması gibi, modeldeki güneşin sıcaklığı da aynı şekilde artmaktadır. Modeldeki dünyanın ekvatorunda sıcaklık 5 °C'ye ulaştığında, her iki cinse ait tohumlar saçılarak kendi hallerine bırakılırlar. (Siyah papatyaların siyah, beyaz papatyaların da beyaz tohum üreterek daima düzgün çoğaldıkları kabul edilir.)

Kavurucu bir yaz güneşinin altında park halinde beklemiş siyah bir arabaya binmeyi tecrübe etmiş herhangi birinin bileceği gibi, koyu renkli cisimler güneş ısısını soğurma açısından açık renkli cisimlere oranla daha etkilidir. Buradan da şunu çıkarabiliriz: Ufak bir siyah papatya kümesi, ısıyı soğurarak mesken tuttuğu küçük toprak alanı ısıtacak; beyaz papatya kümesiyse ısıyı yansıtarak altındaki toprağı soğutacaktır. Bu, Daisyworld serin olduğunda siyah papatyaların avantajlı olduğu anlamına gelir; çünkü bu renk papatyalar çevresindekileri ısıtarak optimum sıcaklığa yaklaştırır ve bu sayede serpilir. Sonraki nesillere gelindiğindeyse siyah papatyalar gezegenin yüzeyi boyunca yayılarak beyaz papatyalara baskın çıkar. Böylece gezegen güneşten gelen ısıyı soğurmakta daha etkin hale gelir ve güneşin artmakta olan sıcaklığı nedeniyle gezegenin sıcaklık artışı normalde olduğundan daha da hızlanır. Öte yandan modeldeki dünya yüzeyinin herhangi bir yerinde sıcaklığın 20 °C'yi aşması halinde beyaz papatyalar avantajlı konuma gelir; çünkü bunlar yüzeyi soğutup her şeyi tekrar optimum sıcaklığa yaklaştırırlar. Güneşin sıcaklığının artmaya devam etmesine karşın beyaz papatyalar şimdi siyah papatyalara üstünlük kurmak üzere yayıldıklarından, gezegenin tamamı beyaz papatyalarla kaplanana dek gezegenin sıcaklığı 20 °C

civarında seyreder. Sonrasındaysa, güneşin sıcaklık artışı sürdükçe papatyalar için işler giderek zorlaşır ve en nihayetinde sıcaklık 40 °C'ye ulaştığında hepsi ölür. Modelin bu versiyonundaki güneşin aktivite aralığının tamamı, güneşimizin şu anki çıktısının yüzde 60'ından 140'ına kadarını kapsar.

Genel anlamda ortaya çıkan sonuç şöyledir: Uzun bir zaman dilimi süresince, modeldeki güneşin ısı çıktısı artmaktayken dahi modeldeki dünyanın sabit kalan sıcaklığı aynı zamanda yaşam için optimum değerdir. Ayrıca tüm bunlar gerçekleşirken papatyalar açısından ne bilinçli bir planlama yapılır ne de bir papatya türünün tüm canlılar uğruna "kendini feda ettiğine" dair bir ize rastlanır. Her iki cins de daima sadece kendi çıkarları doğrultusunda hareket eder. Peki bunca basit bir sistem doğanın asıl işleyişini gerçekten temsil edebilir miydi? Modele yönelik eleştirilerden biri, onun "hileli davranmaya" müsait olabileceği yönündeydi. Siyah ve beyaz papatyaların, enerjilerinin bir kısmını çevrelerinin sıcaklığını etkileyen pigmentleri oluşturmaya harcaması gerektiğinden, renksiz papatyaların bu diğer iki papatya cinsinin sarf ettiği "çaba"dan istifade ederek Daisyworld'ü işgal etmek üzere serpilebileceğini düşünebilirsiniz. Bu tartışmayı sonlandırmak amacıyla Lovelock karışıma renksiz papatyalar katıp yeni bir model inşa etti. Bu sefer siyah ve beyaz papatyaları, pigment üretimini hesaba katan ve onların büyüme etkinliğini azaltan yüzde 1'lik bir "renk vergisi"yle yükümlü kıldı. Önce de olduğu gibi siyah papatyalar güneşin aktivitesi düşükken, beyaz papatyalarsa yüksekken serpiliyordu. Sonradan eklenen renksiz papatyalarsa büyümelerini, güneşin ısı çıktısı başlı başına "dünya"nın sıcaklığını optimum civarında tutacak düzeyde olduğunda gerçekleştiriyordu. Bu aynı zamanda pigment üretiminin bedelinin renkli papatyaların hiçbirine seçilim bakımından avantaj sağlamadığı şartlara karşılık geliyordu. Yine de, sıcaklık üzerindeki genel etki hâlâ aynıydı; modeldeki güneşin sıcaklığı çarpıcı biçimde artarken, modeldeki dünyanın sıcaklığı optimumdan uzaklaşmıyordu.

Modelin yenilenmiş bu hali bile papatyaların evrim geçirmesine izin vermediği gerekçesiyle eleştirildi. Bunun üzerine



Şekil 7.2 *Üç cins papatya ve parlaklığı devamlı artmakta olan bir güneşin yer aldığı Daisyworld modelinde, farklı papatyaların nüfusu zaman ilerledikçe değişirken (üstte), güneşin parlaklığı çarpıcı biçimde artmaktayken dahi gezegenin yüzeyindeki sıcaklık neredeyse sabit kalır (altta). Kesikli çizgi, papatyaların etkisi ihmal edildiğinde sıcaklıkta görülecek artışı temsil eder.*

Lovelock yine modelin temasında değişikliğe gitti. Yeni modelde başlangıçta yer alacak papatyalar gri renkteydi ve bu nedenle hiçbir şekilde sıcaklığı etkilemiyorlardı; ancak bu sefer, papatyaların, rastgele mutasyona uğrayıp her nesilde biraz daha koyu veya açık tonlara bürünmesine izin veriliyordu. Doğal seçilim bir kez daha, güneşin aktivitesi düşük olduğunda siyah papatyaların, yüksek olduğundaysa beyaz papatyaların serpilmesini ve dünyadaki sıcaklığın çok uzun bir süre boyunca aynı kalmasını sağlıyordu.

Daisyworld'ün yenilenmesiyle çok daha fazla papatya cinsi, papatyalarla beslenen hayvanlar ve hatta bu otçullarla beslenen avcı hayvanlar gibi daha birçok faktör hesaba katılabilir. Bu yaklaşım, gezegendeki fiziksel çevreyle, çok önceleri Lotka ve Volterra'nın tasvir ettiği türdeki av-avcı ilişkileri (*bkz.* 4. Bölüm) arasında bir köprü kurar. Bu tam anlamıyla yerinde bir bağlantıdır; çünkü canlı türleri ve onların fiziksel çevreleri arasındaki değişen ilişkileri hesaba katmanın, evrim

anlayışımızı daha dolambaçsız bir hale getirmesi gerektiğini kavrayan ilk insanlardandı biri (hatta muhtemelen *ilk* insan) Alfred Lotka'ydı. 1925 yılında, klâsik kitabı *Elements of Physical Biology'nin* başlarında Lotka şöyle diyordu:

> "Organizmalara ait bir türün evrimi"ni tartışmak gelenekseldir. Kitabın ilerleyen bölümlerinde; evrimi neden daima sistemin bütünü (organizma ve çevrenin toplamı) olarak ele almamız gerektiğine dair birçok gerekçeye rastlayacağız. Bu, ilk bakışta, evrimi sistemin yalnızca bir parçası olarak dikkate almakla karşılaştırıldığında daha karışık bir problem teşkil edecekmiş gibi gözükebilir. Oysaki ilerlememizle birlikte belirginleşecektir ki: Evrime hükmeden fiziksel yasaların, sistemin herhangi bir parçası yerine, onun bütünü olarak ele alınması durumunda daha basit bir kalıba oturması kuvvetle muhtemeldir.[6]

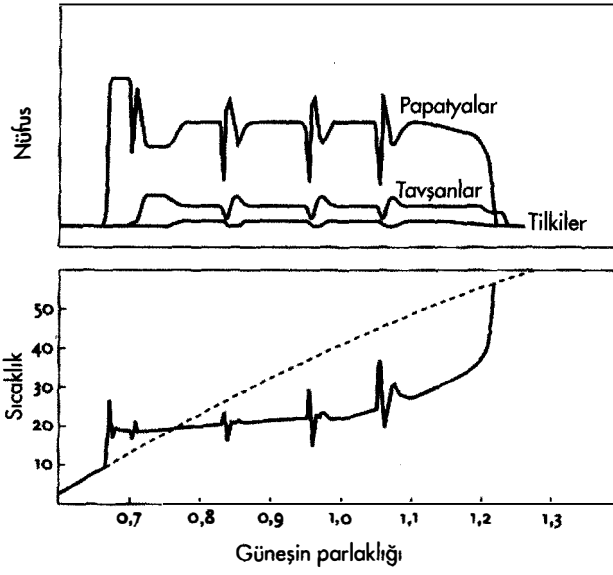
Bu, Gaia teorisinin bir köşe taşı değil de nedir? Üstelik bu alıntı yetmiş beş yıldan da öncesine uzanır. Lovelock, Lotka-Volterra modelini Daisyworld'le birleştirip papatyaların tavşanlar, tavşanların da tilkiler tarafından yendiği bir senaryo oluşturdu ve modelinin sağlamlığını test etmek adına içerisine dört adet felaket (her biri papatya popülasyonunun yüzde otuzunu yok eden dört adet veba) yerleştirdi. Tüm bunlar gerçekleşirken (Şekil 7.3'te de görüleceği üzere) papatyalar yine de gezegenin sıcaklığını –sadece vebaların neden olduğu, normal seyrin dışına çıkan kısa ömürlü dönemler (bir kesintili denge biçimi) hariç– yaşam alanında muhafaza etmeyi başarıyordu.

Daisyworld de tüm modeller gibi, dünyanın "gerçekten nasıl olduğunu değil", yalnızca neyin mümkün olduğunu göstermeyi hedefliyordu. Dünyanın sıcaklığının papatyalar tarafından değil, atmosferin değişen kızılaltı soğurma özellikleri tarafından kontrol edildiği apaçıktır. Yine de Daisyworld, küçük bir geri-bildirimin, bir gezegenin sıcaklığının yaşam tarafından düzenlenmesine nasıl olanak sağladığını (ya da bunu gerektirdiğini) gözler önüne serer. Dünya, yaşamın serpilmesine mahal

---

6 Vurgu bize ait.

vermeyecek kadar soğuk olması halinde atmosferde biriken karbondioksit sera etkisinin artmasına yol açar; yaşam serpildikçe atmosferdeki karbondioksit miktarı azalır ve kontrolsüz bir sera etkisinin önüne geçilir. Karbondioksit kalmaması ve güneşin ısısının sürekli artmaya devam etmesi halinde ne olup biteceğiyse cevapsız bir sorudur. Belki, basit Daisyworld modellerindeki son aşırı ısınma gibi bir felaket neticesinde yaşam sona erecek; belki de farklı bir mekanizma devreye girip muhtemelen bulut örtüsünü artırarak ve daha fazla miktarda güneş ışığının gelmesine izin vermeyerek ısınmanın önüne geçecektir.



Şekil 7.3 *Tilkilerin tavşanlarla, tavşanlarınsa papatyalarla beslendiği Daisyworld'ün bu versiyonunda her biri papatyaların yüzde 30'unu ortadan kaldıran dört adet veba yer alır. Güneşin parlaklığı başlangıçtan beri sürekli artış içerisinde olmasına rağmen sistemin, gezegenin yüzeyindeki sıcaklığı elverişli sınırlar dahilinde tutacak kadar sağlam olduğu görülür.*

Bu ihtimal, Gaia'nın işleyişinin görüldüğü örnekte öne sürülür. Gerçek dünyaya ait bu örnek, Gaia'yı sadece bir hipotez olmanın ötesine taşıyarak onun bir teori haline gelmesinde başrolü oynamıştır. Bu bakımdan Daisyworld, Lovelock'un en çok övündüğü icadı olmasına rağmen bulut örtüsü ile okyanuslardaki biyolojik faaliyetleri ilişkilendiren keşfini Lovelock en önemli keşfi olarak görür.

Bir hipotezin teoriden farkı, onun incelenen şeyin işleyişi hakkında bir fikir olması ama deney ve gözlem vasıtasıyla test edilmemiş olmasıdır. Bir hipotez yeni bir deneyin nasıl sonuçlanacağına veya yeni gözlemlerin neyin sırrını çözeceğine dair bir tahminde (ya da tahminler silsilesinde) bulunduğunda ve bu tahmin olaylar tarafından teyit edildiğinde bir teoriye dönüşür. Örneğin Newton'un kütleçekim teorisi kuyrukluyıldızların yörüngeleri hakkında tahminlerde bulunur. Edmond Halley de bu teoriyi, şimdi kendisinin adını taşıyan kuyrukluyıldızın geri dönüşünü tahmin etmekte kullandı. Newton'un hipotezinden ziyade onun kütleçekim teorisi hakkında konuşuyor olmamız bu tür tahminlerin başarısı sayesindedir. Ayrım genellikle bulanıktır; ama Gaia'nın 1980'lerin ikinci yarısındaki hikâyesine baktığımızda, bir hipotezin rüştünü ispatlayıp teori haline gelmesinin çok net biçimde görüldüğü bir örneğe rastlarız.

Gaia hakkındaki fikirlerinin gelişiminin henüz ilk dönemleri olan 1970'lerin başlarında (hatta William Golding buna Gaia adını daha vermemişken) Lovelock sülfürün okyanustan kayaya nasıl taşındığıyla ilgileniyordu. Sülfür yaşamın temel bir öğesidir; ancak anakaralardaki miktarı, sülfat bileşikleri biçiminde nehirlerin boşaltım alanlarından kaybedilerek sürekli azalmaktadır. Sülfürü karaya döndürmeye yarayacak bir mekanizmanın yokluğunda, karadaki yaşamın geleceği kısa bir sürede zora girecektir. Dönemin sağduyusuna göre sülfür, okyanuslardan havaya hidrojen sülfit biçiminde geçiyordu. Hidrojen sülfit çocuk icadı koku bombalarına "bozuk yumurta" kokusunu veren zehirli gazın ta kendisiyse de bu kokunun denizin alışılmış tipik kokusuyla bir alakası yoktur. Zaten Lovelock da hidrojen sülfitin denizdeki çözünmüş oksijenlerin yer

aldığı tepkimelerde kolaylıkla parçalandığının bilincindeydi; ancak aynı zamanda, çoğu deniz organizmasının sülfürü dimetil sülfit olarak bilinen bir bileşik biçiminde saldığının keşfinin yirmi yıl öncesinde Leeds Üniversitesi araştırmacıları tarafından yapılmış olduğunu da biliyordu. Bunun yanı sıra, eski kafalı bir kimyacı olan Lovelock, havada düşük yoğunluklarla bulunan dimetil sülfatın "denizden (tatlı sudan değil) yeni çıkmış taze bir balığınki" gibi ferah bir kokusu olduğu bilgisine de sahipti. Dimetil sülfitin (kısaca DMS) gerçekten de sülfürün okyanuslardan karaya geçmesini sağlayan ana taşıyıcı olup olmadığını öğrenmeye niyetlenen Lovelock, havadaki DMS zerrelerini ölçmesi için hassas bir alet tasarlayıp inşa etti ve bu alete *Shackleton* adlı araştırma gemisinin İngiltere ile Antarktika arasında yaptığı rutin seferlerinden birinde yer verilmesini sağladı. 1972'de son bulan bu sefer, şimdi bilim tarihinin mühim bir parçası konumundadır. Bunun asıl sebebi Lovelock'un gemide taşınan bir başka aletinin, insan faaliyetleri tarafından üretilen ve stratosferdeki ozon tabakasını zedelemekten sorumlu olan kloroflorokarbon gazlarının atmosferde hangi yolla yayılmış olduğunu ilk kez açığa kavuşturmuş olmasıydı. Ne var ki bu apayrı bir hikâyedir. Lovelock DMS'yi tıpkı beklediği gibi buldu; ancak DMS'nin okyanuslarda gerçekten de yeterli miktarda üretilip atmosfere geçmesinin ardından her sene yağmurla birlikte karaya düşerek boşaltım alanından kaybedilen sülfatı telafi ettiğinin gözlemler ve ölçümler tarafından ortaya koyulması için bir 10 yıl daha geçmesi gerekecekti.

Gelgelelim DMS üreten mikroskobik deniz organizmaları bunu karada yaşayan canlılara yardım etmek "istedikleri" için yapmazlar. Tüm canlı varlıklar gibi onlar da yalnızca hayatta kalma şanslarını en yüksek düzeyde tutma niyetindedir. DMS salan organizma türleri olan deniz yosunları denizdeki sodyum kloritin (sofra tuzu) kendi hücre zarlarından içeri sızarak bünyelerindeki yaşam kimyasını bozmasını önlemek adına bitmeyen bir savaş vermek zorundadır. Tuzu dışarıda tutmanın bir yolu, DNA, RNA ve aminoasitlerin dahil olduğu yaşam süreçleri üzerinde olumsuz bir etki yaratmayacak, toksik olma-

yan bir bileşiğin yardımıyla uygun bir basınç oluşturmaktır. Çoğu deniz yosunu bu amaçla sülfür etrafına inşa edilmiş dimetil sülfon propionat adı verilen bileşiği kullanırlar. Bu bileşik gerekli tüm kimyasal özellikleri barındırır ve (karadan denize geçen sülfat sayesinde) denizde bol miktarda sülfür bulunması açısından ana bileşen olarak sülfürü kullanması da gayet elverişlidir. Yosunlar öldüklerinde veya yem olduklarında dimetil sülfon propionat kırılarak DMS açığa çıkarır. Peki tüm bunların dünyadaki Gaiacı kendini-yenileyen iklimle ne tür bir ilişkisi vardır?

1986 yılında, Seattle'daki Washington Üniversitesine yaptığı ziyaretlerden birinde Lovelock atmosfer bilimci Robert Charlson'dan, okyanusların üzerindeki bulutların nasıl oluştuğunu kimsenin bilmediğini öğrenmesi üzerine çok şaşırmıştı. Yağmur kolaylıkla oluşuyordu. Hava sıcak olduğunda nemli hava konveksiyon yoluyla yükselip soğuyor ve nem uygun irtifada yoğunlaşarak yağmur halinde tekrar aşağı düşecek büyük su damlaları haline geliyordu. Oysa bulut meydana gelmesi için atmosferdeki su moleküllerini, havada asılı kalan küçük damlacıklar oluşturmaya itmeniz gerekir. Su molekülleri bunu ancak etraflarında, toplayabilecekleri daha da küçük "tohumlar" (bunlar bulut yoğunlaşma çekirdekleri [CCN][7] olarak da adlandırılır) olması halinde başarabilirler. Kara üzerinde bu tohumlardan daima bolca bulunur. Bunların bazıları rüzgârla taşınan tozlarken, organik faaliyetler tarafından oluşturulan ve hatta insan faaliyetlerinin yol açtığı atmosferdeki kirlilikten kaynaklanan tohumlar da mevcuttur. Charlson'un Lovelock'a söylediğine göre Pasifik Okyanusu üzerinden alınan hava numuneleri bu uygun tozlarını sülfürik asit ve amonyum sülfat damlacıkları biçiminde bol miktarda bulunduruyordu. Oysa Charlson ve meslektaşlarının bu sülfürik asit ve amonyum sülfatın nereden geldiği hakkında hiçbir fikri yoktu; ta ki Lovelock ona DMS'nin de dahil olduğu sülfür geri dönüşümünden bahsedene kadar. DMS havada oksitlenerek bulut yoğunlaştırma çekirdeği oluşturabiliyordu.

---

[7] *Cloud condensation nuclei* –çn.

Bu katkının küresel ağ için taşıdığı önem apaçıktır. Bulutlar dünyaya gelen güneş enerjisinin oldukça büyük bir kısmını geri yansıtır. Bu o kadar büyük bir miktardır ki hiç bulut örtüsü olmasaydı dünya yüzeyindeki ortalama sıcaklık 35 °C, başka bir deyişle aslında olduğundan 20 °C fazla olurdu. Okyanuslar gezegenimizin yaklaşık yüzde 70'ini kapladığı ve karanlık okyanus suları güneşten gelen ısıyı soğurmakta başarılı olduğu için okyanusların üzerindeki bulutların olmaması durumunda dünya rahatsız edici derecede sıcak olurdu. (Dünya çapında ortalama 35 °C olan değer tropiklerde çok daha yüksek olurdu.) Buradan yapılacak çıkarım, okyanuslardaki mikroskobik yaşam biçimlerinin dünyanın iklimini kontrol etmekte önemli rol oynadığıdır. Doğal bir geri-bildirim süreci dahilinde, deniz yosunlarının daha faal olması halinde okyanusların üzerindeki bulut örtüsü artacak, fotosentez için gerekli olan ışık azalacak ve biyolojik faaliyetler düşüş gösterecektir; ancak biyolojik faaliyetler azaldığında deniz yosunları tarafından salınan DMS de azalacak, daha az bulut oluşacak ve böylelikle fotosentez için daha fazla güneş ışığının mevcut olmasıyla yaşam gelişecektir. Bu tıpkı Daisyworld'de işbaşında olduğu görülen kendini-düzenleyen geri-bildirim türüne benzer ve ağ örgüsünün uçları dünyadaki yaşamın çok sayıda yönünün içlerine uzanır.

Bu bağlantıların karmaşıklığı hakkında sizi bir miktar fikir sahibi yapabiliriz. Yine de Jim Lovelock tarafından kaleme alınmış Gaia hakkındaki çeşitli kitaplarda çok daha fazla ayrıntıya rastlayabilirsiniz. Üzerinde durulması gereken önemli bir nokta; karadan uzaktaki açık denizin temelde, kıta sahanlığındaki[8] zengin sularla karşılaştırıldığında yaşamın ender rastlandığı bir çölden ibaret olduğudur. Bu, karadan uzak yerlerde yaşamın faydalanabileceği nütrient[9] miktarının kıtlığından kaynaklanır. Kıtalara yakın yerlerdeyse nehirler tarafından denize taşınan, yaşamın beslenebileceği maddeler daima bolca mevcuttur. Deniz yosunları tarafından üretilen DMS, bulut yoğunlaştırma çekirdekleri gibi davranarak bu okyanus çöllerinin (bir nebze olsun) zenginleşmesine iki yoldan

[8] Deniz kıyısındaki, derinliği 200 m'yi geçmeyen sahalara verilen ad –çn.

[9] Metabolik madde –çn.

yardımcı olabilir. İlk olarak, fazladan bulut örtüsü oluşumu rüzgârları daha şiddetli kıldığından yerel havayı doğrudan etkiler. Bu nedenle de denizin yüzey tabakaları çalkalanarak fotosentez yapılan bölgenin altında kalan derin tabakalardan nütrientlerin yukarı çıkmasına neden olur. İkincisi (ve muhtemelen daha önemlisi) ise bulut ve yağmurların, kıtalardan gelen ve rüzgâr tarafından atmosferin yükseklerinde, dünyadaki en sapa okyanus sularının dahi üzerlerinde taşınan tozları etkilediğidir. Örneğin Batı Hint Adaları üzerinde Sahra Çölünden gelen tozlara rastlanmıştır. Asya'nın göbeğinden sürüklenen tozlarsa rutin olarak Pasifik Okyanusu üzerinden Hawaii'ye taşınır. Bu tozlar yaşam için elzem olan nütrientler açısından zengin olsa da toz zerrecikleri bulut yoğunlaştırma çekirdeklerinin görevini üstlenmeleri için gerekli fiziksel özelliklere sahip değildir. Bulutlar olmasaydı, bu tozlar yalnız başına buharlaşmanın ürettiği türdeki bulutsuz yağmurlardan etkilenmediklerinden sadece atmosferin yükseklerinde kalacaktı. Öte yandan atmosferde DMS'nin mevcudiyeti sonucu oluşan bulutların bulunması halinde yağış havadaki tozları okyanusun içine sürükler ve sürüklenen tozlar bu sayede, DMS'yi üreten yosunlar tarafından kullanılabilirler. Deniz yosunlarının DMS üretiminin oluşturduğu, okyanuslar ile karalar arasındaki bağlantının işleyişi çift-yönlü bir yolunki gibi her iki yerdeki yaşamın da lehinedir. DMS'deki sülfürün çoğu yağış nedeniyle karaya geçer ve buradaki yaşam için gübre görevi üstlenir; bir kısmıysa nütrientleri karadan alıp okyanusa taşıyan bulut ve yağmurlardan sorumlu olup okyanusta bulunan yaşam için gübre görevi görür. Buna rağmen bir yerdeki yaşamın kendini feda ederek diğer yerdeki yaşamın lehine bir davranış sergilediği gibi bir önerme hiçbir şekilde söz konusu değildir. Her iki yerdeki yaşam da kendisi için en iyi olanı yapmaya çalışır ve bu tam da kendini düzenleyen ağ örgüleri için önem taşıdığını gördüğümüz etkileşim türüdür.

Yine de yalnızca bu bile var olan bir duruma açıklık getirir. DMS çalışmasıyla ilgili en müthiş şey, durumun genelinde bir değişiklik yapıldığında onun aynı zamanda dünyanın nasıl bir hale bürüneceğine dair bir tahmin yürüttüğüdür. O tahmin de

Buzul Çağlarının son silsilelerinde dünyanın neye benzediği hakkındaki anlayışımızla uyuşur.

Son birkaç milyon yıllık süreçte Buzul Çağları oldukça düzenli bir ritim izlemiştir. Bu ritim içinde aşağı yukarı 100.000 yıllık Buzul Çağları, Buzularası Çağlar olarak adlandırılan ve 10.000 veya 15.000 yıl süren görece sıcak aralıklar tarafından bölünmüştür. Biz de şu an yaklaşık 10.000 yıl önce başlamış bir Buzularası Çağ içerisinde yaşamaktayız. Bu Buzul Çağı değişimlerinin ayrıntılı örüntüsü, dünyanın güneşin etrafını turladığı esnada yaptığı eğilme ve yalpalama hareketinin meydana getirdiği mevsimlerin arasındaki ısı dengesinde görülen değişimlerle tamı tamına uyuşur. Her yıl güneşten alınan toplam ısı miktarı sabittir, ama bazen mevsimler arasında daha güçlü bir karşıtlık (sıcak yazlar ve soğuk kışlar) belirirken, bazen de bu karşıtlık (serin yazlar ve ılık kışlar) daha düşük çapta tezahür eder. Örüntü şöyle gözükür: Buzularası Çağlar yalnızca Kuzey Yarımkürenin (bugün karanın büyük kısmının bulunduğu yarımküre) en sıcak yazını yaşadığı zaman başlar.[10] Ne var ki bu değişimler Buzul Çağlarla Buzularası Çağlar arasındaki geçişleri başlı başlına açıklayacak ölçüde büyük değildir. Astronomik ritimler tarafından tetiklenen ve böylece pozitif bir geri-bildirim görevi görerek bu astronomik etkileri artıran başka süreçler de burada söz sahibi olmak zorundadır. Bu süreçlere yönelik adaylar arasında öncelik vermemiz gerekenin havadaki karbondioksit miktarı olduğu besbellidir.

Havadaki karbondioksit miktarı az olduğunda sera etkisinin de azalmasıyla birlikte dünyanın soğuduğunu biliyoruz. (Bu, Gaia teorisinin tam kalbinde yer alır.) Ayrıca, bize en yakın Buzul Çağı süresince havadaki karbondioksit yoğunluğunun bugünkünden daha az olduğunu ve bu yoğunluğun bin yıllık dönem boyunca yerkürenin ortalama sıcaklığındaki değişimlerle tam olarak aynı doğrultuda dalgalanmalar yapmış olduğunu da biliyoruz. Grönland ve Antarktika'daki buz örtülerinde açılan deliklerden elde edilmiş uzun buz nüvelerinin bize bu sıcaklık değişiklikleri ve karbondioksit dalgalanma-

[10] Buzul Çağların astronomik teorisinin ayrıntılarını *Ice Age* (Penguin, 2001) adlı kitabımızda bulabilirsiniz.

ları hakkında sağladığı kesin kayıtlar vasıtasıyla bu bilgiye sahibiz. Birkaç adedi olan bu buz nüvelerinin öne çıkan örneği Rus Antarktik üssü olan Vostok kökenlidir ve 160.000 yıldan fazlasını kapsayan (son Buzul Çağının tamamının ayrıntılarını açığa kavuşturmaya yetecek) kesintisiz bir buz nüvesidir. 1980 yılında başlanan delme işlemi sonucunda çıkarılan 2,2 kilometrelik nüve içerisinde yıldan yıla üst üste binen kar tabakaları bulunuyordu. Düşmeye devam eden yeni karların ağırlığı alttaki kar tabakalarını buz tabakalarına çevirmişti. Nüvenin dibindeki buz 160.000 yıl öncesinden de eski bir tarihte yağmış olan karın sonucuydu ve o kadar sıkıştırılmıştı ki o düzeydeki bir yıllık kar birikimi sadece 1 santimetre kalınlığındaki bir buz tabakasının içine tıkışmıştı.

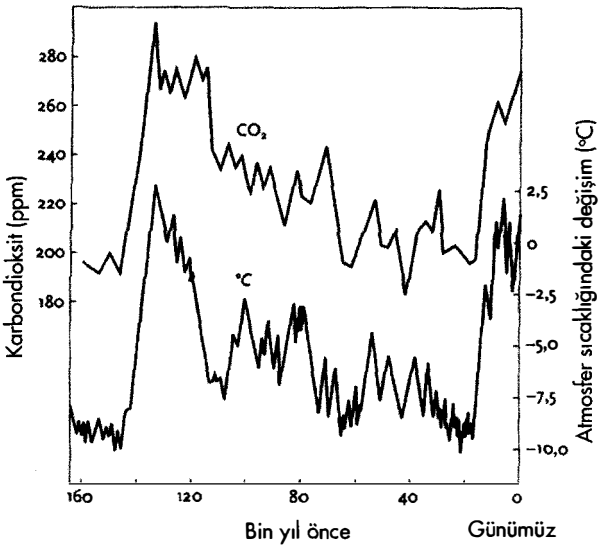
Nüvedeki ardışık buz tabakaları standart jeolojik teknikler vasıtasıyla tarihlendirilebilmektedir. Buzun kendisi gibi nüve de kar tanelerinin sıkışarak buz haline geldiği süreçte hapsolmuş hava kabarcıkları içerir ve bu kabarcıkların analizi aracılığıyla atmosferin kompozisyonunun son buzul-buzularası döngüsü boyunca nasıl değişim gösterdiği açığa kavuşturulabilir. Aynı zamanda buzdan alınan suyun analiz edilmesiyle de söz konusu zaman aralığındaki sıcaklık değişimi hakkında fikir edinilebilir. Bu amaca yönelik izlenebilecek mevcut birkaç yöntem vardır ve bunların hepsi aynı tekniğin farklı çeşitleridir. Örneğin su moleküllerinin barındırdığı hidrojenin iki farklı çeşidi vardır. Bunlardan biri yaygın olan çeşidi, diğeriyse ağır hidrojen de denilen döteryumdur. Ağır hidrojen yaygın hidrojenden kelimenin tam anlamıyla daha ağır olsa da bu çeşitlerin her ikisi de kimyasal anlamda birbirinin aynıdır. Dolayısıyla su molekülleri de iki biçimden ibarettir ve bu moleküllerin bazıları yaygın çeşidine göre daha ağırdır. Daha ağır olan su molekülleri yaygın suya oranla daha zor buharlaşmalarına rağmen su buharı olarak havada bulunduğunda donmaya daha meyillidir. Bu her iki çeşidin kar yağışı içerisindeki oranı, tam olarak dünyanın o kısmının o dönemdeki ortalama sıcaklığına bağlıdır ve dolayısıyla çok eski dönemlerdeki sıcaklık hakkında, nüvenin derinliklerindeki buzun içerdiği mevcut ağır su oranının ölçülmesiyle bir çıkarım yapılabilir.

Buz nüvelerinden ve okyanusun derinliklerindeki çöküntülere gömülmüş uzun süredir ölü olan organizmalardan elde edilen farklı oksijen izotoplarıyla ilişkili benzer teknikler aynı dönem boyunca küresel sıcaklıkların gösterdiği değişim hakkında daha kapsamlı bilgi sunar.

Elimizdeki kayıtlar, en soğuk dönemler olan, hem en son Buzul Çağı hem de ondan bir önceki Buzul Çağında dünya çapındaki ortalama sıcaklığın şimdikinin 9 °C altında olduğuna işaret ederken, bu iki çağı ayıran Buzularası Çağın en sıcak yıllarındaki sıcaklıkların, şimdikinin 2 °C üzerinde olduğunu gösterir. En yakın buzul çağların her ikisinin de sonunda atmosferdeki karbondioksit yoğunluğu 190 ppm'den[11] 280 ppm'ye yükselerek –en son Buzul Çağının başlangıcındaki düşüşe yakın oranda– yüzde 47'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi Vostok nüvesinin kapsadığı zaman aralığı boyunca görülen karbondioksit dalgalanmaları ve sıcaklık dalgalanmaları uyum içerisinde seyretmiştir. Burada sorulması gereken soru şudur: Buzul Çağını büyük çapta etkilemiş olan karbondioksitin yoğunluğundaki değişimi tetikleyen neydi?

Akla gelen ilk olasılık okyanuslardaki biyolojik faaliyetlerde meydana gelmiş olabilecek artıştır. Yerkürenin üçte ikisini kaplayan okyanuslar, havadan karbondioksiti çekip fotosentez yapan organizmaların (plankton türlerinin) kabuklarındaki – organizmalar öldüklerinde okyanusun tabanına düşen– karbon bileşikleri çeşidinde alıkoymuş olabilirdi. 1980'li yıllarda California'daki Moss Landing Deniz Laboratuvarlarında görev yapan John Martin ve Steve Fitzwater, Martin'in, okyanuslardaki yaşama katkıda bulunulmasında demirin önemli bir rol oynuyor olabileceği önsezisinin peşinden gittiler. Bu ikili, Antarktika Okyanusu ve yarı arktik Pasifik Okyanusu sularının bitkiler için önem taşıyan nütrientler olan fosfat ve nitratlar açısından zengin olduğunu biliyordu. Bitkilerin büyümeleri için vazgeçilmez olan bu nitratlar bitkiler tarafından hızla alınır; ancak bu alanlarda yaşayan planktonlar için aynı şey

[11] *Parts per million* [ppm]: Her milyondaki tanecik sayısı –çn.



Şekil 7.4 *Dünyanın bir buzularası çağa yaptığı giriş çıkışlarda görülen sıcaklık değişiklikleri ile havadaki karbondioksit yoğunluğunda görülen değişimler uyum içerisindedir. (Vostok nüvesinden alınmış veri.)*

söylenemezdi. Açık bir şekilde planktonlar, onları bu nütrientlerden faydalanmaktan ve dolayısıyla da gelişmekten alıkoyan bir eksiklikle boğuşuyordu. Eksik şeyin demir olabileceği fikri kulağa hoş geliyordu; çünkü demir klorofilin (fotosentezde kullanılan ışığı emmekten sorumlu yeşil pigment) hayati önem taşıyan bir bileşenidir. Beklenildiği gibi, Martin ve Fitzwater Kuzeydoğu Pasifik'ten numune alıp buna demir eklediklerinde (çözünmüş demir bileşenleri olarak) sudaki mevcut demir ve diğer nütrientleri alan planktonların büyümelerinin hız kazandığını gördüler. Yüksek enlemlerdeki, soğuk ve nütrient bakımından zengin sularda bulunan planktonların sayılarının artmasının önüne geçen şeyin gerçekten de demir kıtlığı olduğu, yapılan çalışmalar tarafından ortaya koyuldu. Laboratuvar ölçeğindeki bu deneylerin gerçekleştirilmesinden bu yana, denizde uygulanan büyük ölçekli denemeler yapılmış ve demir bileşiklerinin doğrudan okyanuslara ilave edilmesiyle, kimi zaman çarpıcı seviyelere ulaşan plankton serpilmeleri sağlan-

mıştır. Bu tür plankton serpilmelerinin büyük ölçekte de teşvik edilebileceği ve böylelikle antropojenik sera etkisinin[12] doğurduğu olumsuzlukların hafifletilebileceği bile ileri sürülmüştür. Tabii bunun şimdiki konumuzla hiçbir ilişkisi yok.

Bizi alakadar eden husus, kıtalardan rüzgârla taşınan tozların, okyanusa karıştığı alanlara verim sağlamak adına hayati bir demir kaynağı oluşturabilecekleri ve dünya soğuyunca yağışın azalması sebebiyle bu tip demir taşıyan toz miktarının dış bir etki (astronomik ritimler gibi) dünyanın ısı dengesini bir Buzul Çağının lehine değiştirdiği zaman artmasının kuvvetle muhtemel olduğudur.

Bahsettiğimiz senaryoda, astronomik etkiler tarafından (hatta başka bir etki tarafından) tetiklenen soğumanın başlaması kara üzerindeki yüksek irtifalarda daha kuru koşulların oluşmasına yol açar; çünkü dünya soğuduğu takdirde okyanuslarda daha az buharlaşma meydana gelecek ve dolayısıyla daha az yağış olacaktır. Kuru koşullar, kıtalardan gelen ve demir bileşiklerini sürükleyen rüzgârla taşınan tozların, okyanus üzerinde yüksek irtifalarda yayılmasına ve (DMS üreten deniz yosunları sayesindeki) yağışın müdahalesi sonucunda denizlerdeki yaşama katkı sağlamasına olanak verir. Bu sürecin meyvesi olan biyolojik faaliyetlerdeki artış da, havadan karbondioksitin çekilip alınmasıyla sera etkisinde azalmaya ve böylece daha fazla soğumaya sebebiyet vererek okyanuslardaki yaşama katkı sağlamak adına daha fazla tozun rüzgâr tarafından sürüklenmesine yol açar. Serbest tüm fosfat ve nitrat tüketildiğinde süreç sona erer. Aynı zamanda, daha fazla DMS'nin üretilmesiyle okyanuslar üzerinde daha fazla bulut oluşacak ve bu nedenle, gelen güneş enerjisinin daha fazlası geri yansıtılarak soğuma teşvik edilecektir. Bu tabloya bakıldığında gayet ufak bir dış tetikleme sonucunda dünyanın Buzularası Çağdan tam bir Buzul Çağına nasıl girdiğini görebilmek kolaydır. Buzul Çağından çıkışsa şu senaryo doğrultusunda

[12] Bu oldukça açık bir fikir olmasına rağmen ilk defa basılı olarak *Nature*'da (cilt 331, s. 570) tarafımdan öne sürülmüştü. O kadar az sayıda parlak fikre sahibim ki bunu bu şekilde gözünüze soktuğum için umarım beni mazur görürsünüz!

gerçekleşebilir: Astronomik etkilerin bir araya gelerek kuzey enlemlerde yarattığı maksimum ısınma, buradaki buz takkesinin bir kısmını tekrar eritip buz takkesinin sınırlarını köreltir. Sonuç olarak rüzgârla taşınan tozların azalmasıyla birlikte planktonların erişebileceği demir miktarı azalır. Böylelikle buz takkesi gittikçe çekilerek okyanustaki yaşam düzeyini aşağı çekerken kıtalara daha fazla su sağlanmasıyla karadaki yaşam serpilir ve geri-bildirim tersine dönmüş olur.

Bu, olup bitenlerin yalnızca kabataslak bir versiyonu olsa da DMS modelinin yaptığı tahminin önemini vurgulamak için yeterlidir. Buzul Çağları okyanuslardaki biyolojik faaliyetlerdeki artışla bu şekilde ilişkiliyse, bir Buzul Çağı boyunca çok daha fazla miktarda DMS havaya geçiyor olmak zorundadır. Havada bulunan DMS'nin getirdiklerinden biri de metan sülfonik asittir (MSA). Dolayısıyla, Lovelock ve meslektaşlarının geliştirdiği Gaia modelinin tahminlerinden biri, atmosferde daha fazla MSA bulunması, bu sebeple de bir Buzul Çağında yağmur veya karla yere düşen daha fazla MSA olması gerektiği yönündeydi. Buz nüveleri, son Buzul Çağ boyunca her yıl Antarktika'ya kar yağışıyla düşen MSA miktarının bugününkünün 2 ile 5 katı arasında olduğunu söyleyerek aslında bunu doğrular. Aynı buz nüveleri ayrıca bugüne oranla daha fazla toz düştüğüne de işaret eder. Bütün taşlar yerine oturmaktadır. Bu bulgu, gezegenimizin biyolojik ve fiziksel öğelerinin, yaşamın varoluşu için elverişli koşulları korumak adına kendi kendini düzenleyen (Lovelock kendi kendini regüle eden ifadesini kullanmayı yeğler) bir halde işleyen ancak her ölçekte kum yığını modelindekilere benzer dalgalanmalara (Buzul Çağ-Buzularası Çağ ritimleri ve kitlesel yok oluşlar da dahil olmak üzere) maruz kalan tek bir ağ örgüsünün parçaları olduğuna dair güçlü bir bulgudur. Dünya tek bir canlı ağ örgüsüne gerçek anlamda ev sahipliği yapar. Bu ağ örgüsünün (Gaia'nın) varlığı, Lovelock'un testini uygulama ve entropi azalışının izini sürme becerisine sahip Mars'taki herhangi bir zeki yaşam formu tarafından kolaylıkla görülebilir bir vaziyettedir.

Ne NASA ne de başkası Lovelock testini Güneş Sisteminde yaşam aramakta kullanacak kadar ciddiye aldı; ancak günü-

müzde bu fikir Güneş Sistemi ötesinde yaşam arama maksatlı faaliyetlerin temelini oluşturmaya yetecek ölçüde ciddiye alınmaktadır. Ötede bir yerde yaşam varsa, bunun büyük ihtimalle tıpkı dünyada gördüğümüz türdeki ağ örgüleri içerisinde bir arada çalışan ve aynı temel yapı taşlarından oluşan aşağı yukarı bildiğimiz yaşam olduğunun farkına varılışı bu arayışın itici gücü oldu.

Evrendeki yaşamın hikâyesi, derinlerdeki basitliğin temelleri üzerine kurulu yüzeydeki karmaşayla ilgili bir diğer örnektir. Bildiğimiz evrenin yaklaşık 14 milyar yıl önce sıcak ve yoğun bir halden (Büyük Patlamadan) ortaya çıktığına dair elimizde kuvvetli delil vardır.[13] Büyük Patlamadan ortaya çıkan temel yapı taşları hidrojen ve neredeyse hidrojenin tamı tamına üçte biri miktardaki helyumdu. Diğer tüm kimyasal elementler (lityum gibi çok az miktarda bulunan çok hafif birkaç element hariç) yıldızların içinde imal edilmiş ve bu yıldızların, ömürlerinin ilerleyen aşamalarında şişip madde püskürtmesiyle (bazı durumlarda yıldızlar patlar) uzaya saçılmıştır. Güneş gibi bir yıldız, merkezinde hidrojeni helyuma dönüştürerek ısı oluşturur; diğer yıldızlardaki kilit süreçlerdeyse helyum çekirdeklerinin peşi sıra füzyonları rol alır. Her bir helyum çekirdeği dört adet "nükleon" (iki nötron ve iki proton) barındıran bir birim olması sebebiyle (helyum-4 yazılışıyla ifade edilir) bu, 4 ve 4'ün katları kadar nükleon içeren elementlere –kararsız berilyum-8 istisna olmak üzere– evrende daha sık rastlandığı manasına gelir. Bilhassa karbon-12 ve oksijen-16 az önce sözünü ettiğimiz sürecin ilk aşamalarında üretilir. İçerdiği nükleon sayısı helyum-4'ünkünün katlarından biri olmamasına rağmen nitrojen-14'se, güneşten biraz daha büyük kütleli yıldızların içerisinde işleyen ve oksijen ile karbon çekirdeklerinin söz konusu olduğu etkileşimler silsilesinin bir yan ürünü olarak üretilir. Sonuç itibarıyla bu bahsettiklerimiz hidrojen ve helyum dışındaki elementler arasında açık ara en yaygın görülenlerdir. Helyum kimyasal tepkimelere girmeyen bir soy gazdır. Bu nedenle evrendeki en yaygın dört reaktif ele-

[13] Bu kuvvetli delilin ayrıntılarına *The Birth of Time* (Phoenix, 1999) adlı kitabımda rastlayabilirsiniz.

ment –CHON kısaltmasıyla anılan– karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojen elementleridir.[14] Dünya üzerindeki, canlı varlıkların kompozisyonundaki ezici çoğunluğu oluşturan dört elementin de bu elementler olması bu bakımdan tesadüf değildir. Yaşamdaki başrolü karbon oynar; çünkü tek bir karbon atomu diğer dört atomun hepsiyle (halkalar ve zincirler oluşturmak üzere birbirlerine bağlanan diğer karbon atomları da dahil) aynı anda kimyasal bağ kurabilir. Bu bakımdan karbon alışılmadık bir kimyasal zenginliğe sahiptir. *Star Trek* gibi bilimkurgu filmlerinin dünyasında, bizim yaşam türümüze "karbon bazlı yaşam çeşitleri" olarak hitap edildiğini sıklıkla görürüz ki bu, başka yaşam çeşitlerinin de var olabileceği anlamına gelir. *Olabilir* de; ancak astronomi biliminin sağladığı tüm deliller ötedeki yaşamın temelini de CHON'nin oluşturmasının kuvvetle muhtemel olduğunu ima eder.

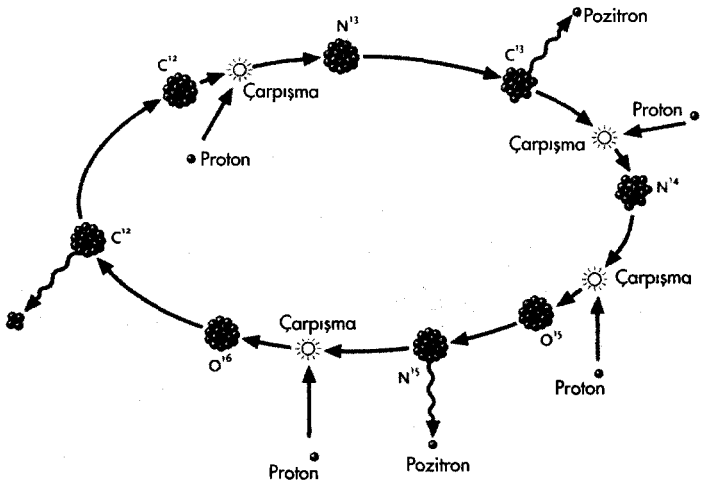
Bu delillerin çoğu, uzaydaki toz ve gaz bulutlarının barındırdığı maddelerin spektroskopik analizi vasıtasıyla elde edilir. Güneş Sistemi gibi gezegenler sistemlerini meydana getiren bu bulutlar önceki nesillere ait yıldızların püskürtmüş olduğu maddeler sayesinde bir bütün halinde kalmayı başarır ve karbon atomlarının etrafına inşa edilmiş birçok bileşik barındırır. Karbon atomları bildiğimiz yaşam için o kadar büyük önem taşır ki bunlar genelde "organik" bileşikler olarak anılır. Yıldızlararası bulutlarda saptanmış bileşiklerin, metan ve karbondioksit gibi oldukça basit maddelerin yanı sıra formaldehit, etil alkol gibi çok daha karmaşık organik maddeler ve en az bir adet aminoasit (glisin) barındırdığıyla karşılaşılmıştır. Bu ufuk açıcı bir keşiftir; çünkü yıldızlararası bulutlardaki mevcut herhangi bir maddenin yaklaşık beş milyar yıl önce Güneş Sistemini oluşturan bulutta da bulunması kuvvetle muhtemeldir. Bilim insanlarından oluşan iki ekip bu

[14] Güneş Sisteminin büyük çoğunluğunu oluşturan hidrojeni bir kenara bırakırsak, her 100 oksijen atomu başına 57 karbon atomu ve 13 nitrojen atomu düşer. Güneş Sistemindeki bir sonraki en yaygın elementse, miktarı nitrojeninkinin yarısı kadar olan silikon elementidir. Ne var ki hidrojenle helyum dışındaki tüm elementler Güneş Sisteminin kütlesinin yalnızca yüzde 0,9'unu oluşturur.

gözlemlerden ilham alarak dünya üzerinde birtakım deneyler yürüttü. Deneylerde, yıldızlararası uzayda var olduğu bilinen madde türleri, çeşitli buz karışımları olarak mühürlü kaplarda saklanıyordu. Bu kaplarsa 15 Kelvin'in altındaki (*eksi* 258 °C'den düşük) sıcaklıklarda morötesi radyasyona maruz bırakılarak uzayda görülen koşullar altında tutuluyordu. Elde edilen sonuçlar 2002 baharında duyuruldu. Ekiplerden biri; su, metanol, amonyak ve hidrojen siyanür karışımıyla başladığı deneyde, üç aminoasidin (glisin, serin ve alanin) kapta kendiliğinden baş gösterdiğini buldu. Biraz farklı içerikteki bir karışım kullanılan diğer deneydeyse, yıldızlar arasındaki koşullar altında, sayısı 16'dan az olmayan amino asit ve diğer birtakım organik bileşikler elde edildi.[15] Bunu perspektife yerleştirmek gerekirse, dünyadaki tüm canlıların proteinlerinin, sadece 20 aminoasidin çeşitli kombinasyonlarından ibaret olduğunu söylememiz gerekir. Delillerin tümü şunu öne sürüyordu: Bu tür madde, büyümekte olan gezegenlerin kütleçekimsel etkisinin toz haline getirdiği kuyrukluyıldızlar tarafından bırakılarak gezegenler sisteminin oluşumunun ilk safhalarındaki genç gezegenlerin üzerine yağmış olmalıydı. Az önce de belirttiğimiz gibi, bir aminoasitler çorbası kendisini yaşamın tüm özelliklerini taşıyan bir ağ örgüsüne düzenleme kapasitesine sahiptir. Bunun ima ettiği şey, uzayın derinliklerinde –yıldız ışıklarından sağlanan enerjinin yardımıyla– çok uzun süreler sonunda oluşan aminoasitlerin, dünya gibi ***herhangi bir*** genç gezegenin yüzeyine sürükleneceğidir. Bu gezegenlerin bazıları fazla sıcak, bazıları fazla soğuk, bazılarıysa da tıpkı dünya gibi (ve Goldilocks hikâyesindeki Yavru Ayı'nın yulaf ezmesine benzer biçimde) tam anlamıyla elverişli olacaktır ve bu aminoasitler orada, Darwin'in ifadesiyle "ufak bir su birikintisi"nde kendilerini canlı sistemlerde düzenleme fırsatını bulacaktır.

İçerisinde bulunduğumuz Samanyolu Galaksisinde başka gezegen sistemlerinin de yer aldığı bilgisine henüz sahip olmadığımız dönemlerde, bu ihtimal bile Samanyolu'nda gezegen yaşamının yaygın olduğuna dair bir delil olarak kabul edilemezdi. Şimdiyse Galaksinin bizim yer aldığımız kısmında,

[15] *bkz. Nature* (2002) cilt 416, s. 401 ve 403.



Şekil 7.5 *Güneşten biraz daha büyük kütleli yıldızların içinde gerçekleşen ve karbon, nitrojen ve oksijen (bunlar hidrojenle birlikte yaşamın en önemli öğelerini oluşturur) arasında bağlantı kuran nükleer etkileşimler döngüsü.*

yörüngelerinde gezegenler bulunan yüzden fazla yıldız olduğu bilinmektedir. Bugüne dek keşfedilmiş gezegenlerin neredeyse hepsi Jüpiter ve Satürn gibi gazlardan oluşan devlerdir (tahmin edeceğiniz gibi, saptanmaları küçük gezegenlere göre daha kolay olan büyük gezegenler ilk olarak bulunmuştur); ancak "başka Jüpiter'ler varsa, o zaman başka dünyalar da muhtemelen vardır" sonucuna varmaktan da kendimizi alamayız.

Daha basit elementleri CHON gibi şeylere dönüştürüp bu maddeyi uzayın içine fışkırtan yıldızlar ile çökerek yeni yıldızları oluşturan gaz ve toz bulutları arasındaki ilişkiyi Ontario'daki Waterloo Üniversitesinde görev yapan Lee Smolin araştırmıştır. Uzaydaki evimiz olan Samanyolu Galaksisi, görünen evrene dağılmış benzer birkaç yüz milyar "ada"dan biridir ve bütün yönleriyle tipik olduğu gözükür. (Boyut, kimyasal kompozisyon vb açısından ortalama değerlere sahiptir.) Samanyolu Galaksisi, bir ucundan bir ucuna yaklaşık yüz bin ışık yılı uzaklığı olan yassı bir disk şeklindedir ve diskin merkezinin

çevresindeki yörüngeleri izleyen birkaç yüz milyar yıldızdan oluşur. Bu yüz milyarlarca yıldızın oluşturduğu kalabalığın arasında ayırt edilemeyen güneşin konumu, galaksinin merkezi ile ucu arasında kalan mesafenin uca yakın olan üçte ikilik kısmında yer alır. Samanyolu'nun merkezinde, yıldızların sebep olduğu bir şişkinlik vardır. Bu yüzden galaksiye dışarıdan bakılması halinde, şişkinliğin yumurtanın sarısını temsil ettiği bir sahanda yumurtayı andıracaktır. Öte yandan diskin yaptığı dönüş şekli, görünen Samanyolu Galaksisini oluşturan tüm parlak maddenin, Samanyolu'nun çevresinde bir hale biçiminde yer alan ve miktarı on katı civarındaki karanlık maddenin kütleçekiminin pençesinde olduğu gerçeğini açığa çıkarır. Parlak yıldızlardan oluşan diskin sınırlarının çok uzaklarına kadar uzanan bu karanlık maddenin ne olduğunu ortaya çıkartmak astronomların en büyük ilgi alanlarından biri olsa da biz buna hikâyemizde yer vermeyeceğiz.

Çoğu disk biçimli galaksileri, merkezlerinden dışa doğru bir sarmal halinde yerleşmiş parlak yıldızlardan çıkan ışık huzmeleri belirgin kılar. (Bu bakımdan bunlara sarmal galaksiler de denir.) Sarmal kollar olarak adlandırılan kolların meydana getirdiği örüntüleri incelemek kolaydır; çünkü galaksiler boyutlarına oranla birbirlerine görece yakındır. Samanyolu'na kıyas götürür en yakın sarmal galaksi olan Andromeda Galaksisi, bize birkaç milyon ışık yılı uzaklıktadır. Bu mesafe kulağa muazzam gelebilir. Oysaki Andromeda Galaksisi öyle büyüktür ki, dünyadan bakıldığında o uzaklıktan bile ay büyüklüğündeki bir gökyüzü parçasını kaplıyor olmanın yanı sıra şehirler ve diğer ışık kirliliğine sebebiyet veren diğer kaynaklarından uzakta, ayın olmadığı berrak bir gecede çıplak gözle görülebilir.[16] Astronomlar Samanyolu'ndaki yıldızların konumlarını eşleştirerek bizim galaksimizin de sarmal olduğu bilgisine ulaşmıştır. Ayrıca, daha önce de şöyle bir değindiğimiz gibi,

[16] Kabaca konuşmak gerekirse, Andromeda Galaksisine olan uzaklığımız kabaca bu galaksinin çapının yaklaşık 20 katı kadardır. Güneşe en yakın yıldız, ona güneşin çapının 20 katı uzaklıkta olsaydı, güneşin yalnızca 30 milyon kilometre uzaklığındaki bir yörüngede (Merkür'ünkinin güneşe olduğundan çok daha yakın) olurdu!

yıldızlar arasındaki bulutlarda yüksek miktarda gaz ve toz bulunduğunun farkında olan astronomlar, sarmal galaksinin ne olduğuna ve nasıl işlediğine yönelik uygun bir anlayış edinmenin de enerji ve maddenin yıldızlar ile yıldızlararası ortamda çift yönlü bir süreç dahilinde değiş tokuş edilişinin anlaşılmasından geçtiğini bilmektedirler. Buna ilaveten bir galaksi için önem içeren zaman ölçüsünü de kavramamız gerekir. Güneş, halihazırdaki yaşı yaklaşık on milyar yıl olan Samanyolu'nun merkezinin çevresinde attığı tam bir turu 250 milyon yılda tamamlar. Yıldızlararası bulutlar ile yıldızlar arasındaki madde ve enerji değiş tokuşunu sağlayan süreç insan standartlarına göre yavaş görünebilse de Galaksinin kendi standartlarına göre hızlı gerçekleşmektedir.

Bir diğer önemli noktaysa yıldızların farklı büyüklüklerde –hatta daha önemlisi farklı kütlelerde– olduklarıdır. Yıldız ne kadar büyükse (büyük kütleliyse), kendi ağırlığı karşısında direnmek adına nükleer yakıtlarını o kadar kuvvetlice tüketmesi (hidrojeni helyuma dönüştürerek vs) gerekir. Bu sayede yıldız çok daha parlaklaşsa da erken tükenmeye maruz kalır. Güneşin, yaşamının bu kararlı fazındayken yaklaşık on milyar yıllık bir ömrü olmasına rağmen, iki misli kütleye sahip bir yıldız bu sürenin çeyreği kadar direnir. Güneşin otuz misli kütlesine sahip bir yıldızsa, 30.000 güneşinkine karşılık gelen parlaklığı nükleer yakıtını tüketene dek yalnızca on milyon yıl yaşar. Daha sonra bu yıldız içine çökerek muazzam miktarda kütleçekimsel enerji açığa çıkarır. Bu enerji yıldızı tersyüz eder ve onu patlatarak bir süpernova oluşturur. Ne var ki bu tip büyük kütleli yıldızların nadir olması sebebiyle bu denli çarpıcı olaylar da ender gerçekleşir; yıldızları oluşturan süreçler aşağı yukarı güneş gibi küçücük yıldızlardan çok sayılarda üretilmesinden yanaymış gibi gözükür. Gerçekten de Samanyolu gibi bir galakside bir yüzyıl başına ortalama sadece birkaç adet süpernova patlaması düşer. Yine de bunu galaksiyle ilişkili süreçler için uygun bir çerçeveye oturmak adına belirtmeliyiz ki her bir milyon yıla karşılık gelen süpernova patlamalarının sayısı 20.000 civarındadır.

Bizimki gibi galaksilerin bu denli öne çıkan bir özelliği olan sarmal kollar, üzerlerinde parlak biçimde ışıldayan sıcak ve büyük kütleli yıldızlar bulunması sebebiyle görünürdür. Aynı zamanda bu onların genç yıldızlar oldukları anlamına gelir ki zaten yaşlı bir büyük kütleli yıldız yoktur. Bir yıldızın galaksinin çevresinde bir tur atması için gereken sürenin genel olarak yüz milyon yıl civarı olduğunu ve sarmal kolların hatlarını oluşturan parlak yıldızların yalnızca birkaç milyon (en fazla on milyon) yıl boyunca ışıldadığını düşünürsek, bu yıldızların, aşağı yukarı onları şu an gördüğümüz yerlerinde oluşmuş oldukları sonucu ortaya çıkar. Parlak sarmal kollar yıldızların bilhassa yaygın olduğu bölgeleri değil, yalnızca yıldızların bilhassa parlak olduğu bölgeleri belirtir. Smolin'e göre bu kollar "bir yılbaşı ağacındaki ışıklar gibi" ön plana çıkar.

Sarmal örüntünün nasıl korunduğu bir gizem içermez; bunun sebebi geri-bildirimdir. İçerisinden yeni yıldızların meydana geldiği dev bulutların yıldız oluşturmak üzere çökmeye başladıkları andaki kütleleri güneşinkinin on milyon katı kadar olabilir. Her çöken bulut tek bir iri yıldız meydana getirmekle kalmayıp bu iri yıldızlardan oluşan bütün bir kümeyle birlikte çok sayıda küçük yıldız da üretir. Parlak yıldızlar ışık saçtıklarında, –özellikle tayfın morötesi kısmındaki– yıldız ışıklarının enerjisi bulut içerisinde bir kabarcık oluşturarak daha fazla yıldızın oluşmasına engel olma eğilimine girer. Öte yandan büyük kütleli yıldızlar yaşam döngülerini tamamlayıp patladıklarında –ve böylelikle yıldızlararası madde içerisine birçok çeşit elementin tohumunu ektiklerinde–, patlama dalgası çevredeki yıldızlararası bulutları sıkıştırıp onların çökmeye başlamasına yol açar. Farklı süpernovalardan kaynaklanan bu tip dalgalar çaprazlama kesiştiklerinde, birbirleriyle etkileşime girerek yıldızlararası maddeyi süpürür ve çöken gaz ile tozlardan oluşan yeni bulutlar meydana getirir. Bu bulutlar da daha fazla yıldız ve süpernova doğurur. Bahsettiğimiz bu süreç geri-bildirim ve –süpernovalardan kaynaklanan– bir enerji girdisinin rol oynadığı, kendi kendini idame ettiren bir etkileşime dair klâsik bir örnektir. Bilgisayar simülasyonları, kendi kendini idame ettiren sürecin devam etmesini sağlayan

ayrıcalıklı bir bulut yoğunluğunun bulunduğunu ve geri-bildirimlerin doğal bir biçimde süreci bu optimum koşullara doğru taşıdığını ortaya koyar. Bulut fazla yoğunsa bulutun iç bölgesi, yaşam döngülerini hızla tamamlayıp patlayarak bulutu parçalayan ve böylelikle çok sayıda yıldız oluşmasına mahal vermeyen birkaç iri yıldız oluşturmak üzere çabucak çöker. Bu, yeni nesil yıldızların daha seyrek bir buluttan doğacak olması anlamına gelir; çünkü maddeyi yoğun parçalar içerisinde toplayacak az sayıda süpernova gerçekleşmiştir. Şayet bulutun yoğunluğu optimum değerin altındaysa, çok sayıda yıldız doğacak ve çok sayıda süpernova patlaması yaşanacaktır. Bu patlamalar da, yıldızlararası maddeyi daha yoğun bulutlarda toplayan çok sayıda şok dalgası üretecektir. Her iki tarafta da geri-bildirimler, bulutların yoğunluğu ile her nesilde üretilen süpernova (ve güneşe-benzer yıldız) sayısı arasında aşağı yukarı sabit bir denge sürdürme amacıyla iş görür. Sarmal örüntünün kendisi, galaksinin dönmekte olduğu ve tüm karanlık maddenin kütleçekimsel pençesinde bulunduğu gerçeğinin bir sonucudur. Bu, kahvenize döktüğünüz kremanın yarattığı sarmal örüntünün, kahvenin dönmekte olduğu ve karanlık kahvenin pençesinde bulunduğu gerçeğinin bir sonucu olmasına benzer. Aslında sarmal örüntü galaksinin çevresinde saniyede yaklaşık 30 kilometre hızla hareket ederken, galaksi diskinin cüssesini oluşturan gaz ve toz bulutları saniyede aşağı yukarı 250 kilometrelik hızlarda hareket eder ve sarmal kolların aralarından geçerken sıkıştırılır. Galaksi diskinin bünyesindeki *her şey* hemen hemen her yüz milyon yılda bir bu sıkıştırılmaya iki defa (galaksinin her iki tarafında birer kez olmak üzere) maruz kalır.[17]

Tüm bu faaliyetlerden uzakta, Samanyolu gibi bir galaksinin geri kalan kısmında, güneş gibi daha sakin ve uzun ömürlü yıldızların yanı sıra galaksi diskinde yer alan yıldız biçimindeki maddenin en az yüzde 15'i kadar gaz ve toz bulutları

[17] En azından iki kollu basit bir sarmal galaksi için bu böyledir. Bazı galaksiler daha karmaşık bir yapıya sahip olsa da bu ayrıntıların tartışması kitabımızın kapsamı dışındadır.

biçimindeki maddeden bulunur.[18] Bu yıldızlararası maddenin farklı çeşitleri vardır. İçerisinden yeni yıldızların (ve gezegenlerin) oluştuğu, sıra dışı moleküller açısından zengin olan ve dev moleküler bulutlar olarak anılan soğuk gaz ve toz bulutları vardır. Diğer taraftan bize "normal" gazdan oluşuyormuş gibi gelecek, hidrojen gibi elementlerin atom ve moleküllerinden oluşan ve muhtemelen içinde bulunduğunuz odanın sıcaklığındaki bulutlar da mevcuttur. Bunların yanında bir de, yıldız patlamalarından kaynaklanan enerji nedeniyle aşırı ısınmış bölgeler bulunur; aşırı ısınmanın atomlardan koparttığı elektronlar bu bölgelerde elektrik yüklü plazma oluşturmuştur. Değindiğimiz bu yıldızlararası ortamda müthiş yoğunluk farklılıkları söz konusudur. En seyrek kısımlarda, yıldızların arasında kalanların yerleşimi o kadar aralıklıdır ki uzayın her bin santimetreküpü başına sadece bir atom düşer; en yoğun kısımlardaysa, yeni yıldız ve gezegenler doğurmanın eşiğindeki bulutların bir santimetreküpü içerisinde bir milyon atom barındırılıyor olabilir. Bir santimetreküp başına on kentilyondan fazla[19] molekül içeren soluduğumuz havayla karşılaştırıldığında bu yine de çok seyrekmiş gibi gelebilir. Ne var ki yoğunlukta yapılacak bir milyarlık bir etmen değişimi olağanüstü bir farklılığa yol açmaya yeter de artar. Smolin ve diğer birkaç araştırmacının 1990'ların sonunda farkına vardıkları şey, tüm bu değindiklerimiz bakımından (kompozisyon, sıcaklık ve yoğunluk bakımından) yıldızlararası ortamın, eş dağılımlı olmanın yakınından bile geçmediğiydi.

Bu, Samanyolu'nun –diğer sarmal gezegenler gibi– bir entropi düşüş bölgesi olduğu anlamına gelir. Samanyolu, sistemin içerisinden geçen bir enerji akışı ve görmüş olduğumuz gibi geri-bildirim aracılığıyla dengeden uzak bir halde tutulan ve kendi kendini düzenleyen bir sistemdir. Galaksi bu düzeyde Lovelock'un yaşam testini geçmeyi başarır. Smolin de galaksilerin canlı sistemler olarak değerlendirilmeleri gerektiğinin savunucusu olagelmiştir. Daha temkinli bir yaklaşımsa, Lovelock'un testinin, yaşamın varoluşu için "gerekli ancak ye-

[18] Galaksi disklerindeki maddenin en az yüzde 15'i toz biçimindedir.

[19] 10^{19}'dan fazla –çn.

tersiz" dedikleri bir ölçüt teşkil ettiğini ifade etmektir. Bir sistem termodinamik dengedeyse (Lovelock testini geçemiyorsa), o zaman onun ölü olduğundan kesin olarak eminizdir. Canlıysa, bir entropi düşüşü yaratmak ve Lovelock'un testini geçmek zorundadır. Ne var ki bir sistem canlı olmadan da –tıpkı daha önce ele aldığımız kütleçekimsel çöküş konusundaki gibi– negatif entropi üretebilir. Bu yönden, canlı ve cansız varlıklar arasında belirgin bir sınır yoktur. Üzerine yukarıdan taneciklerin yuvarlandığı bir kum yığını dış kaynaklı bir enerjiden yararlanarak kendisini kritik bir halde idame ettiriyor olsa da canlı olmadığı kuşkusuzdur; bir insansa kuşkusuz canlıdır. İnsanlar hâlâ Gaia'ya tek bir canlı sistem gözüyle bakılabilip bakılamayacağını tartışmaktadır. Galaksiler açısındansa bu sorgulama henüz yeni başlamıştır ki ben bunun sonunda varılacak mutabakat üzerine bahis yapmak istemem. Yaşam ve yaşam-dışı arasındaki sınırın bulanık olduğu ve bu sınırın nereye çizileceğinin bir tartışma konusu olduğu gerçekliği yine de mühim bir keşiftir. Evrenin işleyiş biçimi bağlamında yaşam hakkında olağandışı hiçbir şey olmadığını netleştirmeye yardımcı olur. Görmüş olduğumuz gibi, basit sistemlerin kendilerini *kaosun eşiğindeki ağ örgülerine düzenlemeleri* doğaldır ve bunu yaptıklarında her nerede elverişli "ufak bir su birikintisi" varsa orada yaşamın ortaya çıkması da doğaldır. Bu, yaşamın başladığı noktadan yapılmış ani bir sıçramanın görülmediği, az çok sürekli bir sürecin parçasıdır. Bu açıdan bakıldığında, bilimin başarabileceği en önemli şey yaşamın ortaya çıkmış olduğu en az bir gezegen keşfetmek olurdu. Lovelock'un, yaşamın doğası hakkındaki kavrayışı sayesinde bunu yapabilmenin hemen kıyısındayız; başka Gaia'lar saptama becerisine sahip teleskoplar önümüzdeki yirmi veya otuz yıl içerisinde uzaya gönderilebilir.

Başka Gaia'ların keşfi, iki aşama sonrasında gerçekleşebilir. İlk olarak, diğer yıldızların yörüngesinde olan dünya büyüklüğündeki gezegenler saptamalıyız; daha sonraysa o gezegenlerin atmosferlerini, entropi düşüşüne neden olan süreçlerin iş başında olduğuna dair delil elde etmek amacıyla analiz etmeliyiz. İlk "güneş dışı" gezegenler, yörüngelerinde

oldukları yıldızların hareketlerindeki ufak değişimleri açığa kavuşturan Doppler teknikleri kullanılarak saptanmıştır. On dokuzuncu yüzyıl fizikçisi Christian Doppler'in ismini almış bu etki bir cisimden gelen ışığın tayfındaki çizgilerin konumunu, cismin gözlemciye göre ne hızla hareket ettiğine bağlı olan bir miktar kadar değiştirir. Bu gözlem türlerini perspektife yerleştirmek adına şunu söyleyebiliriz: Güneşi çeken Jüpiter'in kütleçekimi saniyede yaklaşık 12,5 metrelik bir hız değişimine yol açar. Bu hız değişimi, Jüpiter ile birlikte ortak kütle merkezlerinin çevresinde dönen güneşi (Güneş Sisteminin kütle merkezine göre) 800.000 kilometrelik bir mesafe (güneşin yarıçapından biraz fazla) boyunca hareket ettirir. Bu hareketin hızı bir Olimpik 100 metre koşucusununkine yakındır ve Güneş Sisteminin dışındaki bir gözlemci için bu, güneşin gönderdiği ışığın tayfındaki çizgilerin kesin konumlarında Doppler etkisinden kaynaklanan ve gidip-gelen ufak bir kayma doğurur. Bu, civarımızda yer alan çok sayıdaki yıldız miktarının ışığında tespit edilmiş ve o yıldızların etrafında yörüngede bulunan Jüpiter'e benzer gezegenler olduğunu gösteren kayma türüdür. Dünya güneşin çevresinde dönmesi esnasında güneşin hızında saniyede 1 metrelik (yavaş bir yürüme hızı) bir hız değişimine sebebiyet vererek onu Güneş Sisteminin kütle merkezine göre yalnızca yaklaşık 450 kilometre kadar hareket ettirir. Böylesine küçük çaplı bir etkiyi bize en yakın yıldızların uzaklığı için bile ölçebilecek bir teknolojiye henüz sahip değiliz. Başka dünyaların bu yöntemle şimdiye dek saptanmış olmamasının da nedeni budur.

Küçük gezegenleri teşhis etmeye yarayabilecek, kimi zaman haberlerde yer alan başka teknikler de mevcuttur. Örneğin bir gezegen, yörüngesinde olduğu yıldızın doğruca önünden geçtiğinde (örtme veya geçiş) o yıldızdan çıkan ışıkta düzenli bir kararmaya yol açar. İstatistiksel açıdan, güneş dışı gezegenlerin yörüngeleri bize göre herhangi bir doğrultuda eğimli olabilmesi nedeniyle bu gezegenlerin yalnızca yüzde biri bizim örtmelere şahit olmamıza elverişli yörüngelerde bulunurlar; her geçiş zaten sadece birkaç saat sürer. (Bu, dünyanınkine benzer bir yörüngedeki bir gezegen için yılda bir kez, Jüpi-

ter'inkine benzer bir yörüngedeki bir gezegen içinse her on bir yılda bir kez gerçekleşir.) Buna rağmen, çok sayıda yıldızı görüntüleyerek bu tip örtmeleri araştırmak amacıyla uzaya önümüzdeki birkaç yıl içinde uydular göndermeye yönelik planlar yapılmaktadır. 100.000 yıldız incelendiğinde ve bunların 1000'i geçiş sergilediğinde istatistikler esas itibarıyla güneşe benzer her yıldıza gezegenler tarafından eşlik edildiğini ima eder. Yine de, bu tür araştırmaların hepsi paha biçilmez olsa da başka dünyaların izinin sürülmesine en genel anlamda uyarlanabilecek teknik Doppler tekniğidir. Ayrıca dünyalar nasıl bulunmuş olursa olsun, diğer Gaia'ların aranmasındaki bir sonraki aşama değişmeyecektir.

Dünyaya benzer (en azından dünya boyutunda) çok sayıda gezegen bulmaya yönelik en yakın umut, SIM (Space Interferometry Mission) adı verilen bir NASA uydusunda yatar. Önümüzdeki birkaç yıl içinde (2005 civarında) gönderilme ihtimali olan bu uydu, interferometre olarak bilinen ve birtakım küçük teleskoptan alınan verilerin bir araya getirilerek tek bir büyük teleskopun gözlem gücünün taklit edildiği bir tekniği kullanacaktır. Her şeyin yolunda gitmesi halinde SIM, yıldızların konumlarını öyle bir hassaslıkta ölçebilecektir ki güneşe en yakın 200 yıldızdan herhangi birinin yörüngesinde olan her dünyaya benzer gezegenden kaynaklanan yalpalanmayı ve güneşin 3000 ışık yılı ötesine uzanan bölge içindeki her Jüpiter'e benzer gezegeni tespit edecektir. Yirmi birinci yüzyılın ilk on yılının sonlarına doğru (yine her şeyin yolunda gitmesi koşuluyla) Avrupa Uzay Ajansı (ESA) biraz yanıltıcı biçimde GAIA adını taşıyan ve başlıca görevi aslında başka Gaia'lar aramak olmaktan ziyade gökyüzündeki en parlak bir milyar nesnenin konumunu eşleştirmek olan bir uyduyu uzaya gönderecek. GAIA çok fazla sayıda yıldıza bakacağından, her biri için bunu çok uzun bir süre boyunca veya sıklıkla yapmayacaktır. Dolayısıyla dünya büyüklüğündeki gezegenlerin yol açtığı yalpalanmaları tespit edemeyecek; ama periyodu birkaç yıldan uzun olan yörüngelere sahip Jüpiter büyüklüğündeki gezegenleri tespit edebilecektir. Şayet gezegenler yere dayalı gözlemlerden edinilen ilk belirtilerin iddia ettiği gibi yaygınsa, o halde on yıl

içinde Samanyolu civarındaki on binlerce güneş dışı gezegen sistemini teşhis etmiş olmamız gerekir. Yine de bunlar ancak dolaylı gözlemler olabilir; o gezegenlerin bazılarının tayflarını edinebilmemiz için hâlâ teknolojik anlamda atılması gereken birçok adım mevcut.

Hem NASA hem de ESA, o teknolojiden faydalanarak söz konusu gözlemleri 2030 yılına kadar gerçekleştirecek yeni nesil projeler üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir. Buna karşın, böylesi herhangi bir görevin muazzam maliyeti nedeniyle sarf edilen çabalar bir yerde sahiden de küresel bir projede toplanacak gibi durmaktadır. Bu, konuyla alakalı dünyadaki bütün uzmanların evrende yalnız olmadığımıza dair delil bulmak için işbirliği yapması (Gaia'nın bir bütün halinde başka Gaia'lar araması) manasını taşır. Darwin Projesi olarak bilinen ESA'nın projesi aynı zamanda –daha ciddi bir isim olan– Infrared Space Interferometer (IRSI) olarak da adlandırılır; projenin NASA karşılığıysa Terrestrial Planet Finder (TPF) adını taşır. Bunların ikisi de tam olarak aynı prensipler doğrultusunda çalışacaktır.

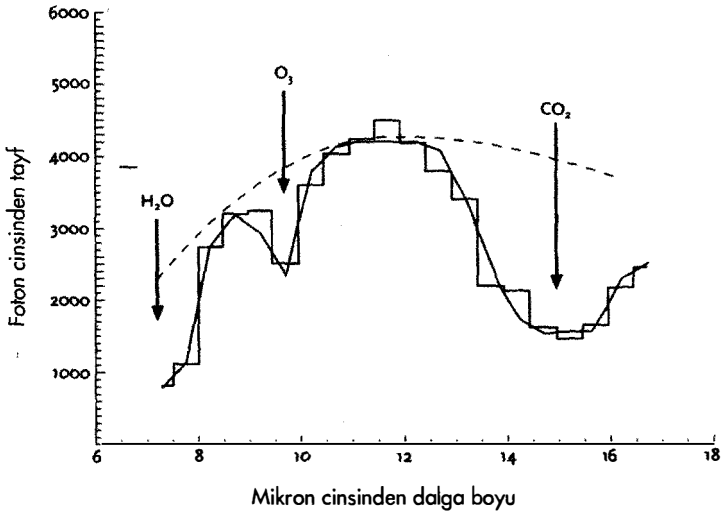
Görünür ışık, diğer dünyaların doğrudan saptanmasına yönelik çok da ümit vaat eden bir yöntem değildir; dünyanın uzaydan çekilmiş, ardalanı kapkaranlık olan o parlak mavi-beyaz renkli top halini gösteren resimler sizi şaşırtmasın. Bunun iki nedeni vardır: Bunlardan birincisi, dünya gibi bir gezegenden gelen görünür ışığın esasında o gezegenin yıldızından gelen ışığın yansıması olduğudur. Dolayısıyla da bu ışık yalnızca görece zayıf olmakla kalmaz, aynı zamanda yıldızın kendi ışığının parıltısı karşısında astronomik mesafelerden seçilmesi de güçtür. İkinci sebepse yer-benzeri gezegenlerin parlaklıklarının aslında elektromanyetik tayfın kızılaltı kısmında en üst seviyede olduğudur; çünkü güneşten soğurdukları enerji tayfın kızılaltı kısmında, görünür ışığınkinden daha uzun dalga boylarında tekrar yayılır. Dünya birkaç mikronluk dalga boylarında Güneş Sistemindeki en parlak gezegendir ve Güneş Sistemi civarındaki yeterli hassasiyetteki herhangi bir kızılaltı teleskopa dikkat çekici bir nesne olarak göze çarpacaktır. Buradaki püf nokta, bulmak niyetinde olduğumuz kızılaltı radyasyonun

dünya atmosferindeki karbondioksit ve su buharı gibi gazlar tarafından soğuruluyor olması sebebiyle başka dünyaları araştıracak teleskopun potansiyel tüm kirlilik kaynaklarından uzağa, uzayın derinliklerine yerleştirilmesi gerektiğidir. Teleskop aynı zamanda çok hassas, diğer bir deyişle çok büyük olmalıdır. Bahsettiğimiz pahalı, uluslararası projenin meyve vermesi için on yıllara ihtiyaç olması işte bu yüzdendir.

Plan, SIM'ye çok daha güçlü bir interferometre-bazlı teleskop geliştirmektir. Bu da tüm interferometreler gibi, farklı teleskoplardan alınan sinyallerin büyük bir hassasiyetle bir araya getirilmesini gerektirecektir. Teknik ilk olarak radyo teleskoplar kullanılarak yer üstünde geliştirildiğinde sinyaller kablolar vasıtasıyla bir araya getiriliyordu; şimdiyse bu tür bir çalışmada lazer ışınları kullanmak rutin bir hale gelmiştir ve teknoloji, gezegen bulacak teleskop (en nihayetinde nasıl adlandırılacaksa) için hayli temel bir unsur olacaktır. Şu an çizim tahtasındaki her iki tasarı da bilgi uçuracak altı uydu (altı teleskop) içerir. Bu uydular bir altıgenin köşelerine karşılık gelecek şekilde 100 metre aralıklarla yerleştirilecektir. Uzay araçlarının birbirine göre konumlarının ölçümü –yine lazer vasıtasıyla– bir milimetreden de yüksek bir hassasiyette yapılmak zorunda olacak; sonrasındaysa teleskopların edindiği bilgi, merkezi bir ana uyduda tek bir sinyal halinde birleştirilerek muhtemelen 600 milyon kilometre mesafeden dünyaya geri gönderilecektir. Böylesine bir alet, yaklaşık elli ışık yılı uzaklıktaki aşağı yukarı birkaç yüz yıldızın yörüngesindeki dünyaya benzer gezegenlerden (ya da daha ziyade; Dünya, Venüs ve Mars'a benzer ve yörüngeleri yine bu gezegenlerinkilerle kıyaslanabilir gezegenlerden) gelen kızılaltı yayımları saptayabilme becerisine sahip olacaktır. Atılacak bir sonraki adımsa bu gezegenlerin tayflarını almaktır ki Jim Lovelock da Mars'ta yaşam aramak için izlenebilecek en iyi yöntemin bu olduğunun farkındaydı.

Tüm bunlar bir hayli zaman alır. Ayrıca araştırmanın her aşamasında daha fazla gezegen incelemek istediğinizde her bir gezegeni incelemeye harcayacağınız vakitten kısmak zorunda kalırsınız. Dolayısıyla planlanmış altı yıllık bir görevin

ilk iki yılında, olabildiğince çok sayıda yıldıza bakarak gezegenlerden gelen kızılaltı yayınlara dair bir belirti bulmaya çalışırsınız. Bir sonraki iki yıl boyunca, en umut vadeden adayların yaklaşık seksenini ayrıntılarıyla incelemeye yönelir ve her hedef için yaklaşık 200 saatlik birer gözlem süresi adarsınız. Bu gözlemler esnasında da kızılaltı kısımda, karbondioksitle ilişkili öne çıkan spektral özellikler ile su buharıyla ilişkili daha az öne çıkan özellikler ararsınız. Tabii tek başına bu gazların varlığı, yaşamın olmasa da –Venüs ve Mars'ınki gibi atmosferlere sahip olmak anlamında– yer-benzeri gezegenlerin mevcut olduğunun bir göstergesidir. Diğer yandansa suyun varlığı gezegenin yaşam için muhtemel bir ev sahibi olduğunu belirtir. Görevin son aşamasına ulaşıldığında bu seksen aday arasından her biri 800'er saat incelenmek üzere 20 hedef seçersiniz. Bu süreyi tayfın bu kısmının en heyecan verici potansiyel özelliği olan "oksijenin kızılaltı özellikleri" hakkındaki ipuçlarını su yüzüne çıkarmak için harcarsınız. Bulmaya çalıştığımız oksijen, soluduğumuz alelade çift atomlu oksijen molekülü (O_2) cinsinden olmayacaktır; çünkü çift atomlu oksijen tayfın bu kısmında ne salım ne de soğurma yapar. Oysaki dünya gibi oksijence zengin atmosferi olan bir yer-benzeri gezegen aynı zamanda bir ozon tabakasına da sahiptir. Ozon, diğer bir deyişle üç atomlu oksijen (O_3), söz konusu gezegenin ait olduğu yıldızdan gelen ışığın, çift atomlu oksijene tesir etmesiyle üretilir ve kızılaltı tayfta, karbondioksit ve su buharına ilişkin özelliklerin tam ortasında yer alan bariz bir özelliği ortaya koyar. Tek başına bu özelliğin (veya metan gibi diğer aktif bileşiklerin mevcudiyetini belirten özelliklerin) bulunuşu, on ışık yılının birkaç misli uzaklıktaki bir yıldızın yörüngesindeki bir gezegene ait atmosferin termodinamik dengede olduğunu ve entropi düşüşünden sorumlu süreçlerin –diğer bir deyişle yaşamın– gezegenin yüzeyinde iş başında olduğunu bize söylemeye yeter. Üstelik bunun için bırakın bir insanoğlunun, bir uzay araştırma aracının dahi Güneş Sistemini terk etmesine gerek yoktur.



Şekil 7.6 *Otuz ışık yılı uzaklıktan dünyanın tayfının Darwin teleskopuna nasıl görüneceğinin bir simülasyonu. Darwin gibi aletlerin başka yıldızların yörüngesindeki gezegenlerden gelen tayflar bulması halinde, o gezegenlerde entropi düşüşü yaratan süreçlerin iş başında olduğu ve Güneş Sisteminin ötesinde muhtemel bir yaşam belirtisine ulaşıldığı sonucuna varılacaktır.*

Evrenin temelini oluşturan derinlerdeki basitlik hakkında bildiğimiz en çarpıcı örnek budur. Bilinen evrendeki en karmaşık şeyler bizim gibi canlı varlıklardır. Bu karmaşık sistemler Samanyolu gibi galaksilerde var olduğu bilinen en yaygın hammaddelerden yapılmıştır. Bu hammaddelerse doğal bir biçimde aminoasit biçiminde bir araya gelerek kendi kendini düzenleyen sistemler haline bürünürler ki bu noktada temelde yatan basit nedenler, leopar ve noktaları konusunda olduğu gibi yüzey karmaşası yaratabilir. Son olarak, evrensel sistemlerin bu en karmaşık olanlarının varlığını saptamak için canlıyı cansızdan ayırmak adına yapılacak hiçbir karmaşık teste ihtiyacınız yoktur. Aksine, sadece en basit teknikler aracılığıyla (bir hayli ileri bir teknolojiyle destekleniyorsalar da) evrendeki en basit bileşiklerden biri olan oksijenin varlığını teşhis edebilirsiniz. Kaos ve karmaşa bir araya gelerek evreni, tam da

bizim gibi yaşam biçimlerine elverişli olan oldukça düzenli bir yer haline getirir. Stuart Kauffman'ın deyişiyle "evrende evimizdeyiz." Ne var ki bu, evrenin bizim için tasarlanmış olduğu anlamına gelmez; daha ziyade evrenin kendi görüntüsünün içerisinde bizler üretilmişizdir.

Dizin

açık sistemler
  zaman oku 139-40
  kendini düzenlemiş kritiklik 205-6
akustik, kuvvet yasası davranışı 190-1
algoritmalar 91-2
Amaral, Luis 248-9
amino asitler 216
  yıldızlararası bulutlar 285-8
  kendini düzenleyen sistemler 297-9
  ayrıca bkz. proteinler
Andromeda Galaksisi 288-9
Arthur, Brian 196
Asahi, Rihito 176-7
asteroidler
  oluşum 85-7
  Kirkwood boşlukları 86-8
  rezonant yörüngeler 86-7
At Nalı Dönüşümü 133-6
atom fiziği, Bohr modeli 247-9
Ay
  yüzey, ölçekte değişmezlik 187-9
  yörünge hesaplama 67-8
  yüzey sıcaklığı 265-7
Aynanın İçinden (Carroll) 232-3
Avogadro, Amedeo 50-2
  Avogadro sayısı 50-2
azalan getiriler kavramı 196-8

Bak, Per 205-8, 243-5
  How Nature Works 206-8
Bard, Jonathan B. L. 172-4
başlangıç koşulları, kesin olarak belirleme 80-3
Belousov-Zhabotinsky (BZ) tepkimesi 164-7, 216
Belousov, Boris 160-3
Bénard, Henri 141-6
  Bénard Kararsızlığı *bkz.* Lord Rayleigh: Rayleigh-Bénard Kararsızlığı
beyaz gürültü 190
Bjerknes, Vilhelm 75-7
Bohr, Niels 247-9
Boltzmann, Ludwig 36-7, 49-55
  Boltzmann sabiti 49-51
  Lectures on Gas Theory 54-5
Boole cebiri 220-1
Boole, George 220-1
Bray, William 160-1

Brusselator modeli, tepkime difüzyon örüntüleri 164-6
Buchanan, Mark 187-8
Ubiquity 187-8, 194-5
bulut yoğunlaşma çekirdekleri
bulut oluşumu 274-5
okyanus çölleri 276-7
bulut örtüsü
dünyanın sıcaklığı 271-7
oluşum 274-5
okyanustaki biyolojik faaliyetle bağlantı 272-4
Buzularası Çağlar 277-81
ve karbondioksit 277-82
Buzul Çağları 277-83
astronomik teori 277-8, 280-1
Buzularası Çağlar 277-81
Brüksel Okulu 141-2
Büyük Beşli 199-201
Büyük Patlama teorisi 147-50, 283-4

Cantor, George
Cantor Kümesi 116-9
Carroll, Lewis 232-3
cebir
Boole mantığı 220-1
topoloji 133-4
cep hesap makinesi, kaos modeli 83-4
Charlson, Robert 274-5
CHON (karbon, hidrojen, oksijen ve nitrojen) 283-6
cinsellik , biyolojik evrim 240-1
Clausius, Rudolf 41-2, 49
Copernicus, Nicolaus 18-9
Göksel Kürelerin Devinimleri Üzerine 18-9
Curie, Pierre
Curie Noktası 155-6

çatallanmalar *bkz.* periyot katlama
çekiciler 46-7
çatallanma 104-7
limit çevrimi 112
Lorenz çekicisi 82-3, 134-6
hal çevrimleri 219-21
tuhaf çekiciler 114, 121-2, 134-6
BZ tepkimesi 166-7
termodinamik 45-8
torus 112-4
çevresel değişimler
biyolojik ve fiziksel 253-4
uyumluluk sahaları 253-4

Daisyworld 262-73
Felaketler 271-2
gri papatyalar 270
av-avcı ilişkileri 270-2
Darwin, Charles 225-6
Darwinci evrim 226-30
Darwinizm 174-6
Türlerin Kökeni 226-7
Darwin Projesi (infrared space interferometer) 295-6
demir
ve okyanusun gübrelenmesi 280-1
denge
deri renkleri 169-71
ayrıca bkz. memelilerde post örüntüleri
depremler
yok oluşlar ve yaşamın ortaya çıkışı 179-224
sıklıklar ve büyüklükler 181-3, 185
Gutenberg-Richter yasası 183-4
kuvvet yasası 183
dev moleküler bulutlar 291-2
digitary orrery, Güneş Sistemi 87-8

dimetil sülfit (DMS)
ve bulut yoğunlaşma çekirdekleri 274-5
ve Buzul Çağları 282-3
ve sülfür geri-dönüşümü 273-5
dinozorlar, nüfus düşüşü ve yok oluş 197-200
Dirichlet, Lejeune 61-2
DNA 121-2, 124
klonlama 219-20
gen oransallığı 223
proteinler 218-9
doğal seçilim *bkz.* evrimsel biyoloji
doğal seçilimin genetik teorisi 235-7
doğrusal/doğrusal-olmayan rejimler 140-2
geri-bildirim sistemi 164-6
istikrarlı hal 140-2
Doppler etkisi, gezegenler sistemlerinin saptanışı 292-6
Doppler, Christian 294
dünya
bulut örtüsü 271-7
eğiklik değişimleri 91-3
yörüngesel değişimler 87-91
kendini regüle etme 260-3, 282-4
güneş enerjisi 150-2
spektrum 299-300
yüzey sıcaklığı 262-7

Eddington, Arthur 161-3
Fiziksel Dünyanın Doğası 161-3
Einstein, Albert 35-6, 225-6
Elektromanyetizma 33-5
Faraday etkisi 34-5
Maxwell denklemleri 34-7
kuantum etkileri 35-6
ekstrem dinamik 245
embryojenez 151-78
hücre farklılaşması 219-20
embriyo ebatları 172-4
ve Turing 156-61, 164-70
enerji
korunum ve yitim 40-2
Joule ısıtması 40-1
Kinetik 49
en uyumlu olanın hayatta kalması, tanım 226-8
entropi 43, 45
ve dünyaya benzer gezegen saptanışı 257-8, 297-9
olasılık ilişkisi 50-1
sarmal galaksiler 291-3
termodinamik 41-5
ayrıca bkz. zaman oku
eşleştirme, lojistik denklem 130-2
eumelanin, deri renkleri 167-70
Evren
Kopernik'in modeli 18-9
dünya-merkezli model 18-9
denge hali 147-51
ısıl ölüm 43, 44, 52-3
evrenin ısıl ölümü 43-4, 52-3
evrensel sabit, karmaşık sayılar 180-1
evrimsel biyoloji 225-54
Bak-Sneppen modeli 246-8
birlikte evrim 235-41
Robot resim modeli 238-41
Darwinizm 174-5
cinselliğin evrimi 240-1
oyun teorisi 230-3
memelilerde post örüntüleri 166-78
avcılar ve av 248-50
Kızıl Kraliçe etkisi 232-4
süper-fare modeli 241-3
evrimsel durağan enerji (ESS) 230-3

Faller, Alan 109
Faraday, Michael 34, 5
fare, süper-fare modeli 241-3
faz uzayı 62-72
  Hamilton denklemi 62-72
  manzara modeli 65-6, 70, 80-1
  limit çevrimi 99-101, 111-2
  sarkaç davranışı 65-7
  sistem konumu 94-7
faz geçişi 156-7
  karmaşık sistem ağ örgüleri 212-4, 216-8
feomelanin, deri renkleri 167-70
Fırıncı Dönüşümü, Smale'ın At Nalı Dönüşümü 133-5
Feigenbaum, Mitchell 110-1
  Feigenbaum diyagramı 106-8, 111-2
  Feigenbaum noktası 117
  Feigenbaum sistemleri 110-2
  Feigenbaum sayısı 111-2
Fisher, R. A. 236-7
Fitzwater, Steve 280-1
Fourier, Joseph 39-40
Fraktaller 114-38
  Cantor Kümesi 116-9
  kıyı şeridi ve sınır boyutları 183-5
  boyut ölçümleri 125, 128-30
  canlı sistemler 136-8
  Mandelbrot Kümesi 129-31
  kaos ile ilişkisi 117
  tuhaf çekiciler 114, 121-2, 134-6
Frette, Vidar 208

GAIA uydusu 295-6
Gaia hipotezi 253-4, 262-73, 283-4, 292-3
  Daisyworld modeli 262-73
  Britannica Ansiklopedisi'ndeki tanım 261-2
Galápagos ispinozları
  Darwinci evrim 227-30, 237-8
  ve kesintili denge 242-3
galaksiler
  Andromeda 286-9
  karanlık madde 287-8, 291-2
  ve geri-bildirim 290-3
  canlı sistemler olarak 292-3
  Samanyolu 286-91
  kendini düzenleyen sistemler olarak 290-3
  sarmal 286-93
Galileo Galilei
  ve kütleçekim ve ivme 18-21
Gamow, George 146-7
genetik mühendisliği 218-9
geri-bildirim sistemleri
  azalan getiriler kavramı 196-8
  ekonomiler 196-8
  galaksiler 290-3
  doğrusal/doğrusal-olmayan rejimler 164-6
gezegenler
  kızılaltı yayınlar 264-6, 296-9
  örtmeler 294
  gezegenler sistemi saptanışı 257-8, 292-9
  terrestrial planet finder (TPF) 295-6
  ayrıca bkz. adlandırılmış gezegenler
gezegensel yörüngeler 72-3
  değişimler 90-1
  yakınsama 61-3
  tersinmez güzergâhlar 89-92, 93
  faz uzayı 66-8
  Poincaré kesiti 67-70
Gibbs, Josiah Willard 49
Gleick, James 14-5
Golding, William 260-1
gök mekaniği, denklemler 61-2
görelilik
  genel teori 149-50, 225-6

özel teori 35-6
Grant, Peter ve Rosemary 229-30
Gutenberg modeli 181-2
Gutenberg-Richter yasası 183-4
güneş
dünyanın sıcaklığı 262-7
soluk genç güneş paradoksu 262-4
güneş enerjisi 150-2
Güneş Sistemi
asteroid kuşağı oluşumu 85-7
gezegenlerin eğiklik değişimleri 91-2
ayrıca bkz. adlandırılmış gezegenler

hacim, kuvvet yasası 135-7
Hamilton, William 62-3
Hamilton denklemi ve faz uzayı 62-72
hareket, Newton yasaları 25-32
hava sistemleri 190-3
hava tahmini 77-80
hesaplama teknikleri 77-80
konveksiyon sayısal modeli 80-1
başlangıç koşulları 82-3
sayısal 72-80
sinoptik hava tahmini 75-6
hal çevrimleri 219-21
hücreler 222-3
geri-bildirim sistemi 222
helyum, Büyük Patlama 283-4
hisse senedi piyasası dalgalanmaları, kuvvet yasası davranışı 194-9
Holland, John 238-9
homoklinik dallanma 68-9
Huxley, Thomes Henry 226-7, 262-3

hücreler
farklılaşma ve gelişim 218-23
DNA ve gen oransallığı 223
Embriyojenez 219-20
gen ağları 218-20
ampul modeli 219-22
hal çevrimleri 222-3

ışık eğrisi 190
ışık, hız 34-6

infrared space interferometer (IRSI) 295-6
interferometri 295-7
iterasyon 28-31, 83-4
Mandelbrot Kümesi 129-31
periyot katlama çatallanmaları 110-1
cep hesap makinesi 83-4
Sierpinski Contası 119-22
ispinozlar *bkz.* Galápagos ispinozları
istatistiksel mekanik, termodinamik 38, 47-51
ivme 19-22

jeolojik dönemler, Büyük Beşli 200-1
Jordan, Pascual 147-8
Joule, James
Joule ısıtması 40-1
Jüpiter
Jüpiter büyüklüğündeki gezegenler, GAIA projesi 295-6
yörünge hesaplama 29-31
rezonant asteroid yörüngeleri 86-7
Jürgens, Hartmut
Chaos and Fractals 121-2

kalıtım, Darwinci evrim *226-7*
kalkülüs 23-5

karanlık madde, Samanyolu Galaksisi 286-8, 291-2
kararlı ekolojik ağ örgüsü 246-8
karbon, karbon bazlı yaşam biçimleri 285-6
karbondioksit
ve sera etkisi 264
ve kızılaltı yayınlar 264-6, 297-9
ve Buzularası Çağlar 277-81
ve Mars atmosferi 259-61
Kauffmann, Stuart 211-24, 232-3, 235-6
Kataliz 156-8
otokatalitik süreç 158-60
yaşamın ortaya çıkışı 216
kaos
kelebek etkisi 82-3
ve fraktaller 117-22
başlangıç koşullarının belirlenmesi 80-3
moleküler 55-6
periyot katlama rotası 101-2
cep hesap makinesi modeli 83-4
rastgele süreç 118-20
kısıtlı, dünyanın yörüngesindeki değişimler 90-1
türbülans modeli 99-101
evrenin karmaşası 59-97
kaos oyunu 121-3
ve DNA 121-2, 124
fraktal görüntüler 121-4
karmaşık sayılar 129-31, 179-81
evrensel sabit 180-1
karmaşık sistemlerdeki ağ örgüleri 211-2
düğme modeli 211-4
bileşenler 211-3
tanım 179-80
ve yaşamın ortaya çıkışı 215-24
ve genler 218-20
ampul modeli 219-22
faz geçişi 212-4, 216-8, 236-7
kuvvet yasasıyla bağlantı 205-6
yarış bisikleti modeli 180-1
kum yığını modeli 205-10, 212-5
kayıp süreçler 139-41
Kelebek çekicisi *bkz.* Lorenz çekicisi
kelebek etkisi 82-3
kelebek kanatları, tepkime difüzyon örüntüleri 176-7
Keler balığı, tepkime difüzyon örüntüleri 175-7
Kelvin, Lord (eski adıyla William Thomson)
Thomson etkisi 41-2
kendini düzenlemiş kritiklik
birlikte evrim 235-6
depremler 206-12
etkileşim ağları 250, 252-4
açık sistemler 205-6
kum yığını modeli 206-12
kendini düzenleyen sistemler
amino asitler 297-9
dünyanın iklimi 276-7
galaksiler 290-3
okyanus çölü 276-8
kendine-benzerlik
periyot katlama 106-8, 111-3
basitleştirilmiş modeller 111-3
kendini regüle eden sistem, dünya 260-3, 282-4
Kepler, Johannes 18-9, 25-6
kesintili denge 242-3
bağlantılı ağ örgüleri 243-4
Daisyworld 271-2
kum yığını modeli 243-4
kestirim tekniği 59-63
kıyı şeridi ve sınır ölçümleri
fraktal boyutlar 183-6
Koch Adası 125-9
kuvvet yasası 185-6

Kızıl Kraliçe etkisi
evrimsel biyoloji 232-4
uyumluluk sahaları 237-9
kurbağa modeli 232-4
kızılaltı yayınlar
ve karbondioksit 264-6, 297-9
ve oksijen 297-9
gezegenlerden gelen 264-6, 296-9
üç atomlu ozon 297-9
kimyasal saatler 161-2
kinetik enerji, yıldızlar 150-1
Kirkwood, Daniel
Kirkwood Boşlukları 86-8
klonlama
DNA 219-20
doğa ve yetişme 172-4
kloroflorokarbonlar, atmosferdeki yayılım 273-4
Koch, André 175-7
Koch Eğrisi/Adası/Kar Tanesi 125-30
Kondo, Shigeru 176-7
konveksiyon
iki-şekilli 144-5
altıgen hücreler 144-5
Rayleigh Sayısı 144-5
Rayleigh-Bénard Kararsızlığı 141-6
kozmik mikrodalga ardalan ışınımı 149-50
Kretase-Triasik sınırı *bkz.* K-T olayı
Kronecker, Leopold 61-2
kuasar'lar, kuvvet yasası davranışı 188-90
kum yığını modeli 210
karmaşık sistemlerdeki ağ örgüleri 212-5
ve uzun pirinç tanecikleri modeli 208-12
renklere göre kodlama 209-12
kuvvet yasası 205-10
kesintili denge 243-4
kendini düzenlemiş kritiklik 206-7
tahta küp modeli 206-8
kuvvet yasası davranışı 135-7
kıyı şeritleri ve sınırlar 185-6
depremler 183-4
ekonomiler 194-8
yok oluş örüntüleri 203-5, 247-9
küresel ısınma 190-1
uzun pirinç tanecikleri modeli 208-12
müzik ve ağızdan çıkan söz 190-1
gezegensel yaşam saptanışı 257-8
popülasyon üzerine çalışmalar 191-4
kuasar 188-90
trafik tıkanıklığı 193-5
hava sistemleri 82-3, 190-3
beyaz ve pembe gürültü 190
kuvvet serileri 60-1
küresel ısınma
ve kuvvet yasası davranışı 190-1
K-T olayı 202-3
dinozorların yok oluşu 197-8
fosil kayıtları simgesi 197-8
meteor etkisi 198-200
kütleçekim 225-6
ve ivme 19-22
zaman oku 150-1
kütleçekim sabiti 24-5
genel görelilik teorisi 225-6
ters kare yasası 24-6
negatif enerji 145-51
Newton'un kütleçekim yasası 20-4
güneş enerjisi 150-2
evrensel yasa 25-6
kürk örüntü ve renkleri *bkz.* memelilerde post örüntüleri

Laplace, Pierre 89
Olasılık Üzerine Felsefi Denemeler 32-3
Landau, Lev 111-2
Laskar, Jacques 89
lazer ışını teknolojisi, gezegen saptama 296-7
Lectures on Gas Theory (Boltzmann) 54-5
Lefever, René 164-5
Leibniz, Wilhelm 23-4
Leonardo da Vinci
girdap türbülansı modeli 100-2
Lewin, Roger 15-6
Li, Tien Yien 109
"Period Three Implies Chaos" 109
limit çevrimleri 99-101, 111-2, 114
Lotka, Alfred 160-2, 270-2
Elements of Physical Biology 271-2
logaritmalar
Guten-Richter yasası 184
log-log grafiği 183
Richter ölçeği 181-3
lojistik denklem
Fırıncı Dönüşümü 133-4
At Nalı Dönüşümü 133-4
eşleştirme 130-4
nüfus değişimleri 101-5
LONG-STOP (Long-term Gravitational Study of the Outer Planets) 87-8
Lorenz, Edward 77-83
kaosun keşfi 106-11
Lorenz çekicisi 82-3, 134-6
Loschmidt Sayısı 51-2
Loschmidt, Joseph 51-2, 55-6
Lovelock, Jim 15-6, 254-300
Mandelbrot, Benoit 115-6, 118-20, 125-30
ekonomik sistemler ve kuvvet yasaları 194-6
"How long is the coast of Britain?" 128-9
Mandelbrot Kümesi 129-31
Mars
atmosfer kompozisyonu 259-60
yaşam saptama ölçümleri 256-61, 265-6
eğiklik değişimleri 91-2
termodinamik denge 259-61
Viking projesi 259
matematiksel teknikler
kestirimler 59-61
belirlenimci 28-9
kuvvet serileri 60-1
ayrıca bkz. adlandırılmış teknikler
Martin, John 280-1
May, Robert 105-7, 133-4
Maynard Smith, John 230
Maxwell, James-Clerk 34-7
Maxwell denklemleri 34-7
Meinhardt, Hans 175-7
melanin, eumelanin ve feomelanin 167-70
Melosh, Jay 198-9
memelilerde post örüntüleri 166-78
yüzey büyüklüğü 170-2
Mercator projeksiyonu 130-1
Merkür, eğiklik değişimleri 91-2
metabolizma hızları, kuvvet yasası 135-7
metan sülfonik asit (MSA), Buzul Çağı 282-3
metan, sera gazı 266-7
meteor etkisi, K-T olayı 198-200
Meyer, Martin 248-9
moleküler kaos 55-6

momentum
Hamilton denklemi 62-3
korunum yasası 90-1
momentumun korunumu yasası 90-1
morfogenez 156-78
Murray, James 166-8
"How the leopard got its spots" 166-7
Mathematical Biology 166-7
mutasyon
Darwinci evrim 226-7
evrim 240-2

Nagel, K 193-4
Newman, Mark 250
Newton, Isaac 225-6
kütleçekim yasası 20-4
hareket yasaları 25-32
Doğal Felsefenin Matematiksel İlkeleri 20-4
Norveç, kıyı şeridi fraktal boyutları 183-5
nöral ağlar 155-6
nüfus değişimleri, lojistik denklem 101-5

Ockham'ın Usturası 167-8
Ockham'lı William 167-8
oksijen, üç atomlu ozon 297-9
okyanus çölü, kendini düzenleyen sistem 276-8
okyanus gübreleme, demir 280-1
omurgalı uzuv, biyokimyasal süreçler 176-8
Onsager, Lars 140-1
Oregonator modeli 165-6
oyun teorisi 230-3
ozon, üç atomlu 297-9

ölçekleme yasası, fraktal boyut 128-9
ölçekte değişmezlik
depremler 185
yok oluş örüntüleri 247-9
donmuş patatesler modeli 187-8
aysal yüzey 187-9

Peano, Guiseppe 114-6
Peano Eğrisi 115-6
Peitgen, Heinz-Otto
Chaos and Fractals 121-2
pembe gürültü ($\frac{1}{7}$ gürültüsü) 188-93, 203-4
"Period Three Implies Chaos" (Li ve Yorke) 109
periyodik davranış 84
periyot katlama çatallanmaları
Fırıncı Dönüşümü 133-5
konveksiyon 144-6
Feigenbaum diyagramı 106-8, 111-2
At Nalı Dönüşümü 133-6
iterasyon 110-1
nüfus değişimleri 104-7
tepkime difüzyon örüntüleri 166-7
tekrarlı 101-2
kendine-benzerlik 106-8, 111-3
Permiyen dönemi, kitlesel yok oluşlar 202-3, 253-4
Peters projeksiyonu 130-1
pi
yaklaşık değer 59-61
irrasyonel sayılar 91-5
plankton, demir eksikliği 280-1
Poincaré, Henri 55-7, 62-3, 66-73
Poincaré tekrarlama süresi 56-7
Poincaré kesiti 67-70
Bilim ve Metod 71-3
popülasyon üzerine çalışmalar, kuvvet yasası davranışı 191-4

Prigogine, Ilya 14-5, 47-8, 140-2
Brusselator 164-6
Kaostan Düzene 14-5
proteinler, DNA 218-9
rastgele süreç kaosu 118-20
rasyonel/irrasyonel sayılar 91-5
Raup, David 203-4
Rayleigh, Lord 141-2
Rayleigh Sayısı, konveksiyon 144-5
Rayleigh-Bénard Kararsızlığı 141-6
rezonans, tanım 86-7
Richardson, Lewis Fry 73-8, 126-7
Weather Prediction by Numerical Process 76-7
Richter ölçeği 181-3
Richter, Charles 181-3
Ruelle, David 114
Rumford, Count (eski adıyla Benjamin Thompson) 40-1

Samanyolu
sarmal galaksi 286-91
sarmal örüntü oluşumu 291-2
San Andreas kırığı *bkz.* depremler
sarkaç davranışı 18-20
faz uzayı 65-7
Satürn, yörünge hesaplama 29-31
Saupe, Dietmar
Chaos and Fractals 121-2
uyumluluk sahaları 236-9, 246-8
yaşam tarafından etkileniş 253-4
Kızıl Kraliçe etkisi 237-9
sera etkisi 191, 264-8
ve Daisyword modeli 267-8
Sepkoski, Jack 200-3
Shackleton seferi, DMS ölçümleri 273-4
Sierpinski, Waclaw 119-20
Sierpinski Contası 119-23
SIM (space interferometry mission) 295-7
Smale, Stephen 109, 133-5
At Nalı Çekicisi, Fırıncı Dönüşümü 133-5
simetri kırılması 155-6
Smith, Henry 116
Smolin, Lee 286-8
Sneppen, Kim 243-5
soluk genç güneş paradoksu 262-4
spektroskopi, Mars atmosferi 259
Stengers, Isabelle 14-5, 47-8
Kaostan Düzene 14-5
Stevin, Simon 22
su, ağır, Buzul Çağı sıcaklıkları 278-9
sürtünme 19-21

Takens, Florins 114
Tang, Chao 205-6
tepkime difüzyon örüntüleri 156-78
keler balığı 175-7
Brusselator modeli 164-6
kelebek kanatları 176-7
BZ modeli 164-7
Oregonator modeli 165-6
periyot katlama çatallanmaları 166-7
termodinamik 36-53
enerji yitimi 139-41
entropi kavramı 41-5
denge 46-8, 147-51
birinci yasa 40-1
Fourier'in evrensel yasası 39-40
dördüncü yasa 140-1
açık sistemler 139-40
faz geçişi 156-7
ikinci yasa 40-5, 47-8
ihlaller 161-2
istatistiksel mekanik 38, 47-51
kararsız denge 73-4
ayrıca bkz. zaman oku

termodinamik 46-8, 52-5, 259-61, 265-6
terrestrial planet finder (TPF) 295-6
ters bağıntı 140-1
ters kare yasası 24-6
Thompson, Benjamin (sonraki adıyla Kont Rumford) 40-1
Thompson, D'Arcy 155-6
Büyüme ve Biçim 155-6
Thomson, William (sonraki adıyla Lord Kelvin)
Thomson etkisi 41-2
topoloji 66-7
cebir 133-4
periyot katlama 134-5
faz uzayı 66-7
torus 111-2
toz parçacığı, kısıtlı üç cisim problemi 66-8, 72-3
trafik tıkanıklıkları, kuvvet yasası davranışı 193-5
Turing, Alan 151-61
ve morfogenez 156-61, 164-70
Turing makinesi 151-5
türbülans
kaos modeli 99-101
periyodik çevrimler 111-4

üç cisim problemi 28-32, 72-3
kestirimler 59-61
kısıtlı 66-70, 72-3, 85-6

van Helmont, Johannes 36-7
Ortus Medicinae 36-7
Van Valen, Leigh 232-3, 240-1
Venus
kızılaltı yayınlar 265-6
eğiklik değişimleri 91-2
yörüngesel değişimler 90-1
Viking Projesi, Mars'a iniş 259
Volterra, Vito 161-2
von Koch, Helge 125
Vostok, Buzul Çağı çeşitliliği araştırması 278-80

Wallace, Alfred Russel 225-6
Watson, Andrew 292-3
Weisenfeld, Kurt 204-5
Wisdom, Jack 86-7

yakınsama, geometrik 110-2
yaşamın ortaya çıkışı
karmaşık sistemlerdeki ağ örgüleri 215-24
yeniden normalleştirme 103-5
yıldızlar
parlak 288-91
GAIA projesi 295-6
yıldızlararası toz ve yeni yıldızlar 286-8
kinetik enerji 150-1
kütle 288-9
nükleer tepkimeler 286
sarmal galaksiler 286-92
süpernova 288-9
yok oluş örüntüleri 197-205, 240-2
Büyük Beşli 199-201
dış etkiler 250-2
Permiyen dönemi 253-4
kuvvet yasaları olarak 203-4, 247-53
ölçekte değişmezlik 200-1, 247-9
Yorke, James 109
"Period Three Implies Chaos" 109
Yorke, Robert 133-4
yörünge mekaniği 27-9
kestirim tekniği 61-2
eliptik izlekler 18-9, 24-6
üç cisim problemi 28-32, 57-8, 72-3

Yucatan etkisi, K-T olayı 198-200

zaman
    tersinirlik 96-7
    ayrıca bkz. zaman oku
zaman oku 24-5, 33, 43, 141-2
    yön 33, 35-7
    entropi 43
    kütleçekim 150-1
    tersinmezlik 44-5
    açık sistemler 139-40
    ayrıca bkz. termodinamik
zebra, post örüntüleri 172-4
Zhabotinsky, Anatoly 162-5
Zipf, George 191-3

JOHN GRIBBIN

DERİN BASİTLİK

Kaos, Karmaşa ve Yaşamın Ortaya Çıkışı

Etrafımızdaki dünya bize oldukça karmaşık ve sürprizlerle dolu görünür; depremler olur, borsada inişler çıkışlar yaşanır, hava durumu çoğu zaman doğru çıkmaz. Bütün bunların bir kuralı var mıdır? Aslında Gribbin bize rastgele gözüken evrenin basit bir neden-sonuç ilişkisinden oluştuğunu açıklamakta. Örneğin neden fren yapan bir sürücü bütün trafiği kitler, neden atmosferdeki çok küçük bir değişimden büyük fırtınalar çıkar ve hatta nasıl olur da bizler cansız maddeden ortaya çıkıp evrimleştik. İşte bütün bu soruların cevabını *Derin Basitlik*'te bulabilirsiniz. Gribbin, kaos ve karmaşıklık kuramlarını sentezleyerek var oluşumuzun gizemlerini açıklamakla kalmıyor, dünya dışı yaşamın izlerini de sürüyor.

"*Derin Basitlik*'teki en büyük süpriz, kaosun karmaşıklığa, karmaşıklığınsa yaşama yol açtığını ortaya koyması."

– *Scientific American*

"Gribbin karmaşıklık biliminin merkezine hayat götürüyor."

– *Nature*

"*Derin Basitlik*'i karmaşıklık üzerine yazılmış diğer kitaplardan ayıran şey, Gribbin'in temel kavramları ele alış biçimi..."

– *Daily Telegraph*

"Gribbin büyük bir başarı ve açıklıkla bizi en temel gerçeklere götürüyor."

– *Sunday Times*

ALFA Basım Yayım Dağıtım
Ticarethane Sokak, No: 53, 34110
Cağaloğlu / İstanbul
T. 0212 513 3420 (pbx)
F 0212 519 3300
www.alfakitap.com

121565
BAZ

BİLİM KAOS
ISBN 978-605-106-778-0
9 786051 067780