

Keyifli Okumalar Dileriz

Binlerce kategoride milyonlarca PDF e-kitap, ders kitapları, dergiler ve romanlara platformumuz üzerinden ücretsiz ulaşabilirsiniz.

RESMİ WEB SİTEMİZ

<https://rantey.org>

Yedek ve Duyuru Kanallarımız

Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

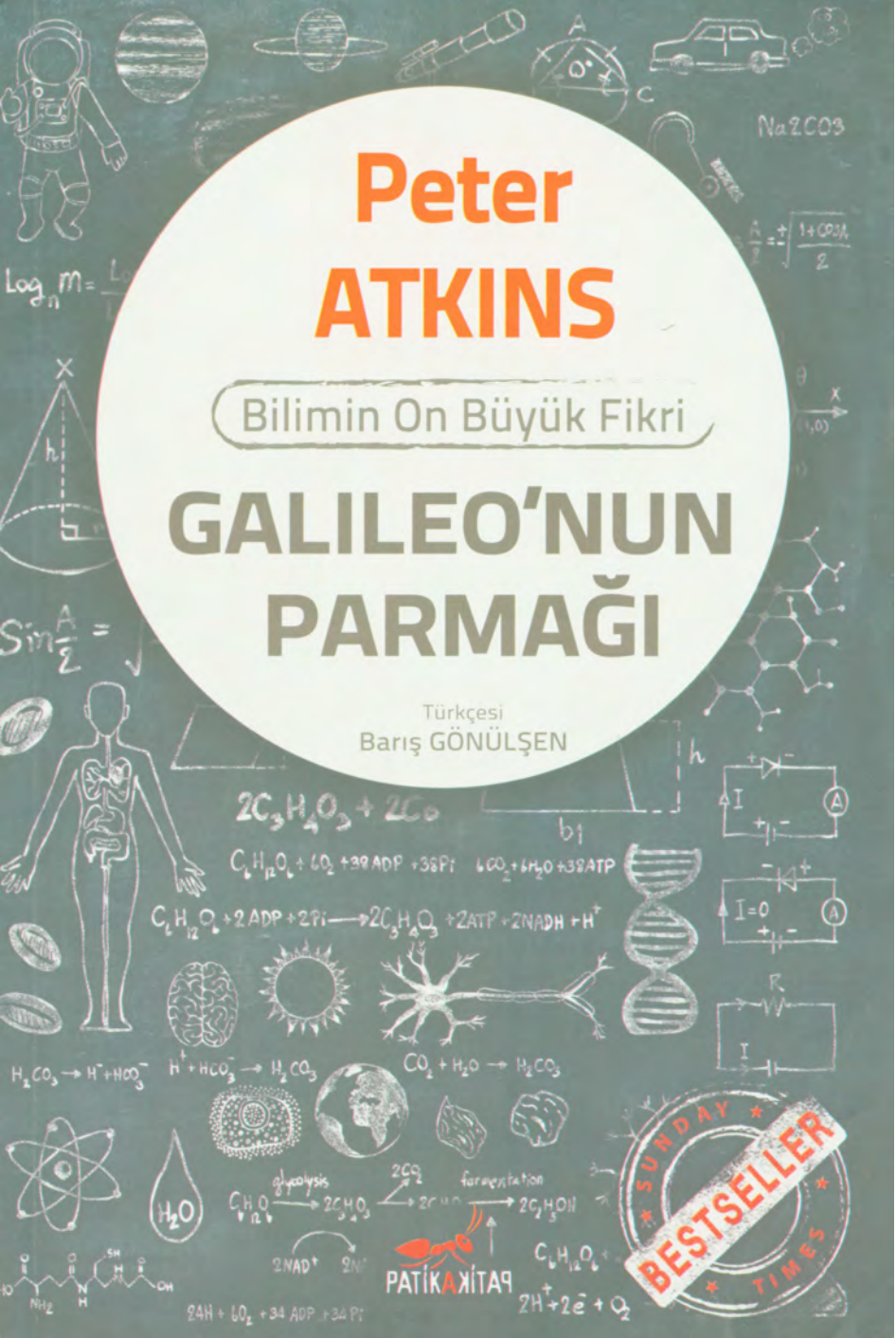
- Telegram: <https://t.me/birkitapbir>
- WhatsApp Kanalımız : <https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4lvMoc0Y>

Peter ATKINS

Bilimin On Büyük Fikri

GALILEO'NUN PARMAĞI

Türkçesi
Barış GÖNÜLŞEN



Peter Atkins

Galileo'nun Parmağı

Bilimin On Büyük Fikri

Türkçesi: Barış Gönülşen



Peter Atkins, Oxford Üniversitesi'nde Lincoln College üyesi kimya profesörü. Dünyaca ünlü bir dizi kimya ders kitabının yazarıdır. Bu kitapların yirmi yılı aşkın süredir dünyada en çok tercih edilen kitaplar olmasının sırrı, onun meseleleri (özellikle de zor kavramları) çok net ve akılda kalıcı bir şekilde açıklayabilme yeteneğinde yatar. Bu yeteneğini kitaplarında genel okura da düzenli olarak sundu (Richard Dawkins bu kitaplardan biri olan *The Creation*'ı "şimdiye kadar yazılmış en güzel popüler bilim kitabı" olarak niteledi) ama *Galileo'nun Parmağı* içlerindeki en büyük etkiyi yaratanı oldu.

Barış Gönülşen, 1974 yılında İzmir'de doğdu. İzmir Bornova Anadolu Lisesi Almanca bölümü ve Ortadoğu Teknik Üniversitesi İktisat bölümü mezunudur. Zamanın Kısa Tarihi (S. Hawking), 101 Soruda Kuantum (K. Ford), Son Moda Saçmalar (A. Sokal & J. Bricmont), Bilim Tarihi (John Gribbin), Yıldızlararası Bilimi (Kip Thorne), Zihnin Gölgeleri (Roger Penrose), Matematik Sembollerinin Kısa Tarihi (Joseph Mazur) gibi çok sayıda bilim kitabının çevirmenidir.

Peter Atkins

Galileo'nun Parmağı, Bilimin On Büyük Fikri

Galileo's Finger, The Ten Great Ideas of Science

© 2017 Patika Kitap - © 2003 Peter Atkins

Patika Kitap: 27 • Bilim: 02 • Yayıncı Sertifika No: 26829

ISBN: 978-605-83783-7-7

Birinci Basım: 2017

İngilizce Aslından Türkçeleştiren: Barış Gönülşen

Dizgi: Aras ALADAĞ

Kapak: Hakan GÖLÜNÇ

Baskı: Kayhan Matbaacılık

Bakır ve Pirinç Sanayicileri Sitesi, Orkide Cad. No: 9 Haramidere

Beylikdüzü/ İSTANBUL • Tel.: 0212 612 31 85 • Sertifika No.: 12156

Bu kitabın telif hakları AnatoliaLit Ajans tarafından alınmıştır.



• www.facebook.com/PatikaKitap



• www.twitter.com/patikakitap



• www.instagram.com/patikakitap



• info@patikakitap.com.tr



• www.patikakitap.com.tr

Peter Atkins

Galileo'nun Parmağı

Bilimin On Büyük Fikri

Türkçesi: Barış Gönülşen



**Bu kitabın yayınlanmasındaki katkılarından dolayı Medet TURAN'a
teşekkür ederiz.**

“Atkins mevcut kavrayış düzeyimizin nefes kesici bir değerlendirmesini yapıyor.”

John Maddox, Times Edebiyat Eki

“Tutkulu ve çekici bir kitap”

Nature

“...Konu önemli olmasına rağmen, bu Atkins’in yazar ve eğitmen olarak yeteneklerinin önemli bir göstergesi. Atkins karmaşık ilkeleri çok açık hale getirme hünerine sahip... Bu kitap, bilimi hep daha derinden kavramak istemiş ama nereden başlayacağını bilememiş, bilimin dışından zeki insanlar için mükemmel bir rehber.”

Mark Henderson, The Times

“[Atkins] en büyük bilimsel fikirleri... güvenilir bir biçimde açıyor.”

The Independent

“... kozmolojiden, atomaltı “kuantum” diyarlarından, hayatın evriminden ve matematiğin hem doğanın bütünündeki hem de insan zihnindeki öneminden geçen derin bağlantıları alışılmadık bir netlikle açıklıyor. Bilim alanı dışından okurlara bu konuların derli toplu bir aktarımını yapmak zaten yeterince zor. Fikirlerin uyandırdığı heyecan, doğurduğu karmaşa ve drama duygusunu aktarırken büyük bir senfoninin orkestra şefliğini yapmayı başarmasıysa büyük bir başarı. Bilim ve matematiğe genel bir bakış sahibi olmak isteyen herkesin eline bu kitabı tutuşturmak istiyorum... Bu kitap, doğanın bize sunduğu olağanüstü simetri, incelik ve gizeme panoramik bir bakış yönünden en iyi işlerden biri.

John Cornwell, Sunday Times

“...Genel okurun modern bilimin esaslarını anlaması için gereken her şey. Önemli her şey var burada... Bilim insanı değilseniz de okumalı mısınız? Evet... işlenen malzemenin genişliği ve özgünlüğü açısından Galileo’nun Parmağı gerçek bir model ve bildiğim kadarıyla böylesi başka bir yerde yok.”

Times Yüksek Öğrenim Eki

“Gözüpek ve iddialı... Doğanın yapısı ve içindeki derin bağlantılar sizi huşu içerisinde bırakacak.”

Toronto Globe and Mail

“Muhteşem kitap... Bölümler o kuru İngiliz mizahı ve neredeyse şiirsel düzyazıyla demlenmiş. En sevdiğim cümlelerden biri atom fikri hakkındaki bölümdeydi. “Tablonun malzemesi matematiktendi.” Daha önemlisi Atkins asla sabrını kaybetmiyor ve zihinsel açıdan zorlu bir kavram çıktığında “gösterilebilir” klişesine sığınarak onun etrafından dolaşmıyor. Gösteriyor.”

The Tennessean

“Bu kitap bilimin sağladığı temel yaklaşımlar açısından değerli ve aydınlatıcı bir rehber”

Physics World

“Atkins sadece ilgi çekici parçaları değil, bilimin tümünü halka indirmeye girişen son derece akıcı ve anlaşılır bir bilim kitabı ürettiği için alkışlanmalı.”

Chemistry in Britain

“Batı bilimsel düşüncesine rahat anlaşılan, bilgilendirici bir giriş”

Science News

“Atkins’in kitabı popüler bilim alanında şu ana dek karşılaşılan en aydınlatıcı ve yaratıcı girdilerden biri. Atkins’in yazdıklarının sayfalara hapsi zor; kişiyi zenginleştiren, aydınlatan örnek [bir] çalışma.”

Good Book Guide

“Rahat anlaşılır ve tatlı, bu kitabı okuyarak modern bilim okuyabilme yetisi kazanacaksınız.”

Publishing News

“Çok sayıda sade çizimle süslenmiş, kolay anlaşılan, hoş bir yazı dili kullanarak Atkins matematiksel birikime sahip olmayan okurlarına bilimsel disiplinlerin derin kavramsal temellerini aktarmayı genellikle nefis başarıyor... Zarif stili, çok geniş kapsama alanı ve kafa karıştırıcı muğlaklıkların nadir görülen bir yüksek oranla aydınlatıcı şekilde açıklanması bu kitabı kendi türünün en iyilerinden birisi yapıyor.”

Publishers Weekly Online

“Peter Atkins meslekten bilimci olmayan bizlere modern bilimin rönesansının başlangıcından bu yana geçen 500’ü aşkın yılda ortaya çıkmış en ilgi çekici, önemli ve genel anlamıyla karmaşık bilimsel kavramlardan bazılarını kavrayabilmek için büyük bir fırsat veriyor.”

Amazon.co.uk

İçindekiler

ÖNSÖZ: ANLAMANIN ORTAYA ÇIKIŞI 11

1) EVRİM: KARMAŞIKLIĞIN ORTAYA ÇIKIŞI 17

2) DNA: BİYOLOJİNİN RASYONALİZASYONU 65

3) ENERJİ: HESAPLANABİLİRLİĞİN EVRENSELLEŞMESİ 109

4) ENTROPİ: DEĞİŞİMİN KAYNAĞI 139

5) ATOMLAR: MADDENİN İNDİRGENMESİ 171

6) SİMETRİ: GÜZELLİĞİN NİCELİKSELLEŞMESİ 205

7) KUANTUM: ANLAMANIN BASİTLEŞMESİ 253

8) KOZMOLOJİ: GERÇEKLİĞİN KÜRESELLEŞMESİ 297

9) UZAYZAMAN: EYLEM SAHNESİ 343

10) ARİTMETİK: AKLIN SINIRLARI 391

SONSÖZ: ANLAMANIN GELECEĞİ 443

DİZİN 461

ANLAMININ ORTAYA ÇIKIŞI

Neden onun parmağı? Galileo bilimsel çalışmanın yeni bir doğrultuya girdiği, bilim insanlarının (elbette bu o dönem henüz kullanılmayan bir kavramdı) koltuklarından kalktığı, evrenin doğasına eğilme konusunda otoriteyle uyumlu düşünme yolunu izleyerek gösterdikleri önceki çabalarının yeterliliğini sorguladığı ve modern bilime giden yolda ilk tereddütlü adımların atıldığı dönüm noktasına işaret eder. Onlar bu süreçte test edilmemiş otoriteyi reddettiler, her ne kadar henüz oturulan koltuktan yapılan derin yorumları ve iç yolculukları tümüyle terk etmemiş olsalar da, herkesin önünde doğrulanabilir bir nitelik taşıyan deneysel gözlem yöntemiyle yeni ve çok daha güçlü bir ittifak geliştirdiler. Bu yönden şu anki bilimsel birikimimizin her yerinde Galileo'nun parmağı olduğunu görüyoruz. Parmağını soktuğu ilk yer olan fizikte, 19. yüzyılın başında kendi yolunu bulan kimyada ve özellikle 19 ve 20. yüzyıllarda artık salt bir merak kaynağı olmaktan çıkan biyolojide hep onun parmağına rastlıyoruz.

Kısacası bu kitap Galileo'nun gerçeklerin açığa kavuşturulmasındaki etkisine sembolik olarak parmağı üzerinden saygıyla atıfta bulunmaktadır. Yöntemlerinin serpilip gelişmesine rağmen, Galileo'nun fiziksel anlamıyla sadece parmağının korunabilmiş olması da, bilginin ölümsüzlüğü karşısında kişisel varoluşun faniliğinin sembolik ifadesidir. O halde Galileo'nun parmağı, hepimizin belli belirsiz bildiği o kavramı, "bilimsel yöntemi" temsil etmektedir. Galileo bilginin keşfine yönelik bu yaklaşımı geliştirirken tek başına olmadığı gibi, bu yola çıkan ilk kişi de değildi elbette, fakat düşünce tarihinde yöntemin ilk ortaya çıkışının sembolü olarak kabul edilecek kadar da öne çıkan birisiydi.

Bilimi ezeli rakibinden (yani tumturaklı şekilde ifade edilmiş atıl düşünce ve spekülasyondan) ayırt eden, dünyanın gerçeklerinin açığa çıkarılmasında şaşırtıcı ölçüde etkili bu yöntemin bir yönü de deneyin merkezde yer almasıdır. Dışarı çıkıp dünyanın

içerisine girmek ve dikkatle kontrol edilen koşullar altında gözlemler yapmak, algımızın öznel yanını minimize etmekte ve gözlemleri ilkesel anlamda halkın denetimine açmaktadır.

Galileo yalınlaştırma sanatının gelişimini de sağladı; gerçek hayatta kendi teleskobunu kullanarak göklerdeki karmaşıklığı nasıl görüyorsa, aynı şekilde bir problemin ana düğüm noktalarının tespitiyle beraber gerçek sistemlerin altında yatan basitliği, kendi düşüncesinde onun üzerini örten bulutları aralayarak bulmayı başardı. O çamura saplanmış, çekilirken gıcırdayan at arabasını bir kenara bıraktı; bunun yerine eğik düzlemde yuvarlanan bir topun, yüksek bir dayanaktan aşağı sallanan bir sarkacın basitliğini düşündü. Ana olgunun gerçekliğinin gıcırtilarından, akıl karıştırmalarından yalıtılması bilimsel yöntemin ayırt edici noktalarındandır. Bilimciler istiridyedeki inciye görür, değerli ile değersiz ayırt etmeyi becerirler.

Kimileri de burada bir zayıflığın yattığını iddia eder. Onların iddiasına göre gerçek anlama, gerçekliğin yontulmamış gürültü patırtısının kıymetinin bilinmesinden gelir: Arabalar batağa saplanır, âşıklar ağlar, cümbüşler kopar. Onlar bilimcilerin yaşamın mekanizmasını anlamak için bir kelebeği incelemesinin anlamaktan kaçmak anlamına geldiğini iddia ederler. Bu itirazı kafadan reddetmememiz, geniş açıdan bakmamız gerekir. Bilim insanlarının çoğu, insan olma hasebiyle, duyarlılığın dünyayla etkileşimimizin harika bir bileşeni olduğunu teslim eder, fakat pek azı bunun gerçeğe ulaşmada güvenilir bir yol olduğunu kabul eder. Dünyanın ve evrenin müthiş karmaşıklığını çözmeyi, her bir parçasını ayırık olarak ele alıp sırayla incelemeyi ve daha derin bir kavrayışa ulaşarak ellerinden gelen en iyi şekilde tekrar bütünleştirmeyi tercih ederler. Bir topun eğik bir düzlemdeki hareketini yokuşu çıkan at arabasını anlamak için inceler; sarkaç üzerine çalışmalarını bir sporcunun bacağına hareketini anlamak için yürütürler. Muhafifler titreşim fiziğinin anlaşılmasının müzikten alınan hazzı açıklamadığını, bir senfoniye paramparça edip bir nota çantasına tikiştirmenin onun kompozisyonunu anlamanın canına okuduğunu söyleyerek feryat figan eder. Bilimci buna önce notanın ne olduğunu anlamak zorunda olduğumuz, ardından neden bazı akorların uyumlu bazılarının

uyumsuz olduğunu anlamamız gerektiği ve ancak sonra (bu süre on yılları bulmasa da) bir akor diziliminin psikolojik ve sanatsal etkisini anlamaya çalışabileceğimiz yanıtını verir. Bilim anlamada tamlığı hedefler, nihai hedefi asla gözden kaçırmaz ve sabırsızca yarım yamalak sonuçların peşinde koşmaz. Bilimcilerin bizim dünyayı kavramaktan, onun üzerinde yaşamaktan aldığımız hazzı ve felsefecilerin, sanatçıların, peygamberlerin ve ilahiyatçıların kendi alanlarına girdiğini düşündüğü diğer büyük soruları acaba hiç kavrayıp kavrayamayacakları, atıl düşünce ve spekülasyonun konusudur. Geçmişte bunun ne kadar faydalı olduğunu da hepimiz bilmekteyiz.

Büyük fikir ifadesiyle kastım, büyük bir erişime ulaşmış olan basit bir kavramdır. Benzetmelerden gidersek, uygulama alanı büyük bir meşe ağacıysa onun dalındaki bir fikir palamodu, büyük bir ağ örebilen bir fikir örümceği, bir açıklama ve aydınlanma eğlencesi sırasında içilen ottur. Seçici davranmam gerekiyordu ve elbette başka kimselerin ağız sulandıran başka bilim sineklerini yakalayacak süper örümceklerle karşımıza çıkabileceğinden de hiç kuşku yok. Sonuçta buradakiler benim seçimlerimdir.

Uygulamalardan ziyade fikirlere odaklandım. Kara delikler ve uzay yolculuğu hakkında çok az kalem oynattım ve şu an bilgi teknolojileri ve hesaplama alanında deneyimlediğimiz açıklama paradigmalarındaki harika değişim ve kayma konusuna (Sonsöz hariç) hemen hemen hiç değinmedim. Amacım aydınlatıcı nitelik taşıyan ve çoğu durumda teknolojik ilerlemeye temel sağlayan *fikirleri* saptamak oldu. Entelektüel açıdan Galileo'nun takipçiliği iddiasında olan Freeman Dyson *kavrama dayalı bilim* ile *alete dayalı bilim* şeklinde bir ayrıma gider. Benim anlatımımın neredeyse tümü kavrama dayalıdır. Dyson bu ayrımda bize bir başka seçkin düşünürü de hatırlatıyor: Francis Bacon fikirleri *fructifera* (meyve getirenler) ve *lucifera* (ışık getirenler) şeklinde sınıflandırmıştı. Ben ikincilere odaklanıyorum. Moleküler biyolojinin ve DNA'nın yapısının bilinmesinin sonuçlarının *lucifera* mı *fructife-*

ra mı olduğu, bunların kavrama dayalı mı alete dayalı mı oldukları, dolayısıyla bu kitaba dahil edilip edilmemesi gerektiği; açıkçası bunlar tartışmalıdır. Yukarıdaki üç soruda da ilk söylenen görüşte karar kıldım, çünkü kavrayışımıza ve uygulamalarımıza biyoloji kadar katkıda bulunmuş ikinci bir keşif yoktur ve bunu dışta bırakmak saçma olurdu. Kimbilir belki de moleküler biyoloji *lucifera* ve *fructifera*'nın birleşerek emsalsiz bir dinamizm kazandığı bilim dalıdır.

Bilimsel anlatımların okunuşu, olayların basit doğrusal tarzda geliştiği bir romanın okunuşundan farklıdır. Bilimsel bir fikri anlamak için, ilk başta fazla zahmetli veya (ağzımızı hayra açalım) fazla sıkıcı gözükken bölümleri atlayarak hızlıca okumak ihtiyacı duyulabilir. Hatta, her ne kadar sunumda sıralı doğal bir dizilişin, karanlık temellerden tanıdık olanın gün ışığına doğru tırmanma veya tanıdık olandan daha temelde yatana doğru derinleşerek inme gibi (ben ikincisini benimsedim) olduğunu düşünsem de, her bölüm bağımsız olarak da ele alınabilir ve istenen sırayla okunabilir.

Akılda tutulması gereken ikinci yön, modern bilimi karakterize eden soyutlama eğilimidir. Soyutlama Galileo'nun parmağının bir diğeri önemli tarafıdır ve onun oynadığı role ve taşıdığı öneme dikkat etmeliyiz. Birincisi soyutlama kullanışsız değildir. Soyutlama çok büyük bir pratik önem taşıyabilir, çünkü olgular arasında beklenmedik bağlantılara işaret eder ve belli bir alanda geliştirilmiş fikirlerin başka bir alanda kullanılmasına olanak sağlar. Daha önemlisi, soyutlama gözlem kümesinden uzaklaşarak onları daha geniş bir bağlamda görmenin de bir yoludur. Bilimdeki ve bilim okumalarındaki en tatmin edici *eureka!* anlarından biri, okyanusları tek bir büyük bütün olarak birleştir şekilde görmenin ve daha önce bambaşka şeylere benzeyen olgular arasındaki bağlantıyı fark etmenin Cortez'e benzer¹ deneyimidir.

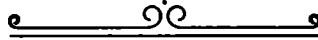
1 **Hernán Cortés:** 1485–1547 yılları arasında yaşamış, Meksika'yı keşfeden İspanyol denizci; Azteklerle karşı uyguladığı soykırımla da tanınmaktadır. –ç.n.

Benim amacım da, bilimin çetin doruklarına yapacağımız bu yolculuğun sonunda bu müthiş tatmin edici birleşme deneyimini yaşayabilmemiz ve aşama aşama ilerledikçe artan soyutlamanın zevkine varmamızı sağlamaktır. Bu yüzden ilk önce maymunlar ve bezelyelerle başlayacak, oradan atomlara geçecek ve güzelliğe girecek, ardından uzayzamanı aşır soyutlamanın müthiş zirvesi matematikle bitireceğim. Bölümleri sırayla okursanız her bir bölümün ardından daha önce aktarılanları daha derinden kavradığınızı fark edeceksiniz.

Belki biraz zorlayıcı ama sonunda çok tatmin olacağınız bir yolculuğa çıkmak üzereyiz. Bilim Rönesans ruhunun yüce amacı, insan ruhunun ve minik insan beyninin kavrama gücünün ürünü olağanüstü bir eserdir. Yolculuk ilerledikçe, anlamanın zirvesine dikkatle ulaştırma çabam esnasında öncelikli dileğim, sizlerin sadece bilimin sağlayabildiği o derin aydınlanma keyfinin deneyimini yaşamanızdır.

1 EVRİM

KARMAŞIKLIĞIN ORTAYA ÇIKIŞI



BÜYÜK FİKİR

EvrİM doğal seçim yoluyla ilerler



Biyolojide evrimin ışığı olmaksızın hiçbir şey anlaşılamaz.

THEODOSIUS DOBZHANSKY

Yaşam o kadar değerli bir şeydir ki çok uzun zaman boyunca onun özel olarak yaratılmış olması gerektiği düşünüldü; zira bu kadar harika ve bu kadar özel bir şey nasıl olur da yaşamsız balçıktan kendiliğinden ortaya çıkabilirdi? Gerçekten de şeylere yaşam bahşeden kritik bileşen nedir? Bunun gibi çok önemli sorulara verilen yanıtlar iki dalga halinde ortaya çıktı. Birincisi deneyci açıklama dalgası oldu; gözlemciler, çoğunluğu 19. yüzyıldaki doğabilimciler ve yerbilimcilerdi, doğanın dışı doğru olan biçimlerini araştırdılar ve geniş kapsamlı sonuçlara ulaştılar. Sonra ikinci dalga geldi; 20. yüzyılda bilimsel gözlü köstebekler kaza kaza dış görünüşün altına ulaştılar ve yaşam ağının moleküler temelini keşfettiler. Bu yaklaşımların birincisi bu bölümün konusudur; canlı olmanın ne anlama geldiği konusundaki anlayışımızı müthiş şekilde zenginleştiren ikincisi de sonraki bölümün konusu olacak.

Antik Yunan filozofları yaşayan şeylerin doğası hakkında her zamanki gibi kendi özgün fikirlerine sahiptiler ve iyi niyetli açıklamalarının çoğunda olduğu gibi yine tümüyle ama çok cazip bir şekilde hatalıydılar. Örneğin tanrı olma iddiasındaki Empedokles (yaklaşık olarak MÖ 490-430) kendisini Etna Yanardağı'nın içine atarak tanrısallığını ispatlamayı –akıllıca sayılamayacak şekilde– seçmesinden kısa süre önce, hayvanların çeşitli kombinasyonlarla birleşerek fil, sivrisinek, kertenkele ve insan sonucunu veren evrensel parça takımlarından oluşmuş olduklarını ileri sürdü. Dünyada balık kuyruklu merkepler ve uçan domuzların değil de bu aşına olduğumuz kombinasyonların yerleşmiş olmasının nedeni de yalnızca belli bazı kombinasyonların yaşayabilecek durumda olmasıydı. Doğa herhalde *The Island of Doctor Moreau*'dan önce davranarak başka kombinasyonları denemiş, ama kısa süren bir aksama, sallanma veya yuvarlanmanın ardından bu deneysel canlılar nalları dikerek ölmüş olmalılar.

Moleküler düzeyde yaklaşık olarak iki bin yıl sonra aynı görüş, organizmaların bugün bizim organik moleküller adını verdiğimiz şeylerin yığılmasından kendiliğinden ortaya çıktığını düşünen Comte de Buffon, George-Louis Leclerc (1707-1788) tarafından tekrarlandı. Buffon fena düşünmezdi: 1749 yılında yayımlanmaya başlayan başyapıtı *Histoire naturelle, générale, et particulière*'in elli cilt olması planlanıyordu; bunlardan tamamladığı otuz altı cildin dokuzu kuşlara, beşi minerallere ve (ölümünden sonra yayımlanan) sekizi memeli deniz hayvanları, sürüngenler ve balıklara ayrılmıştı.

Peki ama tüm bu canlı varlıklarnereden geliyordu? Acayip fazla sayıdaydılar, birkaç milyon tür kayıt altına alınmıştı ve henüz daha tahminen 10 milyonu veya daha fazlası tespit edilmeyi bekliyordu. Aristoteles entelektüel açıdan o muhteşem verimliliği ve alışıldığı üzere muhteşem yanlışlığıyla hayvanların yıldızlardan düşmüş olduğuna ve kendiliğinden, tamamen oluşmuş halde vücuda geldiklerine inanıyordu. Amazon havzasındaki Yahuna Yerlileri neo-Aristotelesçi bir yaklaşım geliştirerek manyokun¹

1 “Doktor Moreau’nun Adası”, İngiliz yazar H. G. Wells’in 1896 yılında yayımlanan bilimkurgu romanı –çn.

2 Manyok (*Manihot esculenta*) Amerika’da yetişen ve kökünde bol miktarda nişasta bulunduğu için yerlilerin beslenmesinde büyük önem taşıyan bir bitki –çn.

öldürülenlerin küllerinden yetiştiğini düşündüler ve *Milomaki*'yi yaktılar. Kaliforniya'daki Cahuilla Yerlileri de benzer bir inanca sahipti; şaraplar kaynağını yakılan midesinden, karpuzlar gözbebeklerinden ve mısırlar da dişlerinden alıyordu. Kabul görmesi daha zor olsa da, buğdayın kaynağı onun bitlerinin yumurtalarının külleri ve fasulyenin kaynağı da menisiydi.

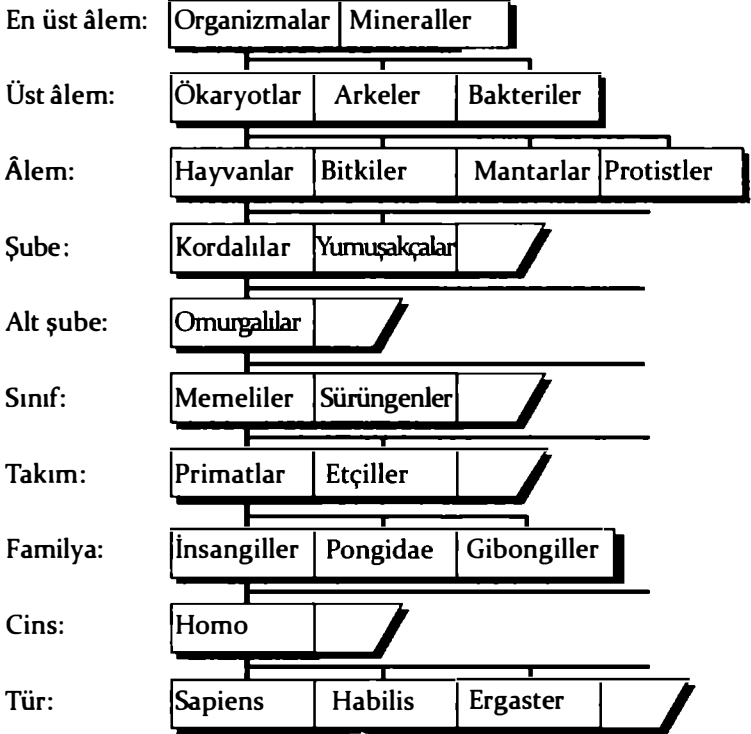
Başka dinler de benzer basit açıklamalara gittiler; bütün canlılar büyüğüyle küçüğüyle bir tanrı tarafından yaratılmıştı ve konu kapanmıştı. Fakat kilise rahiplerinden bazıları bile İncil'deki açıklamaların hepsini kabul etmekte zorlanıyordu. Aziz Nenezili Gregor (yaklaşık olarak 330–389; Nenezili ya da Nazianzus Anadolu'da Kapadokya civarında bir yerd) örneğin Tanrı'nın bazı türleri de Nuh Tufanı'ndan sonra yaratmış olsa gerektiğini düşünüyordu, çünkü bütün türlerin temsilcilerine ev sahipliği yapamayacak kadar küçüktü.³ Csarlile Başdiyakozu William Paley (1743–1805) 1802'de yayımladığı kitapta canlıların kökenini tartışmasız netlikte tespit ettiğini düşündü ve dürüst bir tutumla kitabına *Natural theology, or evidence for the existence and attributes of the deity collected from the appearances of nature* [Doğa Teolojisi ya da Tanrının varlığının doğanın görünümlerinden toplanan kanıt ve göstergeleri] adını verdi. Kitabındaki ünlü analogide bir saatle karşılaşan yolcu, saatin karmaşık tasarımına dikkat eder ve bunun arkasında bir saat tasarımcısı olduğundan kesinlikle emin olur. Bu nedenle doğanın karmaşıklıklarıyla karşılaşan herkes kaçınılmaz olarak Tanrı'nın onun tasarım ve inşasından sorumlu olduğu sonucuna varmak zorundadır. Öte yandan Batı felsefesinin yükselişe geçişine ilk katkıda bulunanlardan Miletli Anaksimandros (yaklaşık olarak MÖ 610–545) aslında tamamen spekülâtif biçimde ve kendisinin, Thales'in ve Anaksimenes'in varlıkları ve genel anlamıyla varlığı açıklayan felsefi programının bir parçası olarak hayvan türlerinin birbirlerine dönüşebileceğini söylerken, gerçeği bir ucundan yakalamıştı.

Bilimde sık sık gördüğümüz gibi, hayal ürünü spekülasyona değil de gerçeği anlamaya giden yolun ilk adımı veri toplanmasıdır ki bu durumda bu, biyosferi oluşturan organizma türlerinin

3 Sarı ağaçtan yapılmış geminin boyu 300 cubit (140 metre), eni 50 cubit (23 metre) ve yüksekliği 30 cubitti (13 metre); cubit, kolun dirsekten parmak uçlarına kadar olan uzunluğuydu ve yaklaşık 45 santimetreydi.

hepsinin ya da en azından sabır, ısrar ve hazırlığın elverdiği kadar çoğunun tespit edilip sınıflandırılması anlamına gelir. En faydalı isimler ilişkileri belirtenlerdir; aile üyelerinin soyadlarını resmi olarak taşımaya devam etmesi buna örnektir. 18. yüzyılın ortalarına gelindiğinde uluslararası deniz ticaretinin yaygınlaşmasıyla evinde oturan tipler bile dünya üzerinde organizmaların ve tuhaf şeylerin sayıca çokluğunu duymuş ve inek, köpek gibi basit isimlerin yetersiz olduğunu, tıpkı Laponya'da oturanların kullandıkları dilin Uganda'da yetersiz olduğunu bilmeleri gibi bilir hale gelmişti. Evrensel kabul gören ilk adlandırma ya da sınıflandırma sistemi İsveçli botanikçi Carl von Linné (1707-1778), isminin Latince haliyle daha fazla tanıdığımız Linnaeus tarafından geliştirildi. Linnaeus adlandırma sistemini 1735'te basılan *Systema naturae* eserinde duyurdu; bitkilerin sistematik adlandırılmasının da onun 1753 tarihli *Species plantarum* adlı eserine dayandığı kabul edilir. Bu çalışmalarında Linnaeus bizleri üyelik hiyerarşisiyle tanıştırdı (Şekil 1.1); üstte en üst âlem olmak üzere piramit şeklinde şube, sınıf, takım, familya, cins ve tür biçiminde aşağıya indikçe daha belirginleşecek şekilde genişler. Şema o günden bugüne araya alt familya, üst familya gibi çeşitli katmanlar eklenerek geliştirilmiştir. Bu durumda biz insanların sınıflandırması (hâlâ bazı kimselerce tartışılıyor olması ironik olsa da) şöyledir: *Homo sapiens* türü olarak *Organizmalar* en üst âleminden geliyoruz ve *Ökaryotlar* üst âleminin *Hayvanlar* âleminde, *Kordalılar* şubesinin *Omurgalılar* alt şubesinde, *Dört üyeliler* üst sınıfının *Memeliler* sınıfında, *Eteneliler* alt sınıfının *Primatlar* takımında, *Asıl maymunlar* alt takımının *Eski Dünya maymunları* veya *Dar burunlu maymunlar* deneni infra takımında, *İnsansılar* veya *İnsansı Maymunlar* üst familyasının *İnsangiller* veya diğer adıyla *Büyük insansı maymunlar* familyasındaki *Homo* cinsinde yer alıyoruz.

Linnaeus sistemindeki yetersizlik, bilimsel anlamıyla daha uygun olacak olan altta yatan ilişkiler yerine benzerliklerin tespiti dayalı olmasıdır. Üstelik sınıf, şube vs tanımlamaların kesinliğinin sağlanması zordur ve aslına bakarsanız özel derinlikte bir önem de taşımaz. Bilimsel sınıflandırmada günümüzde geçerli akım *Kladistik* adlı (*klados* Yunancada yeni filizlenmiş dal anlamına gelmektedir) organizmaların kökenini dikkatle inceleyerek



Şekil 1.1 Linnaeus sınıflandırması özgün halinde sekiz kademelidir (üst âlem, âlem, şube, sınıf, takım, familya, cins, tür) ve hafif Roma ordusunu andırır şekilde düzenlenmiştir. O zamandan bu yana sınıflandırma ağacına çok sayıda ara kademe eklenmiştir, bunlardan birkaçı yanda da görülüyor. Bu sınıflandırma ağacı insanların genişletilmiş Linnaeus sisteminde nereye oturduğunu göstermektedir. Belirli bir kategorik sınıflandırma düzeyinin bir üstteki kategoriden kaynaklanan kategorilerden sadece bazılarını gösterdiği durumlarda, sıra kesik bir üçgen şeklinde sonlanmaktadır. Sınıflandırma şeması düzeylerin hemen hemen hepsinde tartışmalıdır: Örneğin (bakterileri de o kademeye dahil ederek) beş âlem şeklinde düşünmeyi tercih edenler vardır.

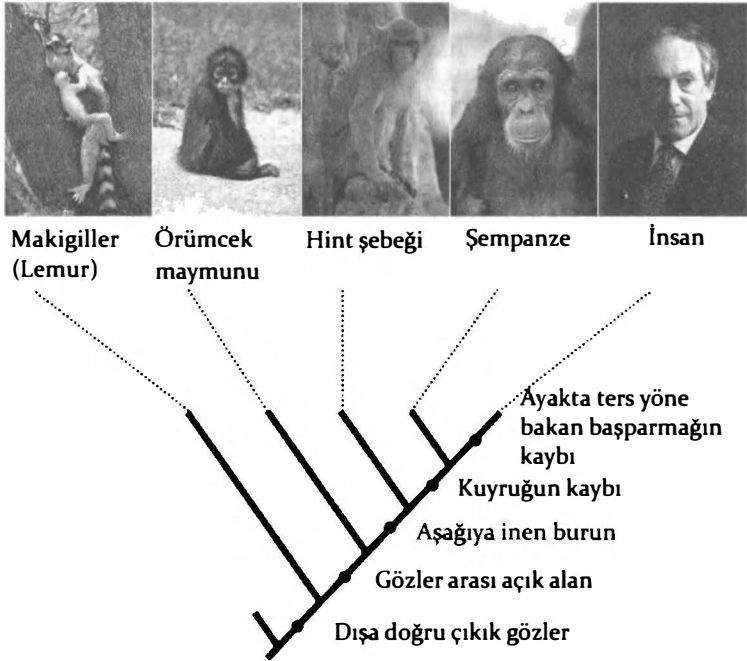
ortak bir soya bağlayan ve yaşam ağacının farklı dallarını ya da kladlarını tespit eden yaklaşımdır (Şekil 1.2). Kladistiği ilk kez Alman taksonomist (sınıflandırma bilimcisi) Willi Hennig (1913–1976) ortaya attı ve *Phylogenetic systematics* (1966) adlı eserinde işledi. Hennig’e göre sınıflandırma, jeneolojik (soy bilimsel) ilişkileri yansıtmalı ve organizmalar ortak bir atadan kalıtım yoluyla edindikleri temelinde katı bir biçimde gruplandırılmalıydı. Şemalarında gündelik dildeki kelimeleri kullanma konusundaki tasa düzeylerini “spin” (dönme), “çeşni” gibi örneklerle sergileyen kuramsal fizikçilerin aksine Hennig taksonominin sırtına Yunancayı yükledi ve kladistik simplezyomorfiler (birden çok canlı tarafından taşınan ayırtedici özellikler), sinapomorfiler (paylaşılan sonradan evrimleşmiş özellikler) ve benzerleriyle uğraştı; şansımıza biz çoğunlukla Linnaeus sistemini kullanacağımız için bu yorucu dille uğraşmayacağız.

Fakat hemen tartışmanın devamında, daha yeni sınıflandırma sistemlerinde de sorun yaratan temel bir problemle karşı karşıya kalıyoruz: *Tür* dediğimizde kastettiğimiz şey nedir? Bugün bile kavramın kesin tanımı konusunda tartışma yaşıyor. Aslında savların pratik önemi fazla değil ama kavram, türlerin kökeni konusundaki tarihi savlarda o kadar merkezi bir yer tutuyor ki kısa da olsa değinmek durumundayız. Aslına bakılırsa “tür” kavramının doğası gereği belirsiz olduğu tespitiyle evrensel anlamıyla geçerli bir tanım geliştirmenin olanaksızlığını kabul etmek ve ille de bir kutuya sığıştırabilmek için uygunsuz katı sınırlar koymamak daha iyi bile olabilir.

Tür tanımlarından *tipolojik taksonomistler* olarak adlandırılan kişilerce kabul edilen sağduyulu olanına göre tür, başka bir organizma grubundan farklı gözüken (yani belirlenebilen morfolojik ayırıcı özelliklere sahip olan) bir organizma grubudur. Platon da *eidos* kavramını hemen hemen aynı şekilde içeriklendirirdi; edimsel varlıklarca ancak kusurlu şekilde tasvir edilebilen “kusursuz form”, bir ideal, gerçek öz. Bir serçeyi karatavuktan “belirlenebilen morfolojik ayırıcı özellikleri” aracılığıyla ayırt etmekte ve bunları farklı kuş türleri olarak değerlendirmekte pek fazla sorun yaşamayız. İki canlının esasen “kuş olma” halini fark etmekte ve bunun bir turbun “bitki olma”sından farklı olduğu-

nu görmekte zorluk çekmediğimizi düşünürüz ve birinin “serçe olma”sını diğerinin “karatavuk olma”sından ayırabiliriz.

Biraz daha derinlikli bir tanım *biyolojik tür kavramı*’dır; burada tür kendi içinde üreyen ve benzer diğer gruplardan üreme açısından yalıtık bir organizma grubu olarak tanımlanır. Bu yaklaşıma göre tür, gayretli bir üreme faaliyeti görülen izole edilmiş bir adadır ve bu yönden Mikonos’un yaz aylarındaki durumuna benzemez. Bu tanım kendi içlerinde yavrulayıp karşılıklı olarak çiftleşmedikleri için serçe ile karatavuğu farklı türler olarak



Şekil 1.2 Kladistik sınıflandırmada *kladogram* adı verilen bir ağaç aracılığıyla önem taşıyan her bir özgün özelliğin ortaya çıkışı dallara ayrılarak gösterilir. Buna göre sınıflandırma paylaşılan sonradan evrimleşmiş homolojiler olan *sinapomorflar* temelinde yapılmaktadır; *homoloji* ise ortak bir atadan kalıtımla alınmış ayırıcı özellik anlamına gelmektedir. Bu kladogramda insanlar şemaya uygun olarak gösterilmektedir.

kabul eder. Üremede yalıtım çok farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Örneğin organizma grupları coğrafi olarak yalıtık olabilir (evrim düşüncesinin tarihinde adaların taşıdığı önemin bir nedeni de budur) ya da yılın farklı zamanlarında yavrularlar. Gruplar birbirini itici bulabilir (en azından çekici bulmayabilir) ya da birbirlerine şehvet duymalarına karşın ilişkiye girmek fiziksel anlamda can acıtıcı biçimde olanaksız olabilir.

Kalıtım mekanizmasının ayrıntılı olarak bir sonraki bölümde ele alınacağını belirterek, şimdilik her türün belirli bir gen havuzuna karşılık geldiğini, genlerin üyeler melezlendikçe bu havuz içerisinde dolaşıma girdiğini (*gen akışı* denen süreç), ama diğer türlere karşılık gelen gen havuzlarına göç etmediklerini söyleyebiliriz. Bir tür içerisindeki gen akışı bütün üyelerinin üç aşağı beş yukarı aynı olmalarını sağlar, dolayısıyla biyolojik tür kavramı tipolojik taksonomistlerin kabul ettiği ölçütlerle uyumludur.

Peki öyleyse tür tanımı niçin bu kadar tartışmalıdır? Çiftleşmeye dayanan bir tanımdaki problemlerden biri bazı organizmaların çiftleşmemesidir. Örneğin bakterilerin hepsi çiftleşmez, yine de tür olarak sınıflandırılırlar; üstelik gerçek bir tür olarak görülmesine karşın cinsiyetsiz şekilde üreyen çok hücreli organizma örnekleri de vardır (karahindiba, *Taraxacum officinale* gibi). Bu problem “tür” kelimesinin bazen farklı iki anlama sahip olduğunu göstermektedir. Anamlardan biri, yukarıda bahsettiğimiz anlam, bir organizmanın üreme yönünden yalıtıklığıyla ilgilidir. İkinci anlam “tür” teriminin taksonomik piramidin, bir grup organizmanın diğer organizmalarla çiftleşip çiftleşmediğinden bağımsız nihai sınıflandırma biriminin tabanındaki uç noktalardan sadece biri olmasıdır. Diğer bir ifadeyle tür sadece bir *takson*dur, bir sınıflandırma birimidir yalnızca. “Tür”ün sadece bir taksonu belirtmek üzere kullanımı, tek bir soya gelişiminin değişik aşamalarında ve hatta sonraki ardıl üyeler çiftleşmeyi düşünme olanağına hiç sahip olmadığında bile farklı isimler verilebilen paleontolojide yaygın görülür. Bu sayede *Homo erectus*, *H. sapiens*’e evrimleşti ve ikisi hiç yanyana var olmadı: *Kronotür* diye adlandırdığımız şeye örnek oldular.

Bahsedilen zorlukların farkına varılmasıyla türün tanımlanmasında alternatif arayışlara çıkıldı ve bu tanımların yer yer biyo-

lojik tür kavramının sınırlarını aşarak kavramla çeliştikleri görüldü. Örneğin organizmaların sınıflandırılmasının yollarından biri *fenetik* yoldur; bu yaklaşımda organizmalar “kanatları var” için 1 ve “kanatları yok” için 0 verilmesi gibi ayrık ölçümler de dahil, tamamen nesnel ölçütler uyarınca gruplara yerleştirilirler. Gazeteler, dergiler ve çöpçatanlık ajanslarındaki “partnerinizi tanıyın” oyunları genel hatlarıyla fenetiktir. Fenetik yaklaşımın avantajı tamamen nesnel olmasıdır; bir organizmanın dış görünüşü hakkında öznel değerlendirmeler yapılmasına dayanmaması ya da fırsat verilmiş olsa (belki bugün soyu tükenmiş) bir organizmanın bir başkasıyla çiftleşip çiftleşmeyeceğini tahmin etmeye dayalı olmamasıdır. Bu şemadaki sorun, fenetik olarak tanımlanmış organizma gruplarının neredeyse tümüyle aynı gözükmelerine karşın yine de birbirleriyle çoğalamıyor olabilmeleridir. Dolayısıyla aynı fenetik türler olmalarına rağmen farklı biyolojik türlerdir. Meyve sineği *Drosophila*, (birbirleriyle üremeyen) *D. pseudoobscura* ve *D. persimilis* adlı iki kategorisiyle buna örnektir. Bu iki organizma fenetik olarak birbirlerinden ayıramayacak ölçüde benzerdir, dolayısıyla bir fenetik tür oluştururlar, ama çiftleşmedikleri için de iki biyolojik tür oluştururlar.

Türün ne anlamı geldiği konusunda başka tanımlar da vardır ve ileri sürdükleri ölçütlerin uygulanması suyu daha da bulandırır. *Ekolojik tür kavramı* çevrenin, kaynakların ve karşılaşılan tehlikelerin oynadığı rolün önemini vurgular. Türü tek bir ekolojik nişi kullanan bir organizma grubu olarak tanımlar. bir organizmanın muhtemel bir eşleşmeyi onaylama becerisini dikkate alır. Biyolojik tür kavramıyla yakın bağlantılı bu tanımın avantajı, birbirleriyle çiftleşme becerisi genellikle gözden kaçırılabilirken onaylamanın çoğu kez doğrudan gözlemlenebilmesidir. Bir organizma grubu daha önceki eşlerini artık potansiyel partnerler olarak onaylamadığında yeni bir tür ortaya çıkabilir. Bu onayın görünüm biçimiyle olması gerekmez: Bitkiler ve hayvanlar çeşitli yollarla iletişim kurarlar, ses yoluyla ya da duyularımızca daha zor fark edilir biçimlerde, hatta bilinçsiz şekilde! Bu iletişim *feromon* adını verdiğimiz, insanların da sonuçta parfüm ve losyonlarına benzer nedenlerle kattığı kimyasal maddelerin yayılması ve saptanması aracılığıyla da olabilir. Son olarak (elbette bu kısa özetle, yoksa başka tanımlar da vardır) *filogenetik* (soyoluşsal)

tür kavramı var; buna göre tür, ortak bir ataya sahip olan ama en az bir ayırıcı nitelikte farklılık gösteren organizma grubu şeklinde tanımlanır. Bu tanıma göre farklı iki soyoluşsal türün üyelerinin sadece tek bir ayırıcı nitelikte farklılık göstererek birbirleriyle çiftleşme olanakları vardır.

Türlerin evrimleştiğine ve hâlâ evrimleşmekte olduğuna hiç kuşku yoktur. Geçmiş evrimin kanıtı olan fosil kayıtları, bizlere dünya sakinlerinin zaman içerisinde birbiri ardına sahip oldukları görüntülerin olağanüstü bir aktarımını sağlar. Kayıtlar tam ve eksiksiz değildir, günümüze ulaşan her türden birer örneğe sahip hiçbir müze yoktur (müzeler genellikle sahip olduklarına ham topraktan çok daha iyi bakarlar), fakat bunlar canlı varlıkların atalarının izini şaşırtıcı ölçüde net biçimde tespit edebildiğimiz yakın geçmişteki (“hatırlanamayacak kadar eski” klişesi yakışık-sız kaçardı) kendi kökenimiz de dahil olmak üzere zaman içerisinde geriye doğru sürebilmemize yetecek kadar da tamdır.

Fosil kayıtlarının bilimine ve dünyadaki yaşam tarihi açısından yorumlanmasına *paleontoloji* (fosilbilim) denmektedir. “Fosil” kelimesi kazıp çıkarma anlamına gelen Latince *fodere* sözcüğünden gelir, dolayısıyla *fossile* de kazıp çıkarılan şey anlamına gelmektedir. Eski fosil arayıcıları bir fosilin ideal forumun bir tür *vis plastica* (biçimlendirici kuvvet) etkimesiyle yaratılmış görüntüsü olduğu şeklinde Platoncu görüşü taşırlardı. Fakat bugün bir fosilin iskeletler (kemikler ağırlıklı olarak kalsiyum fosfat ve protein kıkırdaklarından oluşur) ve dişlerin (yine kalsiyum fosfat ve çeşitli sert kaplamalar) mineral parçalarından oluştuğunu bilmekteyiz. Fosiller tortul kayalarda bulunur; bunlar kireç taşı gibi minerallerin birikmesi ve sıkışmasıyla oluşan kayalardır. Magmatik kayalar adı verilen çok derinlerden yüze vurmuş olan kayalarda asla fosil bulunmaz. Bazı fosiller başkalaşım kayalarında bulunur; bunlar yüksek sıcaklık ve basınç tarafından değişime uğratılan tortul ya da magmatik kayalardır. Bazı fosiller su sızıp içerdeki oyukları taşlı tortularla doldurdukça mineralize olan ağaç gibi organik malzemelerdir. Organik

kaynak biz onu buluncaya dek tamamen tükenmiştir ve çıkardığımız fosil özgün fosilin üç boyutlu mineral bir kopyasıdır. Dış görünüş çoğu zaman korunur, fakat içerikteki kalsiyum karbonat aragonit kalıp kalsit adı verilen daha sert ve yoğun bir kalıba dönüşmüştür. Organik malzemeler bu biçimde korunmaz, fakat seramik (sert bir protein türü) ve etli (yağların kayganlaştırdığı yumuşak protein türlerinden oluşan) kısımların izleri sık sık fosilin gömülü olduğu kayacın içinde korunmuş halde bulunur. *Kehribar* (amber) adını verdiğimiz katılaşmış reçinenin içerisinde çok küçük bazı canlılar da bütünlüğünü korumuş halde bulunabilir. Daha büyük canlıların da, örneğin mamutların buzullar içerisinde korunmuş olduğu görülmüştür.

Alttaki eriyik bölgelerden yukarıya doğru, dünyanın iç tarafındaki bölümünü örten litosfer dediğimiz en dıştaki katı kısımda yeni bölgeler oluşturmak üzere sürekli bir yükseliş olması anlamında ayaklarımızın altındaki yer de canlıdır. Yükselen magma, litosferin yukarıya çıkış bölgesinden dışa saçılmasına ve ardından çok uzaktaki bir dalma oyuğundan tekrar aşağı akmasına sebep olur. Bu taşıma kuşağına bizim kıta adını verdiğimiz yerkabuğu atıkları ilişiktir, bu yüzden de kıtalar gezegenin yüzeyi üzerinde hareket ederler. Bu *levha tektoniği* süreçleri ilk kez Alman jeolog Alfred Wegener (1880–1930) tarafından kendisiyle alay eden dünyaya sunuldu ve onun *The origin of continents and oceans* [Kıtaların ve Okyanusların Kökeni, 1915] adlı kitabında açıklandı; 1960 yılından sonra yapılan, o zamana dek hareketsiz ve katı olduğu kabul edilen deniz tabanının yayılmasının dünyanın görünümünü nasıl değiştirmiş olduğunu gösteren çalışmaların ardından da genel kabul gördü (Şekil 1.3). Kıtasal kabukta yerel burkulmalara da sebep oluyor, bu orojenezden (dağ oluşumu) derin yarıklara, dağ eteklerindeki tepelere ve vadilere dek çeşitli etkiler doğuruyordu.

Kırsal bölgelerde bu büyük kırışma ve buruşmalar yaşanırken, zaman zaman jeolojik tabakaların iç içe geçmesi sonucunda kimi yerlerde bir nesle ait fosilin başka bir neslin altına taşınması ya da daha yaşlı fosillerin başka yerden taşınıp soyunun sonraki üyelerinin içine karışması pek şaşırtıcı olmaz. Bu tarz bariz tutarsızlıkları genellikle tabakaların şeklini takip edip büküldü-

Şekil 1.3 Uzun vadeli baktığımızda kıtaların aşına olduğumuz dağılımıyla bildiğimiz bugünkü dünya çok farklı bir görünüm kazanır. Milyonlarca yıllık zaman ölçeğinden bakarsak yüzey akışkandır ve içeriden maddenin fışkırması ve uzak dalma bölgelerinde tekrar içeri akmasıyla kıtalar yerkürenin üzerinde sürüklenir. Aşağıdaki grafiklerde modern dünyanın geride bıraktığımız milyar yıllar içerisinde aşama aşama ortaya çıkışını görüyoruz (adı verilen dönemlere denk düşen yıllar için bkz. Şekil 1.9). Grafiklerde ileride bizim şu anki kıtalarımız ve ülkelerimiz halini alacak olan bölgeler gösterilmektedir.



Geç Kambriyen Öncesi



Ordovisyan



Devonijen



Geç Karbonifer



Geç Jura



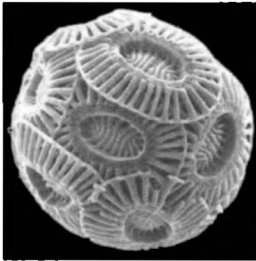
Geç Kretase

günü görerek tespit edebiliriz. Aslına bakılırsa tektonik olayların gücünü iklimin altüst edici etkileriyle beraber ele aldığımızda, okyanusların buzul çağında donduğunu, buzulların bir aşağı bir yukarı kaydığını, ardından buzlar çekilirken eriyen sudan oluşan yüz metre yüksekliğindeki dev tsunamilerin okyanusları yenilediğini düşününce uzak geçmişimizden kayıtlara ulaşıyor olmamız bile şaşırtıcıdır. Küresel savaş (dünyanın organizmalara, organizmaların organizmalara karşı) yaşamın kalıntılarının üze-

rinden hiddet ve şiddetle geçti ve bizler bugün eğer tek bir diş bulabiliyorsak bile aslında kendimizi şanslı saymalıyız.

Şu an tek bir diştten çok daha fazlasını da bulmuş durumdayız. Şanslı bir ölümse (ne kadar şanslı olabilirse elbette), bir dinazor akşam yemeği olmayacağı bir yerde kalır, çamura batar, tortular üzerini kaplar ve zamanı geldiğinde toprak kaymasıyla yüzeye çıktığında üzerine güneş ışığı vurur. En zengin fosil kalıntıları, sıg sulara yaşamış sert iskeletli deniz omurgasızlarından oluşur. En az korunmuş olanlar iskeletsiz organizmalar ve kuşlar gibi kolaylıkla zarar gören yaratıklardır. Bazı fosiller çok büyük sayılarda karşımıza çıkar: Kireçtaşı tepeleri kokolitofor denen tek hücreli alglerin fosilleşmiş kalıntılarının oluşturduğu yükseltilerdir (Şekil 1.4). Bu fosiller bugün de görülebilmektedir, çünkü her yıl yaklaşık 1,4 milyar kilogram kokolitofor bırakılmaktadır. Opak şekillerinde deniz suyunda kalmış olmalarının payı vardır. Hatta 1997 ve 1998 yıllarının yaz aylarında milyarlarca kokolitofor geleceğin tepelerine dönüşmeden önceki kısa ve sessiz hayatlarının hazzını tattığı sırada tüm Bering Denizi'nin rengi koyu maviden deniz yeşiline dönmüştür.

Elimizdeki fosil kayıtları ne kadar eksik olursa olsun yine de türlerin geliş ve gidişleri, bir türün bir başkasına evrilişi, başka bazı türlerin yokoluşlarıyla, bütün olarak canlı ve ölü dalları olan, şu anki biyosferin de yapraklarını oluşturduğu bir ağaca benzerliğiyle bize evrimin varlığını çok açık şekilde hatırlatır. Kayıtlar bize biyosferin ağaca benzer tarihini yer yer tam açık olmasa da makul akrabalıklarla birlikte gösterir gibidir. Fakat fosil kayıtlarına getirilen alternatif açıklamalar da vardır ve konu bizim doğadaki yerimizi anlamamız açısından çok önemli olduğu için bunları da ele almak durumundayız.



Şekil 1.4 Sık görülen bir kokolitofor türü olan *Emiliana huxleyi*'nin taramalı elektron mikroskopundaki (SEM) görüntüsü. Tekerlek kapağına benzer şekillerin her biri ayrı bir kokolittir. Bizim kireçtaşı ve kalker yükseltilerimiz, ölmüş ve sıkıştırılmış kokolitoforlardan oluşmaktadır.

Evrimciliğin alternatiflerinden biri dönüşümcülüktür (transformizm); bu öneriyi daha sonra ele alacağız. Burada başka bir alternatifi ele alalım: *Yaradılışçılık*. Bu yaklaşımda her bir tür, minik değişiklikler hariç ebediyen değişmezdir. Yaradılışçılara göre türler aniden, önceden hazırlanmış, zekice tasarlanmış halleriyle varoluşa kavuşur veyaşam bu türlerin içine başkasınca yaratılmamış, her şeye kadir, tapılmaya layık bir Yaratıcı tarafından üflenmiştir. Tür belki sonsuza dek yaşayacak, belki de Yaratıcı'nın akıl sır ermez isteklerinin yeni bir tecellisine yer açmak üzere o türün nesli tükenecektir. Yaratıcı'nın birbirine işkence etme, birbirini sakatlama ve öldürme becerisi üzerine kurulmuş temaların görünüşe göre hiç tükenmeyen çeşitlemeleri etrafında hayvanları tasarlama ve yapma kapasitesi sınırsızdır. Sulanmış uzun sivri dişlerin arasında da Yaratıcı'nın özgür iradeli sureti İnsan yer almaktadır.

Onun saydam kamuflajlı varyantı olan "Akıllı Tasarım" dahil, yaradılışçılık bilim değildir: Bilim karşıtı, dinsel güdülü bir gündem tarafından ortaya atılıp sürdürülen test edilemez bir iddiadır. Müşfik davranmaya çalışarak en fazla yaradılışçılığın Galileo'nun Simplicio'suyla aynı amaca hizmet ettiğini söyleyebiliriz: Yaradılışçılık bilimsel bir açıklamanın, konumuz özelinde evrimciliğin üstün açıklamalar sağladığını göstermeye yarayan edebi bir araçtır. Bilimin sürekli açıklama sunmasının gerekmesi önemlidir; yaradılışçılıktaki problem, taraftarlarının Simplicio'lardan başka bir şey olmadıklarını ve hemen köpürüp rahatsız olmalarının, daha kötüsü kanıtları çarpıtmalarının boşa zaman harcatan bezdirici bir çaba olduğunu ve gençlerin gözlerini evrenin gerçek zaferlerine kapatma tehlikesi taşıdığını fark etmemeleridir.

Bu durumda yaradılışçılığa karşı hangi argümanlar ileri sürülmektedir? O kadar çok ki hepsini burada saysak bu bölüme gereğinden fazla yük bindirmiş oluruz. İçlerinden sadece üçünü aktararak kaba bir fikir edinmenizi sağlamaya çalışacağım. Birincisi yakın geçmişte birçok yeni tür şekillendi ve bu olgu bunun geçmişte de olageldiğini ve fosillerin deponun sonunun, yani soy tükenmesinin değil, evrimin göstergesi olduğunu kuvvetli şekilde akla getiriyor. İkinci olarak yer yer evrimin bir kestirim gücüne sahip olmadığı, bu yüzden test edilemeyeceği ve bu nedenle

de onun yaradılışçılığıne ne kadarsa onun kadar bilimsel değeri olduğu ileri sürülür. Bu iddia doğru değil. Evrimin gerçekleştiği bulgusu, makroskopik canlıların kalıntıları ve günümüze ulaşan çeşitleri üzerinde yapılan gözlemler sonucu ortaya çıktı. Yirminci yüzyılda evrimin izinin moleküler düzeyde sürülebildiği görüldü. Moleküler evrimin ayrıntılarının makroskopik evriminkilerle uyumlu olmak zorunda olduğu şeklinde altı boş olmayan bir öngörüye sahiptik. Durumun böyle olduğu da tespit edildi: Organizmaların bütününde yaptığımız gözlemlerle çelişen tek bir moleküler değişim izi örneği yoktur. Üçüncüsü telif hakkı ihlallerinde kullanılan hukuki testlerden biri, bir üründe kimi zaman bilinçsizce yapılan hataların kopyalanan üründe de tekrarlanıp tekrarlanmadığının tespitidir. Haritacılar bazen intihal yapan kişileri tuzağa düşürmek için çok küçük hatalar yaparlar (örneğin arazinin üzerine fazladan bir ev eklemek gibi). Biyolojide iki çeşit çalıntı yanlış vardır. Birinde evrim aptalca bir yönde başlar (öngörüsü yoktur) ve sonra bunun sonuçlarıyla yaşamak zorunda kalır. Memelilerdeki gözler sık alıntı yapılan örnektir, çünkü göz evrimleştikçe kendisini çok acayip bir tasarıma hapseder, sanki Kafası İyi Bir Tasarımcı tarafından yapılmış gibidir, kan damarları retinanın önündedir ve bu yüzden retinanın içinden arkaya girerek gözde bir kör nokta bırakır. Bu tasarım o zamandan bu yana devam etmektedir. Diğer yanlış çeşidi moleküler düzeyde örneğin *psödogenler* biçiminde gerçekleşir, bunlar mutasyona uğramış DNA'nın kopyalanmış işlevsiz dizileridir ve haritalardaki sahte evlerin karşılığıdır.⁴

Gelin, bilime ve kanıtlanmış evrim gerçeklerine dönelim. *Mikroevrim* küçük değişimler geliştirme sürecidir. *Makroevrim*, mikroevrimin sebep olduğu değişimlerin birikmesi sonucunda yeni türlerin ve daha yüksek taksonların (takımlar, familyalar vs) oluşmasıdır; buna *soyiçi tedricilik* süreci diyoruz. Daha önce dikkat çektiğimiz üzere, bu aşamalı evrimin deneysel kanıtları, beklediğimiz geçiş formlarının genellikle bulunamadığı fosil kayıtlarının muhtemel tamamlanmamışlığı nedeniyle sıkıntılıdır. Olası iki açıklama vardır. Biri geçiş formunun var olması ama hiç iz bırakmadan kaybolmuş olmasıdır. Bunun alternatifiyse soyiçi

4 Bu kanıtın ayrıntılı aktarımı için bkz. <http://www.talkorigins.org/faqs/molgen/>.

tedriciliğin doğru olmaması, fosil kayıtlarının insanların düşündüğünden daha tam olması ve türleşmenin (yeni türlerin oluşumunun) uzun bir durağanlık ya da “stasis” döneminin ardından birkaç bin yıllık bir atılımla gerçekleşmiş olmasıdır. *Kesintili denge* ya da *sıçramalı evrim* adı verilen bu oldukça tartışmalı kuramı 1972 yılında Niles Eldridge ve Stephen Gould (1941–2002) ileri sürdü. Bu kuramda küçük yalıtık bir topluluğun *ayrıyurtlu* (*allopatrik*) türleşme sürecinde bir değişim atılımına uğradığı varsayılmaktadır (“allopatrik”, değişimin atalarından farklı bir coğrafi bölgede gerçekleştiği anlamına gelir). Bu durumda ataların bulunduğu yerde ara geçiş formlarının kayıtlarının bulunması beklenmez ve yeni türün fosilleri ata yurdunda ancak tam anlamıyla evrimleşmiş tür oraya tekrar yayılırsa bulunabilecektir: Ara formların olmamasının anlaşılır olması, iki form arasındaki geçişin ani olması izlenimini güçlendirir.

Soyiçi tedricilik ve kesintili denge ilk ileri sürüldükleri biçimleriyle olasılıklar yelpazesindeki iki zıt uç olarak değerlendirildi. Onları birbirleriyle rekabet halindeki evrim modelleri şeklinde değerlendirmek uygunsuz kaçmaz ama türleşmenin gerçekleştiği hızı gösteren bir sayaçtaki işaretler olarak bakmak daha uygun olur. Bazı olaylar, bazı türlerin ortaya çıkışı tedriciliğe daha yakın bir noktayı gösterirken, başka bazı olaylar, başka türlerin ortaya çıkışı kesintiye daha yakın bir noktaya işaret eder. Bir türün evrim hızını tespit etmek ve fosil kayıtlarının tam olduğundan emin olmak son derece zordur. Bu kesintili denge yaklaşımının yakın zamanda ileri sürülen versiyonlarının tartışmalı olmadığı anlamına gelmez, zira stasis’in korunmasını ve hızlı varyasyon zamanlarına geçişi sağlayan mekanizmaların önerilmesinin etkisiyle, kuram ilk ortaya atılışındaki sert “hızlı–yavaş” vites geçişlerinin ötesine geçecek şekilde geliştirilmiştir. Kuramın felsefi duruşu da tartışmalıdır, çünkü Darwincilik türleşmenin uyarlanıma işaret eden değişimlerin birikimi olduğunu söylerken, kesintili denge türleşmeyi uyarlanımın itici gücü olarak görmektedir. Bu tür uyumsuzlukların varlığı doğal seçim kuramının (ve evrim gerçeğinin) başarısızlığı anlamında değerlendirilmemelidir: Bunlar dünyanın en önemli süreçlerinden birinin ayrıntıları hakkında yürütülen enerjik bir tartışmanın göstergesidir.

Vurgulanması gereken bir nokta daha var. Evrimin ille de daha karmaşık bir inceliğe götürmesi gerekmez: Evrimin yönü her zaman yukarıya doğru değildir. Bir organizma eğer durumun doğurduğu toplumsal ve anatomik yükleri göz ardı ederse üreme faaliyetini hızlandırabileceğinin farkına varabilir ve böylece dünyadaki popülasyonunu daha başarılı şekilde artırabilir. Eğer üremenin temel işlevinde ilerlenebiliyorsa, ne diye toplumsal olarak uydurulmuş birçok faaliyetle canımız sıkılsın? Üstelik yaşam alanları değişebilir ve başarısız bir türün geriye kalan üyeleri aniden kendi zamanlarının geldiğinin ve değişen koşullar altında o zamana kadar kendilerinden daha başarılı olmuş rakiplerinden daha fazla üreyebileceklerinin farkına varabilirler. Tulumlular ya da kuyruğu kordalılar alt şubesine bağlı müthiş tembel bir tür olan *Ciona intestinalis* başka bir çözüm bulmuş. Bu küçük arkadaş larva biçiminde kendiliğinden hareketli bir avcı ve bu yüzden bir beyne ihtiyaç duyuyor. Fakat durağan hale gelebilmek için tutunabileceği uygun bir niş bulduğunda artık düşünmesi gerekmiyor, bu yüzden de enerji yönünden yük oluşturan kendi beynini yiyor. Beyin müthiş bir enerji tüketicisidir ve artık kullanma ihtiyacınızın kalmadığını keşfettiğinizde beyninizden kurtulmak iyi bir fikirdir.

Yaşamdaki bu zengin çeşitlilik nasıl ortaya çıkmıştır? William Paley daha önce bahsettiğimiz gibi işin sırrına erdiğini biliyordu, zira bütün türlerin Tanrı tarafından yaratıldığına emindi ve konu kapanmıştı. Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de (1744-1829) da işin sırrına vakıf olduğunu düşündü ve düşünsel yönden Paley'e göre bir dereceye kadar ileri biri olduğu, bir mekanizma bulma problemiyle uğraşmasından da anlaşılıyor. Lamarck önce asker, sonra banka memuru, daha sonra yardımcı botanikçi ve en sonunda böcek ve solucan profesörü olarak yaşamını fakirlik içinde geçirdi, son birkaç yılında da kör oldu. Fakirlik ölümünde de peşini bırakmadı, kiralık bir mezara gömüldü, yeni birine yer bulmak amacıyla kiralama hakkının süresi beş yıl sonra doldu ve kemikleri etrafa dağıtıldı. Bugün adı giderek saygıdan çok küçümsemeye anılsa da, (kendi verdiği adla) omurga-

sızlar biyolojisinin kurucusu olarak ve hiç olmazsa türlerin varoluşuna bir açıklama bulma çabası nedeniyle saygıyı hak etmektedir. Evrimin mekanizması hakkındaki spekülasyonlarını (böyle adlandırmak gerekir, çünkü bilimsel kuramlar olmadıkları açık) 1801 yılında yayımlamaya başladı, ama en kapsamlı çalışması *Philosophie zoologique* (1809) adlı eseridir.

Lamarck bütün organizmaların metafizik bir arayışla mükemmelliğe ulaşmak için uğraştığını ve hepsinin Platoncu bir çeşit tür özü içeren tek hücreli bir başlangıç tohumundan dönüşmüş olduklarını ileri sürdü. Bu arayış, kullanılan organları besleyen ve kullanılmayanların mahrum kaldığı tam anlamıyla tanımlanamamış çeşitli “sinirsel sınırlar” tarafından güdüleniyordu. Ayrıca kazanılan özelliklerin kalıtım yoluyla aktarıldığı düşüncesini de ortaya attı (adı da bununla anılır oldu, oysa o bunu muhtemelen genel tezinin küçük bir parçası olarak görüyordu). Verdiği en bilinen örnek, daha yüksek yapraklara yetişmek için uğraşırken zürafanın boynunun uzaması ve bir nesilde başarılan bu uzamanın ona minnettar kalan diğer nesil tarafından miras edinilmesiyle daha da mükemmel bir zürafaya kavuşulmasıdır.

Fikirdeki basit saflığa dudak bükebiliriz, ama moleküler biyoloji bu tür bir kalıtım için yol üzerindeki olasılıkları temizlemeden önce iddianın yanlışlığının kanıtlanması zordu. Evrim olarak değil de, *dönüşümcülük* (*transformizm*) kapsamında değerlendirilen Lamarckçı görüşler 20. yüzyıla dek etkisini sürdürdü. Şakaya dayalı çürütmeler yaygındı ama bunlar da ipe sapa gelmezdi: Yahudilerde birbirini izleyen çok sayıda nesilde yapılan sünnetin sünnet derisinin körelmesine sebep olmaması ciddi bir açıklama değildi, zira oğlan çocuğu sünnet derisini kaybetmek için pek de uğraşıp didnmiyordu. Etkili Alman biyolog August Weismann (1833–1914) yaptığı bir dizi tatsız deneyde farelerin çok sayıda, birbirini izleyen neslinin kuyruklarını kesti ve sonraki nesillerde kuyruk uzunluğunda bir azalma bulamadı. Bütün bu kesme-biçme deneyleri (kazara veya bilerek benzer çok sayıda deney yapıldı) kazanılan özelliklerin iletildiğinin yanlışlığını gösterme konusuyla ilgili olsa da, Lamarck’ın görüşünde *çaba harcama* merkezde olduğu ve ancak bundan sonra dönüşüm yaratan sınırlar aktığı için dönüşümcülüğün merkezi yönü açısından ilgisizdi.

The vestiges of Creation [Yaradılışın İşaretleri, 1844] adlı kitabında Robert Chambers (1802-1871) muhtemel bir açıklamaya biraz yaklaştı. Mutasyonların önemini kabul etti, ama yeni türün kazara anormal bir doğumla gelgeç şekilde ortaya çıktığını ileri sürdü. Bu yüzden eğer bir balık hesapta olmayan bir biçimde kanatlar, tüyler ve gagayla doğarsa, bu durumda biyosfer kuşlarını andıran bir şeye sahip olurdu. Hemen hemen aynı dönemde Muhterem Henry Egerton, sekizinci ve sonuncu Bridgewater kontunun emriyle “Tanrı’nın yarattığı canlıların oluşumu ve çeşitliliği gibi mantıklı fikirler doğrultusunda yapılmış tüm çalışmaları gösteren ve Yaradılış’ta yansımasını bulan Tanrı’nın kudreti, hikmeti ve ihsanını göstermek üzere” finanse edilen *Bridgewater treatises* adlı eser koleksiyonu çağdaş birçok fikrin ifade edilmesine vesile oldu. Yazılanlar arasında Thomas Chalmers’in (1833) “The adaptation of external nature to the moral and intellectual constitution of man” [Dış doğanın insanın ahlaki ve düşünsel yapısına uyarlanması] ve John Kidd’in (1837) “The adaptation of external nature to the physical condition of man” [Dış doğanın insanın fiziksel şartlarına uyarlanması] adlı çalışmaları da yer alıyordu. Modern bakış açısıyla değerlendirildiğinde her iki katkı da derlemenin iddiasının tam aksi kutbunda yer alıyordu.

Bölümün bu noktasında evrimin kahramanı Charles Robert Darwin (1809-1882) nihayet ürkekçe sahne alıyor. Darwin’in farklı organizma türlerinin kökenini tespit etmedeki başarısının kökeni, kendini doğaya hasrettiği 1831-1836 yılları arasında İngiltere Kraliyet Gemisi *Beagle*’da Kral II. Charles’ın evlilik dışı soyundan gelen Kaptan Robert FitzRoy’un yönetimi altında görünüşte bir beyefendi refakatçi ama aslen doğabilimci olarak hizmet ettiği döneme uzanır. Fitzroy uzun ve yalnız yolculuğunda kendisine bir beyefendinin eşlik etmesini ister; bunda kendisini vurmuş olan önceki kaptanın kaderinden kaçınma arzusu kadar, benzer bir eğilimden duyduğu korkunun da payı vardır, zira birkaç yıl önce amcası İçişleri Bakanı Vikont Castlereagh bunalıma girerek kendi boğazını kesmiştir. Keşiflerin başlangıcında çok büyük miktarda veriye dalma olanağı çoğu kez fayda sağlamıştır; bunların gizli oda olan bilinçaltında harıl harıl çalışması, örüntüler araması ve en sonunda kişisel bilimsel deneyimlerin en değerlisini yaratmak üzere bilinçli düşünceye fırlaması: *Eureka!*

Beş yıllık yolculuğunda Darwin, küçük taşıtın⁵ güvertesinde onu hiç rahat bırakmayan deniz tutmasından kurtulmak amacıyla birçok ayını karada geçirdi. Karada kalışlarının en ünlüsü 15 Eylül 1835'te başlayıp beş hafta sürdü ve Büyük Okyanus'ta Ekvador açıklarındaki Galapagos adalarında ("kara kaplumbağalarının adası") gerçekleşti. *Beagle* buraya benzer gemilerin her zaman yaptığı gibi yolculuğunun sonraki ayağında taze et ihtiyacını gidermek için adaya özgü dev kaplumbağalardan toplamak amacıyla uğramıştı. Daha büyük adalardaki kara kaplumbağalarının hepsi o sırada soyu tükenecek şekilde avlanmış, sadece küçük adalardaki bazı türler hayatta kalmıştı. Galapagos, bu adaları başka bir zamanda Darwin'in sergileyeceğinden çok daha düşük bir dikkatle ziyaret etmiş olan Herman Melville'in "şehrin dışındaki bir arazide etrafa atılmış yirmi beş kül öbeği" diyeceği bir dizi volkanik adadan ibaretti. Darwin bile geminin kıcı yanaşana dek ziyaretinin taşıyacağı önemi fark etmemişti, çünkü düşüğü notta "tropik adaların insanlığa bu kadar faydasız" olduğunu düşünmek zordu ifadesini kullanmış. Etrafındaki girdap oluşturan sis ve yön değiştiren akıntılar adalara *Los Encantadas* ("Büyülüler") adının takılmasına sebep olmuştu; gerçekten de öyleydiler, çünkü o zamana dek metaforik bir sis türlerin kökenini gizlemiş, kesilmesine yardım ettiği kara kaplumbağalarının etinin lezzetine karışarak farklı adalardan toplanmış (sadece San Cristóbal, Floreana, Isabela ve Santiago'yu ziyaret etti) kuş ölüleri arasındaki farklarda kendisini göstermişti. Kendi aktarımına göre:

Adalardan bazıları kendi kara kaplumbağası, alaycı kuş, ispinozgiller ve çok sayıda bitki türlerine sahip ve bu türler aynı alışkanlıklara sahipler, benzer koşullarda bulunuyor ve açık ki doğa ekonomisinde aynı yeri işgal ediyorlar... [bu] beni hayrete düşürüyor.

Hepimizin fark ettiği gibi adalar Darwin'in bir süre sonra *doğal seçim* olarak adlandıracağı kuramın şekillenmesinde hayati bir önem taşıyordu. Ekosistemi sadeleştirmekle ve böylece farklılıkların çok daha kolayca gözlemlenmesini sağlamakla kal-

5 *Beagle* gemisi orta kısmı itibarıyla 27 metre uzunluğunda, 7 metre genişliğindeydi ve 15 x 4 "darwin" ediyordu.

mıyor, popölasyonları da etkili biçimde izole ediyor, böylelikle de varyasyon ve adaptasyonun gelişimine olanak tanıyordu.

Kara kaplumbağalarına doymuş ve hayrete düşmüş olsa da Darwin hâlâ düşüncelerini berraklaştıracak kıvılcıma ulaşamamıştı. Aktardığına göre o kıvılcım 28 Eylül 1838'te uzun yolculuğunda birikmiş olan yeni bilgilerin bolluğu üzerine düşündüğü sırada çıktı. Eğlenmek için Malthus'un *Essay on the principle of population*'ını (1798) [Nüfus İlkesi Hakkında Araştırma] okuyordu; kitapta *East India Company*'nin (Doğu Hindistan Kumpanyası) işçilerine iktisat dersi vermek üzere işe alınmış bir politik ekonomi profesörü olan Rahip Thomas Malthus (1766-1834) insanlığın talihsizliğine vurgu yapıyordu, çünkü nüfus yiyecek arzından daha hızlı artıyordu, bu yüzden ileride kaynakların insanlığa yetmemesi kaçınılmazdı. Darwin'in aktarımı şöyle:

Her yerde devam eden varoluş mücadelesinin anlamını kavramaya hayvan ve bitkilerin uzun süre gözlemlenmesinden hazırlıklı olduğum için, o anda bu koşullar altında olumlu varyasyonların korunmaya, olumsuzların da imhaya meyilli oldukları aklıma geldi.

Darwin'in savunucusu Thomas Huxley'in (1825-1895) sonradan ifade edeceği gibi "bunun hiç düşünülmemiş olması ne feci bir aptallıktı".

Darwin sonraki yaklaşık yirmi yıl boyunca bu gözlem üzerine kafa yorarak, çizimler toplayarak, Lamarkçı edinilmiş özelliklerin aktarımı inancını hiç kaybetmeksizin ve çalışmasını yayımlamasının doğuracağı sonuçlardan korkarak, ağır ağır doğal seçim kuramını oluşturdu. Nihayet 1856 yılında George Eliot'ın Dr. Casaubon'u gibi devasa ve saygı uyandıran bir eser yaratma hedefiyle fikirlerini yazmaya başladı. Fakat planı yarım kaldı, çünkü Malthus'un ada ziyareti yapan başka okurları da vardı. Darwin, Alfred Russel Wallace (1823-1913) kendisine *On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type* [Çeşitlerin başlangıçtaki halden belirsiz şekilde sapma eğilimi üzerine] başlıklı bir elyazması ilettiğinde dehşete kapıldı. Wallace İskoç halk kahramanı William Wallace'ın soyundan uzak bir akrabasıydı ve 1848 ila 1852 yılları arasında profesyonel bir numune toplayıcısı

olarak Amazonlar'da uzun seyahatlere çıkmıştı. Avrupa'da şanslı yaver gitmeyince giderek kazançlı ama çetin hale gelen koleksiyonculuk kariyerine dönüş yapmaya karar verdi ve gidilecek yer olarak Malezya Takımadaları'nı (Endonezya Takımadaları) seçerek 1854'te Singapur'a ulaştı. 1858 yılının Şubat ayında, yıllardır yaptığı yolculukların ve koleksiyonculuğun ardından Maluku adalarında (kesin ada belli değil, Halmahera ya da Ternate olsa gerek) sıtma nöbeti geçirdiği sırada Wallace (tıpkı Darwin gibi) Malthus'un fikirlerinin evrimin açıklanmasının anahtarını elinde tuttuğunu fark etti.

Darwin ikilemde kalmıştı, çünkü Wallace'ın söylediği onun yirmi yıl önce bulduğu fikirdi ve fikrin önceliğini kaybetmek üzüreydi. Arkadaşları Sir Charles Lyell ve botanikçi Joseph Hooker'a danıştı. Wallace'la konuşmadan onun makalesini ve Darwin'in birikmiş notlarını Londra'daki *Linnaean Society*'nin (Linnaeus Topluluğu) 1 Temmuz 1858 tarihindeki toplantısında sunma kararı aldılar. O andan itibaren doğal seçim günışığına çıkmış oldu. Darwin hayatının eserinden vazgeçti ve planladığı akışı telaş içinde ve insaflı şekilde kısaltarak *On the origin of species* [Türlerin Kökeni Üzerine] ya da Victoria dönemi gotik süslemesiyle tam haliyle ifade edilirse *On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life* [Hayat mücadelesinde doğal seçim veya yeğlenen ırkların korunumu marifetiyle türlerin kökeni üzerine] adıyla Kasım 1859'da yayımlandı. Darwin bile bu başlığı biraz hantal buldu ve sonraki baskılarda (beş baskı daha yaptı) *On* (Üzerine) sözcüğünü atacak kadar da ileri gitti.⁶ Darwin şöyle aktarır:

Yaklaşımında iki ayrı hedef vardı; ilk olarak türün ayrı şekilde yaratılmamış olduğunu ve ikinci olarak doğal seçilimin değişimin ana etkeni olduğunu göstermek.

Bundan sonrasında dikkatimizi doğal seçilimin kâşifi olarak genel kabul görmüş Darwin'e odaklamak durumundayız. Fakat bu bağlamda Wallace'ı tümenden göz ardı etmek yanlış olur ki

6 "Evrim" kelimesi Türlerin Kökeni'nde sonsözdeki "evrimleşti" ifadesi haricinde geçmediği gibi, kitap halen çok tartışmalı olan türlerin kökeni sorununu açık bir şekilde ele almaz.

üstelik Darwin'e önceliği kesin şekilde devretmiş olmasındaki asalet de unutulmamalıdır. Ne var ki Wallace'ın sonraki çok uzun yaşamında bu alandaki itibarını düşüren bazı özellikleri de vardır. İnsanların kutsal bir nefes üflenmeden, hafif yardım olmaksızın evrimleşebileceklerini asla kabul edememiş ve doğal seçilimi biçimin evrimiyle sınırlı tutmaya çalışarak bilinçliliğin içinin daha yüksek bir şey tarafından doldurulduğunu iddia etmiştir. Buna bağlı olarak sonrasında arkadaşlarını dehşete düşürecek şekilde tinselciliğin bitmez tükenmez karanlık sokaklarında kendisini kaybetmiştir.

Doğal seçim çok basit bir fikir olsa da uygulanması çok karmaşıktır, çünkü gereken değerlendirmelerin yapılması büyük dikkat gerektirir. Kısacası kara kaplumbağaları sadece bir adada yaşamaz ve bir kara kaplumbağası türünde doğal seçilimin rolünü düşünmek için onun yakınındaki *biyota*'ya, canlı yaşamın tümüne verdiği yanıtın yanı sıra, bulunduğu yerin fiziksel durumunu ve iklimini göz önüne almak zorundayız. Bir kara kaplumbağasının evriminin rakipleri ve avcıları için de sonuçları olacak, bunlar da dönüp kaplumbağa üzerinde etkide bulunacaktır. Etkilerin emir-komuta zinciri içerisinde aşağıya doğru indiği basit doğrusal sistemlerden farklı olarak biyosfer inanılmaz derecede zengin bir doğrusal olmayan sistemdir ve bir organizmadaki değişiklikler organizmanın evrimi çevreyi değiştirdikçe organizmaya geri yansır. Doğrusal olmayan sistemlerde zamansal gelişimin öngörülmesi çok zordur ve evrimcilerin biyosferin geleceğini, doğrusal olamayan karmaşıklığın bu tanrısal hedefini tahmin edememeleri şaşırtıcı değildir. Burada ben *modern sentez* ya da *yeni-Darwinciliği* karakterize eden fikirlerden bazılarını özetleyeceğim; bunlar 20. yüzyılın başlarında genetikle bağlantılı fikirlerin gözlemsel doğa tarihiyle ilişkili fikirleri desteklediği görülünce ortaya çıktı. Hatta doğal seçim de 1930'lara dek tam anlamıyla kabul görmedi, bu ancak modern sentezin kurulmasıyla oldu. Daha önce belirttiğim gibi bu bölümde kendimi aslo-lar olarak fenomenolojiyle sınırlı tutacak ve evrimin moleküler temeli-ni sonraki bölüme bırakacağım.

Doğal seçim üç ilkeye dayanır:

1. Kalıtsal genetik varyasyon vardır.

Bir türün üyeleri birbirleriyle özdeş kolonlar değildir; bir türün içerisinde genetik parazit olur. Darwin bir kalıtım mekanizması kavrayışına sahip değildi ve çiftleşen ebeveynlerin özelliklerinin bir tür karışım potasına aktığı bir “harmanlama” kuramını uygun gördü. Doğru mekanizmadan habersiz olması ve onu eleştirenlerin de hızla vurgulayacağı üzere evrimle sonuçlanmayacak olan bir mekanizmaya meyletmesi onun fikirlerinin kabul görmesinin önünde engel olan önemli bir unsurdur. Biraz zahmet edip de pek az tanınan bir keşişten, ona çıkış yolunu gösteren Gregor Mendel’den gelen mektubu açıp okusaydı hikâyenin akışı çok farklı olurdu.

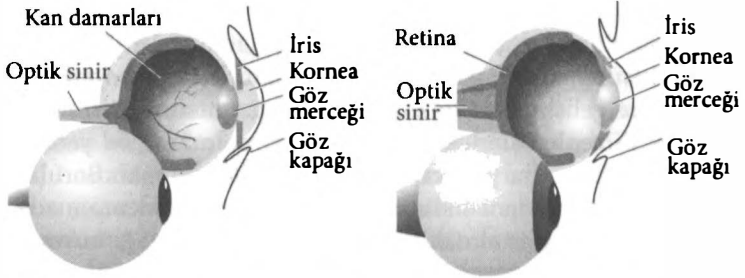
2. Ebeveynler haddinden fazla ürer.

Malthus’un da dediği gibi, ebeveynler hayatta kalabileceğinden fazla döl üretir. Bazı türler, örneğin filler sadece bir yavru doğurur ve bu ölebilir; diğerleri, örneğin kurbağalar binlerce üretir, ama bunlardan belki sadece biri hayatta kalır. Aşırı yavru üretmesi, uzun yıllar kendilerini çocuk bakımına adanmak zorunda olan büyük karmaşık organizmalarda daha az gerçekleşir; örnek olarak filleri, bir de belki Batı ülkelerindeki orta sınıf aileleri verebiliriz.

3. Başarılı döller çevreye en iyi uyum sağlamış olanlardır.

“Başarı” hayatta kalmaktan daha fazlasıdır: Üremeye devam edebilme becerisidir. Bu ilke 19. yüzyıl sağ liberallerinden Herbert Spencer’in talihsiz ve çok sık yanlış anlaşılan “en uyumlu (“fit”) olanın hayatta kalması” ifadesinden doğmuştur. Spencer bu ifadeyi (1862 yılı civarında) kendisinin görüşlerinin gelişimiyle bağlantılı olarak ortaya attı; bu bağlamda doğal seçim fikrini toplumların dinamiklerine kaba şekilde genişleterek kapıyı öjeniğe, devlet müdahalesinin bütün biçimlerinin reddine ve ırkçılığa açtı. “En uyumlu olanın hayatta kalması”⁷ tüm iyi sloganlar gibi akılda kalıcıdır ve Darwin sonraki baskılarda kul-

7 Tartışmalı bir çeviriyle Türkçede yer yer “en güçlü olanın hayatta kalması” biçiminde kullanıldığı görülmektedir –çn.

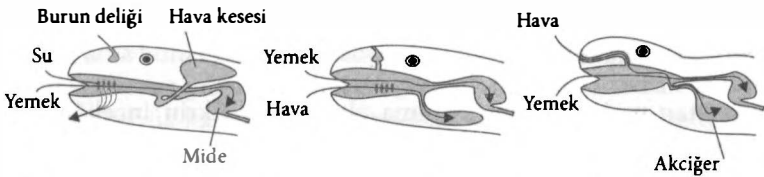


Şekil 1.5 Soldaki şekil memelilerde gözün genel düzenidir. Kan damarlarının nasıl ışığa duyarlı retinanın önünde olduğuna ve retinanın içinden geçmenin bir yolunu bulmak durumunda olduğuna, dolayısıyla buradaki kör nokta oluşumuna dikkat ediniz. Sağdaki şekil kan arzının retinanın arkasında olduğu ve daha mantıklı görünen kalamalarındaki düzenlemeyi gösteriyor. Evrim her iki düzenlemeye de tesadüfen ulaşmış olsa da ikisi de geri çevrilemedi, çünkü ışık duyarlılığının hayati değeri (ki o da görme becerisine evrimleşti) çok büyüktü. Bu arada memelilerdeki düzenlemede en azından bir avantaj var gibi gözüküyor: Bu düzenlemede kan akışı hastalıkla karşılaşılmasının azalmasına yardımcı olabilir.

lanmaktan geri kalmamıştır, ama altta yatan fikrin inceliğini değersizleştirmektedir.

Doğal seçilimi ele alırken onun uzayda ve zamanda tamamen yerel olduğunu akılda tutmalıyız. Doğal seçim tamamen şu ana bağlıdır ve tümüyle öngörüsüzdür. Bugün yaşanan bir adaptasyondan gelecekte pişman olacaksak, geleceğe şimdiden geçmiş olsun dileyelim: Doğal seçim bir türü evrimsel bir *cul de sac*'a [çıkılmaz sokak] sürüklediğini sezemez; hatta hiçbir şeyi sezemez, bir sonraki günü bile önceden göremez. Doğal seçim an için yaşar, tam bir *carpe diem* [gününü yaşa] durumu, anlayacağınız. Memeli gözü örneğini vermiştik: Tuhaf bir evrimsel davranışla, bir süre sonra başlıca duyu organımıza evrimleşecek olan ilk baştaki ışığa duyarlı parça, yan tarafında kan damarları varken gelişmiş ve belli bir süre sonra da bunlar retinanın üstüne binmiş (Şekil 1.5). Işığa duyarlılık avcılıkta ve saklanmada o kadar güçlü bir silahtır ki bir organizma için bu talihsiz düzenlemeyle kalmak tercih edilir olmuş, sağladığı avantajı gözden çıkarmak yeri-

ne bir milyon yıl sonra daha iyi bir görüşe ulaşmak üzere mevcut düzeni evriltmeyi seçmiştir. Bir kalamarın gözü bu açıdan daha kusursuzdur (ama diğer açılardan değil), çünkü izlediği evrim yolunda kan damarları ışığa duyarlı retinanın arkasına yerleşecek biçimde gelişmiştir. Bir diğer örnek ağzımızın içerisindeki boruların düzenlenişindeki rahatsızlıktır; solunum ve yemek boruları kesişir ve bu yüzden boğulma tehlikesi doğar. Boruların kesişmesinin nedeni şudur: Eski bir akciğerli balık atamızda balığın yüzeyde nefes almak için kullandığı hava deliği burnun üzerinde çok uygunsuz şekilde yerleşmiş ve yemeğin geçiş yeriyle aynı yeri paylaştığı bir alanın doğmasına sebep olmuştur (Şekil 1.6). Tehlikeleri olmasına karşın bu düzenlemeden dönmek de mümkün değildi. Penisin hem cinsel birleşme (insanlarda rastlanan onun etrafındaki ritüeller dahil) hem de idrar çıkarmak için kullanılmasındaki pek hijyenik olmadığı görülen tasarruf da benzer bir evrimsel temele sahiptir, üstelik testisten penise uza-



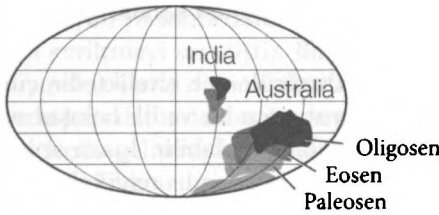
Şekil 1.6 Öngörü sahibi olamamanın talihsizliğine bir diğer örnek meme-lilerdeki solunum ve sindirim sistemlerindeki kör evrimdir. Soldaki çizim tipik bir balıktaki yerleşimi göstermektedir. Burun deliği (resmi adıyla *nares*) kapalı bir oyuğa sahiptir ve esasen koku alma amaçlı kullanılır. Oksijen ağza giren sudan elde edilir ve solungaçlar yoluyla dışarı atılır. Hava kesesi derinliği kontrol için kullanılır; denizaltılardaki safra tankları gibi düşünün. Ortadaki çizim modern memelilerin atası olan akciğerli balıktaki yerleşim düzenini göstermektedir. Burun deliği bir pasajın içinden ağız oyuğuna açılır, ama hâlâ sadece koku alma için kullanılmaktadır. Hava ağız yoluyla yutulur ve hava kesesine girer. burun deliklerinin havanın alınması için kullanıldığı memelilerdeki sağda gösterilen tipik düzenlemeden sadece bir evrim adımı geridedir. Ne yazık ki hava ve yemek, birincisi nefes borusundan geçerek akciğerlere, ikincisi yemek borusundan geçip mideye gitmeden önce her ikisi aynı hazneyi paylaşırlar. Bu eli sıkı, cimri, pinti ama evrimsel olarak anlaşılır düzenleme, boğulma tehlikesi sunar.

nan kanal böbrekten idrar torbasına uzanan kanalın yanlış tarafından kıvrılır.

Doğal seçim özü itibarıyla öngörülemez niteliktedir, çünkü yer yer rekabet eden eğilimlerin sonucudur ve ilk bakışta avantajlı görünen adaptasyonlar ulaşamaz olabilir. İnsan apandisi bunun küçük bir örneğidir. Bizim için apandis tehlikelidir, çünkü hastalık yaratabilir ve bu da ölüme sebep verebilir. Enfeksiyon şişmeye neden olduğunda bu şişme apandise kan sağlayan atardamarı sıkıştırdığı için apandisit ortaya çıkar. Apandisin içine düzenli kan akması bakteri gelişimine karşı koruyucudur, dolayısıyla akışta azalma enfeksiyona yardımcı olur ve bu da şişmeyi artırır. Kan akışı tümten kesilirse bakteriler iyice gelişir ve apandis patlar. Küçük apandis bu olaylar zincirinin gelişimine büyük apandise oranla daha müsaittir, dolayısıyla apandisit hastalığı, küçülmeye başlaması elimizdekiyle devam etmekten daha tehlikeli olduğu için büyük apandise sahip olma yönünde seçim baskısı uygular. Bu nedenle tehlikelerine karşın evrimin apandisi ortadan kaldırması son derece zordur.

Doğal seçim bir silah yarısıdır. *Kızıl Kraliçe hipotezi* avcı hayvanlarla avlarının sürekli çatışma halinde olduğunu ve avcılar daha iyi avlanma stratejileri ve teknikleri geliştirirken avların da benzer şekilde davrandıklarını söyler. (Kızıl Kraliçe Alice'e hareketsiz kalmak için daha hızlı koşmaya devam etmeyi salık verir.) Bir yerde sivrilen bir diş başka bir yerde daha kalın bir deriyi ya da daha çevik ayakları doğurur, bu da karşılığında daha da keskin bir dişin ortaya çıkışını teşvik edebilir.

Doğal seçim aynı zamanda bulunulan yerin aynasıdır. Doğal seçilimin gidişatına fiziksel çevrenin etkisine çarpıcı örnek, dünyanın çok uzak bölgelerinde birbirinden bağımsız olarak benzer şekilde uyum sağlamış organizmaların ortaya çıkışıdır. Bu *yakın-sak evrim* süreci eteneli memelilerin keseliler versiyonlarının ortaya çıkışında çok çarpıcı şekilde görülür: Keselilerde embriyo esasen dışarıdaki bir kesede gelişirken, diğerinde esasen *in utero* (rahim içinde) gelişir. Bu yüzden memelilerin keseli olanları bundan 65 milyon yıl önce Senozoik çağ sırasında Avustralya, Antarktika'dan kopup kendi ayrık ekosistemiyle beraber Nuh'un gemisi gibi kuzeye kaydığında evrimleştiler (Şekil 1.7).



Şekil 1.7 Avustralya yaklaşık 60 milyon yıl önce Gondvana'dan koptu (evrelerin tarihleri için bkz. Şekil 1.9) ve yüzerek yalıtık hayvan kargosuyla beraber kuzeydoğuya doğru kaydı; bu durum evrimin bu devadanın içinde yalıtık kalmasına sebep oldu. Hemen hemen aynı zamanlarda Hindistan kuzeye kaydı, büyük kıta kütlelerine çarptı ve yarattığı kırılganlık Himalayaları doğurdu.

Eteneli (plasentalı) bir memeli olan Kuzey Amerika kurdu (*Canis lupus*), dış görünüm açısından keseli Tazmanya kurduna (*Thylacinus cynocephalus*) benzerdir. Doğal seçilimin uygun nişlerde bulunması çok sayıda benzer çözüme yol açtı (Şekil 1.8): Memeli oselo (*Felis pardalis*) keseli sansara (*Dasyurus maculatus*) benzer, uçan sincap (*Glaucomys volans*) bal porsuğuna (*Petaurus breviceps*) öykünür, dağ sıçanı (*Marmota monax*) vombatin (*Vombatus ursinus platyrrhinus*) peşinden ayrılmaz ve Doğu Amerika köstebeği (*Scalopus aquaticus*) keseli köstebeğe (*Notoryctes tryphlops*) benzer bir görünüme sahiptir. Ev faresi (*Mus musculus*) bile kendi keseli benzerine sahiptir: sarı ayaklı fare (*Antechinus flavipes*).

Lavrasya ve Gondvana'nın ayrı parçaları olan sırasıyla Kuzey ve Güney Amerika kıta kütleleri arasındaki volkanik Panama kara köprüsü bundan yaklaşık 3,5 milyon yıl önce ortaya çıktığında bu, Kuzey'in memeli popülasyonlarının güneye akın edip Güney'in önceki baskın keseli popülasyonlarıyla hayatta kalmak için kavgaya tutuşmasıyla türler arası mücadelelere sebep olmakla kalmadı, üstelik kara köprüsü okyanusların akıntısını bozdu ve gezegendeki biyotayı değiştiren Buzul Çağı'nın başlamasını tetikledi.

Fakat evrim savaşı değişimin itici güçlerinden yalnızca biridir, fiziksel çevredeki değişiklikler de evrimi tetiklemekte çok önemli bir rol oynar. Bu değişiklikler kitlesel yokoluş nedeniyle nişle-



Uçan sincap (*Glaucomys volans*)



Bal porsuğu
(*Petaurus breviceps*)



Ev faresi (*Mus musculus*)



Sarı ayaklı fare (*Antechinus flavipes*)

Şekil 1.8 Avustralya (ve Güney Amerika) yalıtık olmasına rağmen, evrimin benzer problemlerle yüzleşip benzer çözümler üretmesi gerekti. Burada örnek olarak iki memeliyi ve onların keseli karşılıklarını görüyorsunuz.

rin silinmesini ve bu vesileyle yeni popülasyonların şişmesini de kapsar. *Katastrofizm* (kıyamet kuramı), yani Nuh tufanında dramatize edildiği gibi dünyanın beklenmedik altüst oluşlara hedef olduğu fikri, oldukça etkili Fransız anatomi uzmanı ve omurgalı paleontolojinin kurucusu Baron Georges Léopold Chrétien Frédéric Dagobert Cuvier'nin (1769–1832) savunduğu itici güctü; kendisi jeolojik devirlerin sayısına eş çoklukta ön isme sahip olsa da jeoloji bilimi kurumsallaştığında gözden düştü. Jeolojinin akılcılaşması James Hutton'ın (1726–1797) *Theory of the Earth* (Dünya Kuramı, 1795) adlı eseriyle başladı ve Sir Charles Lyell'in (1797–1875) üç ciltlik *Principles of geology* (Jeolojinin İlkeleri, 1830–1833; Darwin Beagle'da bir kopyasını yanına almıştı) eseriyle yaygınlaştı. Hutton ve Lyell üniformitarianizm (tekdüzecilik) taraftarıydı; buna göre jeolojik tabakaların analizinden elde edilen çok sayıda kanıta dayanarak dünyanın fiziksel yapısının yavaş ve istikrarlı bir dönüşüm geçirdiği kabul edilirdi. Oysa bugün felaketlerin de yaşanmış olduğunu biliyoruz, bunlardan en ünlüsü de genetik anlamda yeterli esneklikte olmayan dinozorların hepsini birden dünya üzerinden silmiş olan asteroit çarpmasıdır.

Bu dev yaratıkları yapay tozla kaplanmış gecenin doğurduğu bitki yoksunluğu nedeniyle ölüme mahkûm oldular ya da atmosferdeki oksijen yoğunluğunun muhtemelen şimdikinden çok daha yüksek olduğu bir dünyada yanıp kül oldular. Onların ölümü dünyada memeli sayısının artmasının önünü açtı.⁸

Biçim alabilecek esnekliğe sahip olduğunu gösteren gezegenimizin tarihindeki bazı jeolojik zaman ve dönemleri belirtmemiz gerekiyor (Şekil 1.9). İsimlerin kaynakları farklı farklı, ama Galler ve West Country (İngiltere) en önde: Cambria (Kambriyen'deki) Galler için kullanılan eski isimlerden biri, Ordovices ve Silures (Ordovisyen ve Silüryen'deki) Roma dönemi öncesinden Galler kabilelerinin isimleri ve Devon⁹ (Devoniyen'deki). Bazı jeolojik dönemlerin bölündüğü bölümlerin biraz daha çılgın isimleri var: Paleosen ("eski yakın zaman"), Eosen ("yakın zamanın şafağı") ve Oligosen ("biraz yakın zaman") gibi. Diğer isimlerin etimolojisini de karşımıza çıktıkça parantez içerisinde vereceğim. Trias, Tersiyer, Kuaterner örneklerindeki gibi dönemleri sistematik tarzda isimlendirme denemelerinden gelenlerse bunun dışında kalacak.

Dinazor hükümdarlığının Kretase ("kireçli") dönemin sonuna da sona ermesi ilk akla gelen beş büyük olay içerisinde en çok bilinenidir. Permiyen (Perm, Doğu Rusya'da) dönemi sona erdiren felakette (artık her neyse) deniz hayvanı türlerinin yüzde 95'ten fazlası kayboldu. Ordovisyen dönem bundan 440 milyon yıl önce ansızın sona erdi; Devoniyen dönem 350 milyon yıl önce, Permiyen dönem 250 milyon yıl önce, Trias dönemi 205 milyon yıl önce, Kretase dönemse 65 milyon yıl önce bitti. Bu tükenişlerin çoğunun nedeni halen tam anlamıyla bilinmiyor, ama ileri sürülmüş birçok fikir de var; asteroit çarpmaları ve deniz seviyelerinde keskin düşüşler ve bunlara eşlik eden küresel soğuma gibi. Bu tükenişler elbette travmatik, ama yaşam kendisini çok çabuk toparlayabiliyor ve tür çeşitliliği çok hızlı bir biçimde yenisinden sağlanıyor: 5-10 milyon yıl içerisinde çeşitlilik tükenişten

8 Eğer mümkün olabileceği giderek daha fazla düşünüldüğü gibi, kuşlar dinozorların soyundan gelmeysel, bu durumda dinazor formatı inanılmaz derecede esnek, dirençli ve uzun ömürlü olduğunu ispatlamış demektir.

9 İngiltere'nin güneybatısında bir kontluk —çn.

	Zaman	Dönem	Bölüm	Önemli Olaylar
Şimdi	0.01	Kuaterner	Holosen	
	2		Pleistosen	Buzul çağı, büyük hayvanların soyunun tükenmesi
	5		Pliyosen	Erken insansılar
	25		Miyosen	
	35		Oligosen	
	55		Eosen	
	65		Paleosen	Erken memeliler
	145		Kretase	
	205		Jura	İlk kuşlar ve memeliler
	250		Trias	İlk dinazorlar
	290		Permiyen	Omurgasızların soyunun tükenmesi
	350		Karbonifer	İlk sürüngenler
	400		Devoniyen	İlk amfibiler (iki yaşamlılar), ilk ormanlar
	440		Silüryen	İlk hava soluyan hayvanlar, kara bitkileri
	500		Ordovisyen	İlk omurgalılar
	540		Kambriyen	
	700			İlk hayvanlar
	3400			İlk organizmalar
	4600			Dünyanın oluşumu

Şekil 1.9 Dünyanın çeşitli zaman, dönem, devir adlarıyla bölünen jeolojik zaman cetveli. Büyük olaylardan bazıları sağ sütunda gösterilmektedir. Çağların sayısal ifadeleri yaklaşıktır ve kaynaklarda farklı farklı belirtilmektedir.

önceki döneme eşitleniyor ve genellikle de onu aşıyor. Tükenişteki olaylar rakipleri silip süpürüyor, kolonizasyona uygun nişlere yer açıyor ve (soyu tükenenler haricinde) müthiş fırsatlar doğuruyor. Fakat tükenişler önemli olmasına karşın fazla da büyütmemek gerekir. Tipik bir hayvan türü yaklaşık 2 milyon yıl hayatta kalır, fakat soy tükenme patlamaları da yine tipik olarak 20-30 milyon yılda bir gerçekleşir, dolayısıyla türlerin çoğu felaket sonucu soy tükenmeyle yüz yüze gelmez. Dinozorların talihsizliği aslında çok başarılı olmalarındandı: Soylarının tükenmesine ulaşacak kadar uzun yaşamayı başardılar.

Şu anda alışılmadık bir kitlesel tükenişin ortasında gibi gözüküyoruz; insan faaliyeti biyosferi paylaşmak zorunda olduğu biyotanın çoğuyla ve muhtemelen kendisiyle de uyuşmayan bir biçimde dönüştürüyor. Bu şekilde tetiklenen bir tükenme “ilerleme”nin kaçınılmaz eşlikçisi olabilir, zira ultra karamsar neo-Malthusçu, bir yaklaşımla söylersek kendini yok etme becerisi kaçınılmaz şekilde zekânın gelişimini geçiyor olabilir. En kasvetli yaklaşımla bakıldığında, bireyler bir çırpıda (şu ana kadarki insanlık tarihinde olduğu gibi) yalnızca birkaç bin kişiyi öldürdüğünde toplumlar hayatta kalabilmesine karşın, tek bir bireyin on milyonlarca kişiyi öldürme gücüne sahip olduğu noktaya ulaşmış teknolojiyle hiçbir toplum hayatta kalamaz. İnsan toplumu bu noktaya henüz yeni ulaşmış durumda. Bu eğer bütün gezegenlerdeki toplumlar için genel bir kurala, o halde iyimser bilimkurgunun hayal gücüne dayanarak o kadar telkin ettiği insanlığın kozmik arzularını yerine getirmek adına çok az umut var demektir. Yine de kendi soyumuzun tükenişiyle hamam böceklerine yeni olanaklar sağlayacak olmamızla avunabiliriz.

Doğal seçilimin hasarılık zemini olan coğrafya ile genler arasındaki zengin etkileşime geçmeden önce yanıtlanması gereken birkaç önemli soru kaldı. Doğal seçilimin etki ettiği varlığın doğası, bunlardan biri. Gen üzerinde mi, birey üzerinde mi, tür üzerinde mi etkide bulunuyor?

Seçilim birimi olarak türü baştan eleyebiliriz. Organizmalar kendi türleri adına hiçbir şey yapmaz. Doğal seçim nasıl gelecek

karşısında körse, aşiret karşısında da kördür. Bir birey diğer bireylerle rekabet eder ve türü oluşturan organizmaların toplamının iyiliğine hiç bakmadan kendi başarısının peşinde koşarak hareket eder. Bireyi üreme güdüsü bencil davranışa yöneltir ve birey *altruizm* (diğerkâmlık, özgecilik) gibi bir kavrayışa, diğerlerinin yararına özveride bulunmaya sevk eden bilinçsiz davranışa sahip değildir.¹⁰ Bu birçok davranış biçiminin diğerkâm gözükmediği anlamına gelmez; ama daha dikkatli incelediğimizde bunların kuzu postu giymiş kurtlar misali olduğunu ve diğerkâmlığın dış ve pençeleri kan kırmızı gerçek bencillik olduğunu keşfederiz. İdeal insan toplumunu yöneten toplumsal sözleşmenin bir çeşitlemesi olan *karşılıklı diğerkâmlık*'ta bir organizma başka organizmalarla işbirliği yoluyla bencillikten keyif alır, çünkü gerilimli zamanlarda yardım edene de yardım edilebilir.

Daha derin bir düzeydeyse, türün üyelerinin genler paylaştığını ve belli bir rakibin üremesine yardımcı olarak bir organizmanın aslında bir yandan da kendi genlerinin yayılmasını kolaylaştırdığını anlamamız gerekiyor. Bu diğerkâmlık türüne *akraba seçilimi* denmektedir. Bu yüzden kuramsal biyolog J. B. S. Haldane (1892-1964) bu sayede eğer iki kardeşini ya da on kuzenini kurtaracaksa seve seve boğulabileceğini söylemiştir. Her bir kardeşi onun genlerinin yarısını paylaşır; kuzenleri de sekizde birini taşır (o halde sekiz kuzeni kurtarmak durumu eşitler, onunu kurtarmaksa genlerine avantaj sağlar). Genlerimizin davranışlarımızı belirlediğini kabul edeceksek tür düzeyinin altına, birey düzeyinin de altına, genlerin derinliklerine bakmamız gerekir.

Bu yaklaşımdaki sorunlardan biri, davranışla bire bir örtüşmenin çok nadir olmasıdır. Karmaşıklık yaratan sadece biyosfer de değildir, *genotip*'in (bir organizmanın genetik yapısı) *fenotip*'te (organizmanın fiziksel özellikleri) kendisini göstermesi de karmaşıktır. Kimi organizmalar kendilerini üreme zevkinden mahrum eder, ama onun yerine yakın akrabalarına yardım ederek geleceğe katkıda bulunurlar. Kraliçelerinin genleri kendilerinininkine o kadar yakındır ki kendi genlerinin yayılımını kendileri yerine onun üremesini sağlayarak başarırlar: Onların hiç bu zah-

¹⁰ İnsan davranışlarında diğerkâmlık ve bencillik normalde bilinçli faaliyetlerdir; genetikteyse bunlar bilinçsiz, içgüdüsel, önceden programlanmamış davranış sınıflandırılmalarıdır.

mete girmelerine gerek kalmadan onların genlerinin kopyalarını kraliçe seri halde üretir.

Bir başka sorun, bir düzeydeki (örneğin bireysel düzey) rekabetin sonuçlarının daha yüksek düzeydeki (tür düzeyi) sonuçlarının takip edilmesindedir. Bir bireyin avantajına olan, grup için zararlı olabilir. Birey evrimsel öngörüye sahip olmadığı için, kendi davranışının gruba etkilerini göz ardı edecektir. Yiyecek kıt olduğunda kimi bireyler doğurmaya devam edecek ve kendi genlerini sonraki nesillere aktaracaktır: Türün yararına bundan geri durmayacaklardır. Bunun sonucunda tür, bencil kopyaların gen akışı yönünde evrimleşecektir. Modern evrim biyolojisinde *grup seçilimi*'ne, bir tür ya da karşılaştırılabilir birey grubu düzeyinde seçilime soğuk bakılır: Doğal seçim daha alt bir düzeyde gerçekleşir ve türler arasında seçilimin göstergesi olan bütün evrimsel eğilimlerin izi sürülerek bunların normalde daha alt düzeyde bir seçilimin sonucu olduğu bulunabilir. Aslında özel bir durum olan akraba seçilimini dışta tutarsak, kesin surette gruba fayda sağlayan adaptasyon örnekleri yoktur: "Türün menfaati için" sloganı genel kabul görmemektedir.

Seçilimin birimi problemi farklı bir şekilde de ifade edilebilir, çünkü seçim en fazla belirli bir düzeyde görülür. Varlığın en alt düzeyinde, atomlar düzeyinde kimin kimi boğazladığı önem taşımaz, çünkü bütün atomlar cinayet, yaralama ve katliamlardan sağ çıkarlar. Çok daha yüksek bir düzeyde, Hayvanlar âlemini alalım mesela, kimin kimi boğazladığı yine önem taşımaz, çünkü bileşimindeki değişiklik ne olursa olsun âlem hayatta kalır. Bireyler ve genleri düzeyine geldiğimizdeyse hayatta kalmaya dönük müdahale çok daha önemlidir, çünkü katil ile öldürülen arasındaki ayrım şimdi hayati önemdedir. Ölçeği biraz yükselttiğimizde türe geliriz: Bir bireyin ölümü türün geleceğini elbette etkiler, çünkü genellikle ne kadar çok sayıda üreyen kişi varsa o kadar daha iyidir ve üreme yönünden kabiliyetli olmanız şartıyla sizin hayatta kalmanız da katkı anlamına gelir. Ziyafeti çeken memeliyse ve ziyafet memeli değilse memeliler sınıfının hayatta kalma şansı da yükselir, fakat köpeklerin köpek yemesi (genel anlamıyla da memelilerin memelileri yemesi) fark yaratmaz. Ölçeği ters yönde, bireyden aşağıya doğru değiştirirsek, genleriyle karşılaşı-

rız ve genler de birey için ve tür için özel taslak niteliğindedir. Bir başkasının genlerinin ziyafete konu olması, o kişinin ziyafet konusu olmasından daha az mı, daha çok mu önemlidir?

Seçilim birimini tespit konusunda bir başka yaklaşım, hangi varlığın potansiyel anlamda ölümsüz olduğunu belirlemektir. Atomlar ölümsüzdür, ama onlar da en üst âlem bazında organizmaların değil, minerallerin temsilcisidir. DNA'nın ikili sarmalını oluşturan bileşenler (2. Bölümde ele alacağımız "nükleotit bazlar") doğası itibarıyla cansızdır, tıpkı alfabenin harflerinin edebiyat olmaması gibi. Bu bileşenler ölümsüz olsaydı bile, tam anlamıyla canlı olarak değerlendirilmezlerdi. Hücrelerde DNA'yı tamamlayan her şeyi kapsayan insan genomu da ölümsüz değildir, çünkü eşeyli üreme sırasında bir şeridin (bir genin) bir diğeri-nin yerini almasıyla gerçekleşen *mayoz rekombinasyon* (çeşitlenme) adı verilen süreçte kesilir ve değiştirilir (bu süreçle ilgili de 2. Bölümde bakınız). Fakat bir düzey atlamış olduk: Gen, DNA'nın üreme yönünden aktif şeridi. Bir gen potansiyel anlamda ölümsüzdür (mutasyon geçirene dek), çünkü genomdan genoma hiç dokunulmadan" transfer edilir. O halde seçilim birimi o mudur? *Adaptation and natural selection* (Adaptasyon ve doğal seçilim, 1966) kitabında George Williams bir genin doğal seçilimin birimi şeklinde hizmet etmeye yetecek kadar nesil boyunca potansiyel anlamda dayanacak kromozom malzemesinin bir parçası olarak görülmesi gerektiğini ileri sürdü. Oxfordlu zoolog Richard Dawkins (d. 1941) haklı şekilde ün kazanmış *The selfish gene* (*Bencil Gen*, 1976) adlı kitabında bu fikri acımasızca geliştirdi ve bir genin bencil davranarak biyosisteme nasıl yayıldığını ve kendi hayatta kalışını çoğalttığını açıkladı.

Önsözde bilimin kendi sezgilerini derinleştirmesinin ve daha yüksek soyutlama düzeylerine uyum sağlayarak menzilini genişletmesinin ne kadar tipik olduğundan bahsetmiştim. Bu eğilim biyolojide net şekilde görülebilir. Doğal seçilim soyutlama geliştirmek için doğal bir gübre yığındır ve genin seçilim birimi olarak tespiti bu yönde büyük bir adımdır. Buradan hareketle Dawkins doğal seçilimin en alt düzeyde, genlerde gerçekleşmesi

11 "Hiç dokunulmadan" diyorum, çünkü mayoz sırasında gerçekleşen rasgele DNA kırılmaları genin ortasında gerçekleşse bile, rekombinasyon adımı yeni genomda geni yeniden yapılandırır.

arayışındadır ve bir organizmaya acımasız bencil (buradaki vurgum teknik anlamdadır) genin kendi yayılımını sağlama almak için görevlendirdiği bir kullan-at muhafaza şeklinde bakmaktadır. Bilinçsiz gen muhafazasını, fenotipini yine bilinçsiz şekilde, çevresine olabildiğince uyum sağlamaya dönük olarak şekillendirir, çünkü en iyi uyum sağlamış muhafazalar genin çoğalmasını güvence altına alır.

Seçilimin daha da aşağı bir düzeyi vardır, bu genden bile soyut ve hatta potansiyel anlamda daha da ölümsüzdür. Gen, vücudun rengi gibi özellikler ya da bir kükremenin ses şiddetini artırmak için gereken fizyolojik değişiklikler gibi fenotipik bilgileri şifreli şekilde taşır. Gen, metabolik süreçler DNA ipliklerini kopyalayıp kopyaların her bir hücreye ve sonraki nesle geçişini güvence altına alırken yenilenmesi gereken bir fiziksel varlıktır. Bu açıdan bir fiziksel varlık olarak gen dahi ölümsüz değildir, çünkü fiziksel gen sürekli yeniden inşa edilmek zorundadır. Bilginin DNA içerisinde şifrelenmiş olması ayrıntıdır, bir uygulamadır, esas değildir. Geni seçim birimi olarak değerlendirdiğimizde aslında taşıdığı bilgiye odaklanıyoruz ve organizmanın bedeni nasıl gen için harcanabilir bir araç ise, aynı şekilde DNA içindeki baz dizilimi de genin içerdiği bilginin elden çıkarılabilir bir fiziksel gerçekleştirmedir. Yaşamın gerçekten ölümsüz bileşeni fiziksel gen değil, onun içerdiği soyut bilgidir. Bilgi ölümsüzdür ve bilgi acımasız şekilde bencildir. DNA onun gerçekleştirimi ve göz ardı edilebilir, itaat eden muhafazası olan bir beden olmak üzere, genetik bilgi muhtemelen seçilimin nihai birimidir.

Canlı dünya, inorganik madde karışık, öngörülemez bilgiyi iletmenin bir yoluna rastladığında ve aralıksız kopyalanması yoluyla bu bilgi için ölümsüzlüğün yakalanabileceğini bulduğunda ortaya çıktı. Burada devamlılık yalnızca sürekli kopyalama yoluyla başarıldığı için karşımıza tüm gücüyle koşan başka bir Kızıl Kraliçe çıkıyor. Aynı şekilde bizim sözde uygar, bayındır, akıllı ve düşünceli yaşam düzeyimiz de organizmalar karışık, öngörülemez bilgiyi çevrelerinde bulunan başkalarına iletmenin ve onları izlemenin bir yoluna rastladığında ortaya çıktı. Bunu dilin icadıyla ve geçmiş, bugünkü ve gelecekteki bütün insan

organizmalarını potansiyel anlamda sınırsız başarıda tek bir mega organizmaya bağlayarak başardı.

Kalpten gelen bu tumturaklı sözlerimizi de sarf ettiğimize göre, artık cins (eşey) konusuna geçebiliriz. Doğal seçilimin çok kafa karıştıran yönlerinden biri de cinsel üremenin evrimidir. İlk bakışta cinsin varlığı bir türe genetik esneklik ve değişen koşullara hızlı yanıt vermesi bakımından iyi bir fikir gibi gözüküyor. Fakat sorunlar var.

Birincisi cinsin varlığı gereksizdir. Birkaç tür o olmadan da idare etmeyi gayet iyi başarmış. *Partenogenez* (dölllenmesiz üreme) bitkilerde yaygın görülüyor ve bitkilerde buna *partenokarp* deniyor. Partenokarp karahindibalardan daha önce bahsetmiş-tik, buna böğürtlen (*Rubus*) ve aslanpençesi (*Alchemilla*) gibi daha yaygın bitkileri de ekleyelim. Bazı sürüngenler cinsiyetsiz biçimde çoğalır; (Teiidæ familyasından) *Cnemidophorus* cinsi Yeni Dünya kertenkeleleri, (Lacertidæ familyasından) *Lacerta* cinsi Eski Dünya kertenkeleleri ve Brahma kör yılanı (*Ramphotyphlops braminus*; familyası Typhlopidae) en çarpıcılarıdır. İncil'deki aksi yönde savlara rağmen hiçbir memeli cinsiyetsiz (eşeysiz) üremez.

İkincisi cins istikrarsızdır. Belirli bir türün cinsel yoldan ürettiğini, çok sayıda döl ürettiğini, bunlardan yarısının eril yarısının dişi olacağını düşünelim. Popülasyonun sabit kalması için bu yavrulardan ikisi hariç hepsi ölecek ve geriye ortalama olarak bir eril ve bir dişi kalacaktır. Şimdi bir dişide mutasyon gerçekleştiğini ve artık eşeysiz şekilde üreyebildiğini düşünelim. Yine çok sayıda döl üretecektir ve bunlardan yaklaşık ikisi hayatta kalacaktır; fakat bu dölller annelerinin kopyaları oldukları için dişi olacaklardır. Her ikisi de dölllenmesiz üreyebilecek ve daha fazla dişiye hayat verecektir. Yalnız eşeysiz dişinin eşeyli çiftle aynı sayıda döl üretmesi koşuluyla (babalar cinsel birleşme sonrasında da sık sık rol üstlendikleri için tartışmaya açık bir varsayım elbette) birkaç nesil sonra dölllenmesiz üreyen dişi popülasyonu baştaki popülasyonu istila etmiş olacaktır. Cinsin varlığının istikrarı sağlayan bir karşı avantajı olması gerekir.

Üçüncüsü cinsin varlığı son derece karmaşıktır. Cinsel üreme girift bir *mayoz* mekanizmasına dayanır ve 2. Bölümde göreceğimiz gibi germ hattı hücrelerindeki (gametler, sperm ve yumurta) kromozom sayısı ikiye bölünür, ama tekrar döllenmedeki somatik (tipik vücut hücresi) sayısına getirilir. Bu incelikli mekanizmanın gelişimine yol açan olağanüstü güçte seçim baskıları nelerdir? Önceden var olan anatomik ve biyokimyasal özelliklerin beraber işe koşulması ve değişmesiyle karmaşık mekanizmaların gelişiminde alışılmadık bir yan yoktur (gözlerin bağımsız olarak çok kez evrimleşmiş olması buna örnektir) ama gözesahip olmada da karşımıza çıktığı gibi, organizmanın reddedemeyeceği bir teklifin, ciddi şekilde güçlü bir kazanımın olması gerekir.

Richard Dawkins'in Darwin'den bu yana gelmiş en önemli Darwinci unvanına aday biri olarak değerlendirdiği Oxfordlu biyolog William Hamilton (1936–2000) bu kazanımı tespit ettiğini düşündü. Hamilton parazitlere derin ilgi duyuyordu ve ironik ve trajik bir biçimde kendisi bizzat bu parazitlerden birine (sıtma) yakalanıp hasta yatağında ölmeden kısa bir süre önce cinsin varlığının organizmaya pençesine düştüğü parazitlerden bir adım önde olmayı sağladığını ileri sürdü. Parazit ile taşıyıcısının, her birinin diğerinin evrimi için hızla değişen bir çevre sağladığı birlikte evrimi, hızlı ve özel türde bir tepkiye gereksinim duyar ve cinsin varlığı bunu sağlayabilir. Bir arada yaşamının dinamikleri üzerine yapılan özenli analizler, Soğuk Savaş sırasında ulusların yaptıkları manevralar gibi, cinsin varlığının avantaj sağladığını, bunun nedeninin de gereksizleşmiş ama parazitin genotipi daha önceki bir cisimleşmeye tekrar döndüğünde yeniden ihtiyaç duyulabilecek olan genetik bilginin depolanması için bir mekanizma sağlaması olduğunu gösteriyor. Diğer bir deyişle cinsin varlığı eski tüfeklerin karşısında kılıçlar için bir depo sağlıyor, zira eski tüfeklerin mühimmatı bitebilir. Öte yandan eski tüfeklerin yerini nükleer silahlar almışsa depolanan kılıçlar kullanışsızdır; yani parazit eskisine dönmek yerine yeni bir strateji geliştirirse cins (eşey) kullanışsızdır. Bu kuramda spekülatif bir yan vardır, çünkü deneysel anlamda onaylanması zordur ve parazit ile taşıyıcısı arasında özel bir evrimsel ilişkiye dayanır.

Cinsin varlığını sürdüren mekanizmaların tespiti karmaşık

işlerin doğduğu mekanizmaya oranla daha kolaydır. Birincisi eşeyli üreyen popülasyonlar çevredeki adaptasyonlara döllemesiz üreyen popülasyonlardan daha çok yanıt verir. Bu nedenle avantajlı mutasyonlar ebeveynlerin her birinde ayrı ayrı gerçekleşebilir ve üreme yönünden avantajı döllere aktarabilir: Döllemesiz üremede bir mutasyonu başka bir mutasyon izlemek zorundadır. Diğer bir ifadeyle mutasyon eşeyli popülasyonlarda paralel gerçekleşebilirken, eşeysiz popülasyonlarda arka arkaya gerçekleşir. İkincisi eşeyli popülasyonlarda istenmeyen mutasyonların doğması daha az olasıdır, çünkü ebeynlerin ikisi de istenmeyen mutasyona sahip olsalar da normal bir çocuk üretebilirler (bu Mendelci kalıtım yaklaşımında görülmektedir, 2. Bölüm), fakat eşeysiz üreyen bir organizmanın kötü bir mutasyondan kendisini kurtarması sadece aynı genin bir geri mutasyon yaşamasıyla mümkündür ve bu da pek olası değildir. *Seksüel dimorfizm*'in (aynı türden eril ve dişilerin farklı görünmesi) açıklanması (ya da en azından mantıklı açıklamalar uydurulması), özellikle de eril olanların sahip olduğu gereksiz görünüm farklılıklarının açıklanması kolaydır. Örneğin cinsin evrimi kuramının bir sonucu olarak Hamilton bir erkeğin gösterişli görünümünü sağlıklı ve parazitsiz olmasının işareti olarak değerlendirir. Bu durumda erkeğin dişi tarafından incelenmesi (biz insanlar buna "âşık olmak" diyoruz) tıbbi incelemeye yakınlık taşır.

Cinsin varlığı popülasyonlar, bireyler ve genler üzerinde çeşitli düzeylerde avantaj sunuyor gibi gözüküyor. Evrimsel kaymaların çoğu sadece çok küçük bir avantaj sağlar: Cinsin varlığının masrafını karşılayabilmek için avantajın çok büyük olması gerekir. Alakasız bir yabancıнын genlerini senin genlerine karıştırmak ne diye bir avantaj yaratsın? Temel sonuç şu ki organizmaların onu elde etmek için ne kadar ileri gidecekleri sorusu dahil cinsin kökeni halen gizemini korumaya devam ediyor.

Dünyanın hareket ettiği hissinden ayrılıp şimdi dünyanın gerçek hareketine dönelim. Tektonik süreçlerin varoluşumuza yaptığı en büyük etki, Afrika'nın kıtasal kabuğunun güney yarımkü-

reyi gezerken maruz kaldığı basınçlara tepki olarak kırışmasıyla gerçekleşen önemli değişikliklerdir.

20 milyon yıl önce Afrika geniş düzlüklerden oluşuyor ve ortasından tropik ormanlar geçiyordu. Ardından dünya hareket etti. Farklılık 15 milyon yıl önce, bugün Kenya ve Etiyopya olarak adlandırdığımız bölgede yerel nitelikte bir yukarı çekme merkezi lav yüksekliklerine sebep olduğunda görülmeye başlandı. Altlarındaki toprak farklı yerlere doğru hareket ettiği için bu dağlık arazilerde duyarlı bir yer oluştu. Aralarındaki açıklık genişlediğinde yükseklikler çöktü ve derin ve uzun bir kırık, günümüzde Mozambik'ten başlayıp Etiyopya'dan geçerek Kızıl Deniz'e ve ötesine, Suriye'ye dek uzanan Büyük Rift Vadisi oluştu. Yeni durumda ortaya çıkan dağlık bölgeler kıtanın doğu kısmına bir yağmur perdesi çekti ve tropik orman ağır ağır çözülerek açık bozkırlara dönüştü. Yeni durumda arazi zengin bir potansiyel habitat çeşitliliği sundu (birkaç farklı *biyom*) ve bazı yerlerde nemli, sıcak, bitki yönünden zengin alanlar, başka bazı yerlerde de kuru otlaklar görüldü. Nişler keşfe açılmış olmakla kalmadı, üreme yalıtımı da keşfe ve sömürüye açıldı, çünkü organizma çeşitleri ortaya çıkmış olan doğal bariyerleri aşarak göç edemiyordu. Organizmalar hapsolmuştu.

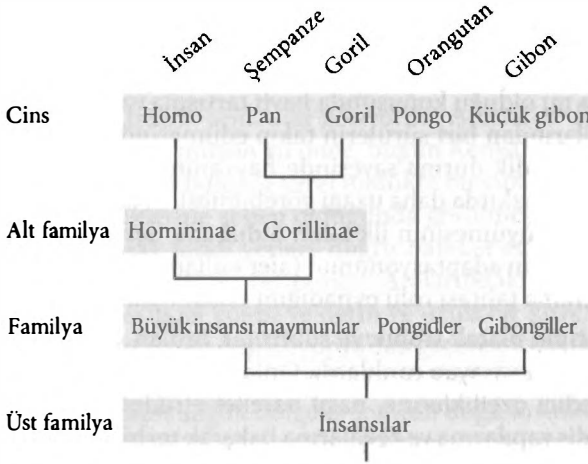
Organizmalar fiziksel uzayda hapsolmuştu ama evrimsel uzayda hapis değildi. Doğal seçilimin en önemli sonuçlarından biri *Homo sapiens*'in, *H. sapiens* tarafından evrimin tanrısı olarak görülen türün varoluşudur. Darwin kuramının işaret ettiği sonuçlara karşı duyarlıydı, sonuçta insanın özel şekilde yaratılmadığı ve kuyruksuz maymunlardan geldiği belirtiliyordu. Hristiyanlığa eğilim duyanlara insanın herhangi bir indirilme olmaksızın ortaya çıkmasının, dogmasında günden güne kurtarılma fikrinin merkezi bir yer tuttuğu Hristiyan Kilisesi'nin temelini oyduğu düşüncesi de rahatsızlık verdi. Her ne olursa olsun sizlerin ve benim soyumuzun maymuna benzer atalara dayandığının tartışmasız kanıtları var. Kendimizin ve biyosferdeki yerimizin anlaşılmasında atalarımızın kim olduğu meselesi o kadar önemli ki bunun üzerine düşünmeye biraz zaman ayırmak uygun düşecek.

Doğal seçim karasallığa (karada yaşamaya geçişe), iki ayaklılığa (iki ayak üzerinde dik yürünerek ellerin kullanım için ser-

best bırakılması), beynin büyümesine (beynin büyüklüğünün vücudun büyüklüğüne oranla artışı) ve kültürün ortaya çıkışına açıklama getirmek durumundaydı. İki ayaklılığın karasallıktan önce mi sonra mı olduğu konusunda hayli tartışma var. İki ayaklılığın avantajlarından biri sürülerin takip edilmesinde dayanıklılığı artırması ve dik durma sayesinde hayvanın avcı yırtıcıları tespit açısından bozkırda daha uzağı görebilmesini sağlamasıdır. Kimileri beynin büyümesinin ilk adım olduğunu ileri sürerken, kimileri de kültürün adaptasyonunun (alet kullanımı dahil) gelişimimizde sıçrama tahtası rolü oynadığını düşünüyor.

Primatlar tipik olarak tropik ve subtropik orman ekosistemlerinin ağaçlarında yaşayan canlılardı. Onları el ve ayak anatomilerinin ayırt edici özelliklerine, nasıl hareket ettiklerine, görsel becerilerine, diş yapılarına ve zekâlarına bakarak teşhis ediyoruz. Primatların en önemli ayırt edici özelliklerinden biri yaşam tarzı olarak zekânın evrimi olduğu için bu son özellik merkezi önem taşıyor. Diş özellikleri önemli, çünkü beslenme düzenlerinin türünü ve özelde de hayvanın ağaçta yaşayıp yumuşak meyveler mi yediğini, yoksa karasal yaşam sürüp daha sert tohum ve tahıllarla mı beslendiğini tespit etmemizi sağlıyor. Primatlar iki ana gruba ayrılıyor, *prosimianlar* (önmaymunlar) ve *antropoitler*. Önmaymunlar lorisleri ve galagoları (çalı bebeği) içerirken, antropoitler maymunları, kuyruksuz maymunları ve insanları kapsar.

Şekil 1.10 insanın soyağacını gösteriyor ve insanın uzak tarihi biraz akıl karıştırıcı olduğu ve halen toparlanmaya devam ettiği için bunun üzerinde biraz durmakta fayda var. Çok eskiden Senozoik (“yakın zaman hayvan”) zamanın Tersiyer (“üçüncü”) döneminin Paleosen (“eski yakın zaman”) bölümünde, erken önmaymunlar modern önmaymunlara (ki bu bizi artık ilgilendirmiyor) ve evrim ağacında bize dek uzanacak olan dala bölündüler. Erken Oligosen’de (tarıfsız “biraz yakın zaman”) Yeni Dünya maymunları (*platyrrhines* ki düpedüz yassı burunlular anlamına gelip marmosetgiller, uluyan maymunlar ve kapuçinleri kapsıyor) Güney Amerika’da kamp kuruyorlar. Evrim ağacında bizim dalımızın ayrılması daha sonra, Eski Dünya maymunları (*catarrhines* ki “dar burunlular” anlamına gelip ağaçta yaşayan



Şekil 1.10 İnsanın soyağacı. Yıllar içerisinde çeşitli dallarda değişiklikler olsa da şu an kabul edilen versiyon bu gibi gözüküyor.

kolobus maymunları, karada yaşayan makaklar ve şint şebekle-rini kapsıyor) Afrika’da ortaya çıktığında oldu. İnsansılar (homi-nidler) ilk olarak yaklaşık 30 milyon yıl önce, Miyosen’de (“orta yakın zaman”) *Dryopithecus* (ya da tahmini tropik ya da subtro-pik orman habitatlarını yansıtır şekilde “meşe sakini”) formun-da ortaya çıktı.¹² Erken Miyosen kuyruksuz maymunları, örneğin *Proconsul* postür yönünden maymunlara çok benzerdi: *Procon-sul*’ün kuyruğu yoktu (kuyruksuz maymunlar gibi), ama bedeni yere paralel uzanırdı (maymunlar gibi). *Proconsul* karşıt başpar-mağa da sahipti, dolayısıyla bu onun basit aletleri kullanabil-me olasılığının da göstergesidir. Hominid fosillerinden Misoyen boyunca Afrika ve Avrasya’da olduğu anlaşıyor ve *Proconsul*’ün bir türünün en erken örnekleri ise takriben 22 milyon yıl öncesi-ne tarihleniyor.

Miyosen’in ortalarına doğru, bundan 10 ila 15 milyon yıl önce İspanya ve Macaristan kadar kuzeyde bulunmuş *Dryopithecus* birkaç cinse bölünmüş, bunlardan *Sivapithecus* Hindis-tan, Pakistan ve hatta büyük ihtimalle Türkiye’de görülürken,

¹² Bugün kimilerince insan familyasını andıran hayvan grubu için *homi-nid* yerine *hominine* terimi kullanılıyor.

Ramapithecus Afrika'da bulunmuş. *Sivapithecus* büyük ihtimalle orangutanın atalarından; *Ramapithecus* uzun süre insanın atalarından sayıldı, ama şimdi o dönem etrafta dolanan kuyruksuz maymuna benzer birçok türden sadece biri olduğu düşünülüyor. Bundan 3 milyon önce yaşayan hominidler biri büyük beyinli küçük azı dişli, diğeri küçük beyinli uzun azı dişli olmak üzere iki gruba ayrıldı. İlki *Homo* cinsini oluştururken, ikincisi *Austropithecus* ("güney kuyruksuz maymunu") türünün australopithecineleri oldular. İkincisinin ilki *A. africanus* 1924 yılında Johannesburg yakınlarındaki Tang'da taş ocakçılığı yapılırken bulundu ve *Homo*'nun atası zannedildi. İlk başta bu keşif fazla dikkat çekmedi, büyük ölçüde bunun nedeni yakın zamanda Piltdown sahteciliğinin ağır hatırasının kuşkuculuğu beslemiş olmasıydı, bir de Afrika'nın insanlığın beşiği olmak için uygunsuz bir yer olduğu düşüncesi vardı; İngiltere çok daha fazla tercih edilirdi, tercihen Londra çevresi ama güney batı İngiltere de sorun yaratmazdı. *A. africanus*'un filogenetik ağaçta nereye oturduğu konusunda halen daha belirsizlik sürmektedir.

1962 yılında hominid fosili avcılarının duayeni Louis Leakey, Tanzanya'nın Serengeti düzlüğündeki Olduvai Gorge'ta kazı yaparken alet kullanan bir hominidin kalıntılarıyla karşılaştı ve onun bundan yaklaşık 1,8 milyon yıl öncesinden yeni bir tür, *Homo habilis* ("eli yatkın kişi") olduğunu tespit etti. Taş alet yapımı bundan yaklaşık 2,5 milyon yıl önce, beynin önemli derecede gelişimiyle kabaca aynı zamanda başlamış gibi gözüküyor ve alet yapımının mı beyni büyüttüğü yoksa tersinin mi doğru olduğu tahmin edilmeye çalışılıyor. O dönemde *H. habilis* büyük tartışmalara sebep oluyordu, çünkü kimileri (tür içerisinde daha fazla fiziksel varyasyon olduğu düşüncesiyle) onun büyük bir *A. africanus* olduğunu düşünürken, kimileri de küçük bir *H. erectus* (kendisiyle birazdan tanışacağız) olduğu düşüncesindeydi. Şu an *H. habilis*'in gerçek bir tür ya da en azından *H. erectus*'a giden yolda bir kronotür olduğu düşünülüyor. Şu an yine hepsi *H. habilis* diye torbalanmış olan bir dizi iskeletin aslında *H. habilis* ve *Homo rudolfensis* adında iki ayrı tür olduğu, ikincisinin (bugün kuzey Kenya'daki Turkana gölü, o dönem Rudolf gölü denen ilk bulunduğu yerden adını almış) biraz daha büyük bir beyninin ve daha modern bir beyin yapısının olduğu düşünülmektedir. Bu

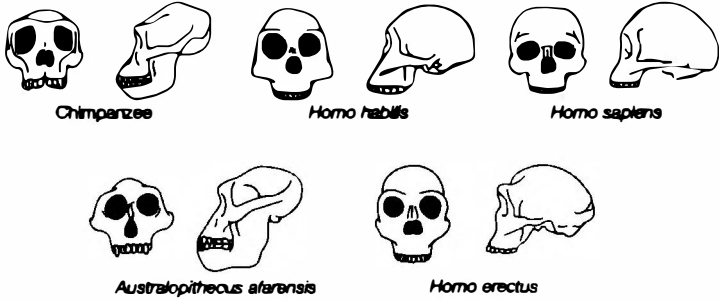
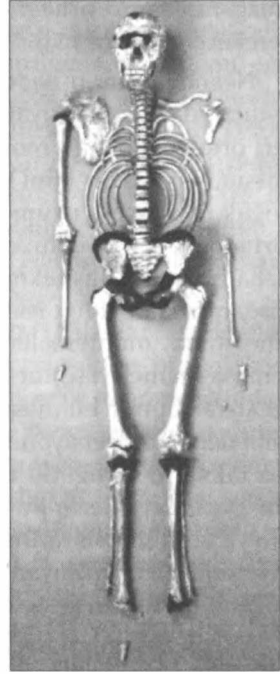
türlerden hangisinin sonunda *H. sapiens*'e evrildiği bilinmiyor, çünkü "bariz" yanıt olan daha büyük beyinli *H. rudolfensis*'in karşısında, bu türün söz konusu tezi geçersiz kılan başka anatomik özelliklere sahip gibi gözükmesi engel oluşturuyor.

Şimdi (2 milyon yıl önce), burada (Afrika'da) *Homo ergaster* ("çalışan insan") taş alet takımıyla sallana sallana sahneye giriyor. Kendisinden önce gelenlerden daha uzun boylu ve daha büyük bir beyne sahip. 1984 yılında Richard Leakey tarafından Turkana gölünün batı kıyısında keşfedilen "Turkana Çocuğu" (Şekil 1.11) türün örneğidir: Oğlan çocuğunun bedeninin tümlüğü etobur hayvanlar tarafından parçalanmadığı için bundan 1,6 milyon yıl önce boğulmuş olabileceğini gösteriyor. *Homo ergaster* geniş açık alanlardan ve ılıman ve hayli kuru iklimden yararlandı; Aşölyen olarak adlandırılan aletler kullandı. İsim, yarık şekilli el baltası gibi hayli gelişmiş iki yüzlü taş aletler koleksiyonunun bulunduğu Fransa'daki Saint-Acheul'dan alınmış. *H. ergaster*'in leşçil değil avcı olduğu tahmin ediliyor.

Yaklaşık 1,8 milyon yıl önce *H. ergaster* Asya içlerine yayıldı ve orada ve Afrika'da *H. erectus*'a evrimleşti. *H. erectus* ("dik insan") tümüyle dik ve iki ayaklıydı, boyu muhtemelen modern insanlar kadar uzun, fakat yüzü daha ağır, alnı çöküktü ve kaş çıkıntıları vardı (Şekil 1.12). *H. erectus*'un sürü şeklinde davrandığı, dolayısıyla buzullaşma dünyayı soğutunca ormanların azaldığı ve bu durumun onları Suudi Arabistan'ın tropik ve subtropik alanlarından orta Çin'in güneyine dek sürdüğü düşünülüyor. Buradan kara köprüsünü geçerek Java'ya girdi ve böylece 1891 yılında Eugene Dubois tarafından "kayıp halka" arayışı sırasında Solo Nehri'nde "Java insanı"nın parçalarının bulunması mümkün oldu.

"Afrika'dan dağılma hipotezi"ne göre *H. sapiens* ("düşünen insan") yaklaşık 150 bin yıl önce Afrika'da büyük ihtimalle *H. ergaster*'den, ama belki de (beyin büyüklüğünü eldeki zayıf kanıtlardan anladığımız kadarıyla) pek o kadar akıllı olmayan *H. erectus*'tan evrimleşerek ortaya çıkmış gibi gözüküyor. Bir süre sonra *H. sapiens*'in, kalıntıları ilk kez 1856 yılında Almanya'daki Neander Vadisi'ndeki Düssel Nehri'nin üzerindeki Felderhofer Grotto'daki taşocağı işçileri tarafından keşfedilen ve tam bir

Şekil 1.11 Bir bireyin talihsizliği bilim adına büyük bir kazanım olabilir. Bu bir H. ergaster türü olan ve bundan 1,6 milyon yıl önce kayıplara karışan (boğulduğu düşünülüyor) ve 1984 yılında bulunan Turkana Çocuğu'nun (resmi adıyla WT-15000'ün) tama yakın iskeleti. Bu iskeletin ayrıntılarından önemli çıkarımlar (bunları spekülasyon diye değerlendirenler de olabilir) yapılabilir. (Modern insanlarla karşılaştırıldığında) hayli ağır kemikler, rutin fiziksel emek harcanmış olduğu izlenimini veriyor; omuriliğin uzandığı omurga kanalı modern insanlardan daha küçük bir çapa sahip ve bu daha az sinir gidiş gelişine, dolayısıyla bu da nefes üzerinde daha az kontrole ve bu yüzden spekülatif anlamda konuşulan bir dilin yokluğuna işaret ediyor. Pelvisin boyutları ve yenidoğanların gelişimi açısından kadınlardaki sonuçları da çocuksu yardıma muhtaçlığın ve bunun zorunlu kıldığı toplumsal düzenin türde gelişmiş olduğu anlamına geliyor.

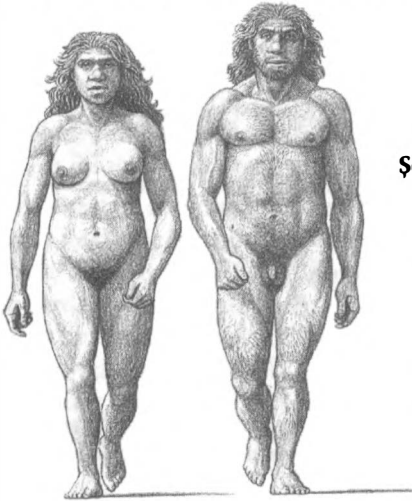


Şekil 1.12 Şempanzenin ve çeşitli *Homo* türlerinin kafatası. Sırada ilerledikçe kaş çıkıntısının kayboluşuna ve kafatasının büyüyüşü ve yuvarlaklaşmasına dikkat ediniz.

“mağara adamı” örneği olan *H. neanderthalensis*’le yüzleşmesi gerekecekti (Şekil 1.13).

Neandertallerin bedenleri bizden daha büyüktü, daha kaslıydılar, daha sağlam yapılı ve daha geniş göğüslüydüler. Beyinleri ortalama olarak modern insanlardan daha büyük olmasına karşın, kafatasları kimi yorumculara göre ön loba sahip değildi. Soğuk bir çevreye uyum sağlamış gibi gözüküyorlar. Daha sonra Ortadoğu, Asya ve kuzey Afrika’da başka Neandertal örnekleri daha bulundu. Taş teknolojileri bugün Fransa’daki Le Moustier mağarasından aldığı isimle *Musteryen* olarak adlandırılıyor. Bir süre sonra, muhtemelen bundan 40 bin yıl önce *H. sapiens*’le temasa geçmeleri sonucunda Aşölyen teknolojisinden bazı fikirler alarak bunun bir mağara alanından aldıkları adla *Châtelperronian* denen bir versiyonu geliştirdiler. Boynuz ve kemikten yapıma takıların varlığı iki tür arasında ticaretin olduğunu gösteriyor. Neandertallerin ev hayatına baktığımızdaysa 43 bin ile 67 bin yıl arasında bir tarihe ve modern insan müziğinin yedi notalı diatonik ölçüsüne uyan deliklere sahip muhtemelen Neandertal kökenli bir flütün keşfedildiğini görüyoruz.

Müzik akşamları haricinde Neandertaller avlanmada işbirliği yapan, (gırtlak yapısı dillerinin pek fazla boğumlanmaya sahip olmadığına işaret etse de) büyük olasılıkla dil aracılığıyla ileti-

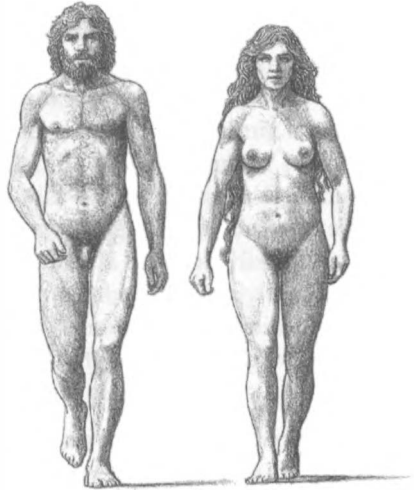


Şekil 1.13 Bir Neandertal çiftin muhtemel görüntüsü; modern insanlarla karşılaştırıldığında daha sert hatlara sahip olduklarına dikkat ediniz. Daha sert bir kaş çıkıntısına ve geriye çekik çeneye ve alına sahipler. Neandertallerin *H. sapiens*’le çiftleşmiş olmaları mümkün gözüküyor; soyları tükenmiş.

şim kuran ve ölülerini sevecenlik anlamında yorumlanabilecek şekilde gömdüklerinin (fakat nedeni kaya düşmesi de olabilir) anlaşıldığı bir toplumsal düzen geliştirdiler. Öte yandan eğer konuya dair kültürümüzdeki iğrenmeyi göz ardı edebilirsek yine sevecenlik anlamı doğabilecek, sevilen birinin kelimenin gerçek anlamıyla içselleştirilmesi anlamında yamyam olmaları mümkündür. Eğer tek bir sanat eseri, parlatılmış ve oyulmuş tek bir bebek mamut dişi güvenilir bir antropolojik kestirim yapılmasına yetecek nitelikteyse, bu durumda Neandertallerin sanatçı olduklarını da söyleyebiliriz.

Sanatçıydılar ve her koşulda hayatta kalanlardan değildiler, zira *H. neanderthalensis* bundan yaklaşık 30 bin yıl önce evrimin ölü ucunda, yaşam ağacının incecik dalının ucundaki kuru yaprak misali ortadan kayboldu. Neandertallerin dünya üzerinden silinişi doğudan batıya doğru tüm Avrupa'ya yayılan bir işgal dalgasının altında yaklaşık 40 bin yıl önce başlayıp 27 bin yıl önce tamamlandı. İstila eden *Cro-Magnonlar* (Şekil 1.14) modern insanlarla hemen tümüyle aynı *H. sapiens* çeşidiydi ve adını 1868'de ilk örneklerinin bulunduğu orta Fransa'daki (Dordogne'deki Les Eyzies-de-Tayac yakınlarında yer alan) bir bölgeden alıyordu. Cro-Magnon sığağa uyum sağlamıştı ve bu Afri-

Şekil 1.14 Burada hayalgücünün de yardımıyla çizilen Cro-Magnon, modern insanla neredeyse tümüyle aynıydı. Bu son derece zeki varlık, türlerin ortadan kalkmasında doğal felaketler dahil tüm rakiplerinden daha büyük ve öldürücü bir rol oynama sürecindeydi. Fakat ilerleyen sayfalarda görüleceği gibi otokontrol eksikliğine rağmen bu çelişkili hayvan nefis bir anlama becerisinin yanında müthiş bir sanatsal başarıya da sahipti.



ka'da ortaya çıkmış olduğu görüşünü destekliyor. Cro-Magnonlar kendilerinden önceki herkesi sildi süpürdü, bunun nedeni muhtemelen *Orinyasiyen* diye bilinen ve kemik ve boynuzun yanında ayrıca işlenmiş seramiğı de kapsayan çok üstün aletlere (yani silahlara) sahip olmaları ya da Neandertallerin onların taşıdığı hastalıklara karşı bağışıklıklarının olmaması veyahut tam manasıyla boğumlamalı konuşamayan Neandertallerin savunmalarını yeterince koordine edememeleri olabilir. Cro-Magnonlar çadırlarda yaşar ve hayvan kapanları kurar, ok ve yay kullanır, bıçakları için sap yapar ve iki parçayı birbirine tutturmak için zift kullanırlardı. Savaş artık endüstriyel temele dayanıyordu; insan tarihinin sonraki bin yıllık döneminde yaşanan acılarda da aynısı geçerli olacaktı.

Modern insanlar bundan böyle katliamla meşgul olmadıkları zamanlarda çevreleri, kendi fiziksel ve psikolojik doğaları ve etraflarını saran şeylerin bileşimi üzerine düşünmeye ve bunları yavaş yavaş kendi istekleri doğrultusunda kullanmayı öğrenmeye uygun bir donanım ve teknolojiye sahip olacaklardı. Şimdi bu başlangıcın bizi nereye götürdüğünü ele alalım.

2 DNA

BİYOLOJİNİN RASYONALİZASYONU

BÜYÜK FİKİR *Kalıtım DNA'da şifrelenmiştir*

Yaşamın hemen hemen bütün yönleri moleküler düzeyde planlanır ve molekülleri anlamadan yaşamın kendisi hakkında ancak çok kaba bir kavrayışa ulaşabiliriz.

FRANCIS CRICK

Her birimiz yaklaşık yüz trilyon kişiyiz. Hücrelerimizin her biri, ki yaklaşık yüz trilyon hücremiz var ve hücrelerimizin çoğu o kadar küçük ki şu i harfindeki noktayı kaplayabilmeleri için yaklaşık iki yüz hücre gerekiyor, bizim bütün bedenimiz için geçerli bir şablon içeriyor. İlkesel anlamda (bu her zaman tehlikeli ve şüphe uyandıran bir ifadedir) yüz trilyon hücreye ayrılmış olan bedeninizden yüz trilyon adet sizi doğurabilir, bu yeni sizlerin her biri tekrar parçalara ayrıldığında da buna bir yüz trilyon daha eklenir ve siz ve klonlarınız evrene çabucak tümüyle hâkim olabilirsiniz. Şansımıza bu fantaziyi olanaksız kılan fiziksel ve biyolojik sınırlamalar var. Ama bu olasılığı düşünmek bile yaşamın inanılmaz hücresel yapısını bilmeyi gerektiriyor.

Biliyoruz. Darwin ve bir keşiş hariç tutulursa Darwin'in çağdaşları kalıtım konusunda hiçbir şey bilmiyorlardı. Doğal dün-

yayı kavramalarına ve rekabetin sonuçlarına ilişkin derin öngörülerine rağmen, anlama becerileri kalıtımın mekanizmaları konusundaki cehaletleri nedeniyle sınırlanmıştı. O dönemde en çok tutulan mekanizma *karışmalı kalıtım*'di ve buna göre her ebeveyn kendi kalıtsal özelliklerini çocuklarının doğacağı potaya atıyor ve çocuk bu karışımdan çıkıyordu. Bu tür bir karışmanın doğal seçilimi desteklemeyeceği, çünkü yeni adaptasyonların hızla kaybedileceği Darwin'in görüşlerine karşı güçlü bir sav olarak ileri sürüldü ve kuramının kabulünü geciktirdi. Aristoteles yine soruların peşinde koşmasıyla takdire şayan olsa da, alışık olunduğu üzere yanlış yanıtla sahipti ve bu deneyle desteklenmeden oturan yerden yapılan spekülasyonun başarısızlığını bir kez daha gösteriyordu.¹ Kanın bedenın tüm organlarından geçtiğine dikkat eden Aristoteles kalıtımı kana atfetti, bu bugün bile metafor olarak kullanımda kalmaya devam etmektedir. Dölü saflaştırılmış kan olarak düşündü, cinsel birleşmede adet kanamasıyla karışıyor ve yeni nesle hayat veriyordu.

Anahtarı elinde tutan keşif elbette Gregor Mendel'di (1822-1884). Mendel, Avusturya Silezyası'nda bir bölgeyken Çekoslovakya'ya katılan ve bugünkü Çek Cumhuriyeti'nde yer alan kuzey Moravya'daki Heinzendorf'ta (Hyncice) bulunan bir çiftlikteki bir köylü ailede Johann adıyla doğdu. Babası Anton sağlığı ve geçimi botanik yüzünden, yıkılan bir ağaç yoluyla bozulan bir küçük toprak sahibiydi. Anton, Troppau'da bir lisede, ardından Olmutz'taki üniversitede okuyan, ileride tüm hayatı botanik olacak olan oğlunun öğrenim harçlarını karşılamak için çiftliği damadına sattı. Mendel'in ucuz eğitim almasının tek yolu Brünn'deki (bugünkü adıyla Brno) St. Thomas Augustinyen manastırına girmekti; böylece yirmi iki yaşında Gregor adını aldı ve 1847'de papazlığa atandı. Zihnini daha sonra geliştireceği kalıtımın aritmetiği için hazırlayan bir adım da öğretmen olması düşüncesiyle bilim ve matematik eğitimi almak üzere Viyana'ya gönderilmesi oldu; fakat oradaki dersleri, özellikle biyoloji zayıftı ve iki yıl

1 Oturan yerden yapılan spekülasyonun deneyle *ittifakı* ise elbette olağanüstü güçlü bir yöntemdir ve bilimsel yöntemin özüdür.

sonra manastırına dönerek sonrasında da manastırının başrahibi oldu (1868).

Mendel İmparator Franz Joseph'in başrahiplikten sorumlu Avusturya kraliyet ve imparatorluk özel görevlisi, Moravya Emlak Bankası başarılı müdürü, Avusturya Meteoroloji Cemiyeti'nin kurucusu, Ülke Tarımı, Doğa Bilimleri ve Bilgisinin İlerlemesi için Kraliyet ve İmparatorluğa bağlı Moravya ve Silizya Topluluğu'nun üyesi ve (en önemlisi) bir bahçıvandı. 1850'lerde, Darwin düşüncelerini kaleme aldığı bu dönemde kendisine ölümünden sonra ün kazandıracak olan çalışmalarına başladı. 1936'da seçkin istatistikçi ve genetikçi Ronald Aylmer Fisher'in (1890-1962) Mendel'in rapor ettiği sayıların şüpheli olduğunu ileri sürmesi nedeniyle kendisinin ya da yardımcılarının çalışmalarının güvenilirliği hakkında bazı sorular ortaya atıldı (ve güçlü bir biçimde çürütüldü). Mendel ne yaptığını gerçekten biliyor muydu, çalışmalarının başarısı konusundaki efsane onun becerisinden ziyade bizim ona sonradan yaptığımız yüklemelerden mi kaynaklanıyordu gibi sorular da soruldu. Aslına bakılırsa Mendel'in çalışmasının hedefi kalıtımın mekanizmasını değil, melezleşmenin kurallarını anlamaktı. Melezleşmeyle yeni türlerin ortaya çıktığı ve "kararlı melezlerin" yeni türler olduğu şeklindeki o dönemki egemen görüşü kanıtlamaya uğraşıyordu. Umutsuzca peşinden koştuğu hedef yeni bir tür yaratmaktı ve bu konuda çok fena başarısız oldu.

Mendel (esasen başarısızlığının hüznünlü raporu niteliğindeki) bulgularını Brünn Doğa Tarihi Topluluğu'nun 8 Şubat ve 8 Mart 1865 tarihlerindeki toplantılarında sundu ve topluluğun 1866 yılındaki yayınlarında "Bitki melezleri üzerine deneyler" (*Versuche über Pflanzenhybriden*) adıyla yayımladı. Ulaştığı sonuçlar W. O. Focke'nin *Die Pflanzen Mischlinge* (1881) kitabındaki yanıltıcı bir alıntı hariç tümüyle göz ardı edildi ve 1900 yılına kadar hiç dikkat çekmedi. Göz ardı edilme nedeni, o zamanki görüşe göre melezleşmenin rasyonel temelini açığa çıkarmada bir başarısızlık olarak yorumlanmış olması büyük bir ihtimal; keza Mendel'in kendisini devlet işlerine vermesi de hayatını adanmış çalışmasının bu üzücü sonucundan duyduğu hayal kırıklığını yansıtıyor olabilir. Ardından üç botanikçi, Hollanda'da Hugo

de Vries, Almanya'da Carl Erich Correns ve Avusturya'da Erich Tschermak von Seysenigg ayrı ayrı güya Mendel'in çalışmalarını hiç bilmeden, duymadan kendi çalışmalarında kopyalayivermiş olduklarını fark ettiklerini iddia ettiler. Bu raporlarda kendine özgü ilginç bir dalavere de vardır, çünkü yazarlardan birinin (de Vries) diğerlerinden biri (Correns) benzer bir çalışma yayımlayana dek Mendel'in önceliğini tanımayı reddettiği, önceliği üstlenemeyeceğini anlayan de Vries'in bu kez Correns'in fiyakasını bozma amacıyla Mendel'in önceliğini duyurduğu aktarılır. Mendel'in otuz beş yıl boyunca ilgisiz kalmasının açıklaması için her türden sebep ileri sürülür; onun akademi dünyasına sızmaya çalışan bir amatör olması gerçeği, hiçbir iyi şeyin çıkamayacağı kiliseyle fazlasıyla yakın bir bağlantısının olması, matematik dilini (ihtiyaç duyduğu basit aritmetiği bile) bilmemesinin o günün biyologlarının aklını karıştırmış olması gibi. Gerçek daha basit olabilir: de Vries, Correns ve von Seysenigg çalışmasını yeniden gündeme getirip daha modern gözlerle inceleyene dek kimse onun kalıtım mekanizmasıyla alakalı olduğunu düşünmemiştir.

Mendel çalışmasını 19. yüzyılda gerçekleştirmiş olmasına rağmen önemi ancak 20. yüzyılda fark edilebildi. Tıpkı Planck'ın enerjiyi kuantize etmesi gibi (bkz. 7. Bölüm) Mendel'in de kalıtımı kuantize ettiğini bugün anlıyoruz. Artık onun başarısının o zamanki hâkim karışmalı kalıtım kuramının çöküşüne ve kalıtım yoluyla iletilen bilginin ayrık birimler halinde taşındığını söyleyen kuramın bir süre sonra onun yerini almasına sebep olan kanıtı sağladığını görebiliyoruz. Sekiz yıl boyunca çalışmalarının merkezinde bezelyeler (*Pisum sativum*) yer aldı; bu bitki taşıdığı bir dizi özellik nedeniyle yürüttüğü çalışma açısından ideal nitelikteydi. Bir kere çiçeğinin yapısı özeldi ve iki bitkiyi melezlemeyi ya da doğada olduğu gibi kendi kendisine tozlaşmayı kolaylaştırıyordu. Dahası bitki bir dizi değişken özelliğe sahipti: Örneğin taç yaprakları beyaz ya da mor, bezelyeleri yuvarlak ya da buruşuk, içleri yeşil ya da sarı olabiliyordu, yeşil ya da sarı kabukların içinde büyüyebiliyor ve bodur ya da uzun bitkiler oluşturabiliyordu. Ek olarak ve muhtemelen gerçek neden de buydu, bezelyeye bir tohum tüccarı aracılığıyla ucuz şekilde ulaşılabilir; az yer kaplıyor ve hayli kısa bir zamanda çok sayıda tohum üretiyordu. St. Thomas manastırının menüsünde bezelye çorbasının oldukça

sık karşımıza çıktığını da varsayabiliriz. Bahçe bezelyesinin tek dezavantajı bahçe düzenlemesinde pek de fotojenik olmamasıdır, sonradan Mendel'in deney bahçesine ziyaretçileri mutlu etmek amacıyla çok daha zarif bir görünüme sahip begonyalar ekilecektir (Şekil 2.1).

Mendel süs bitkilerinin melezlenmesinin sonraki nesillerde tekrarlanan değişkenler üretilmesine hayran kalmıştı. Bu gözleminin altında yatabileceğini düşündüğü sistematik örüntüyü aramaya karar verdi. İlk iki yılda saf şekilde üretilebildiğine emin olduğu, yani yeşil bezelye bitkilerinin yeşil bezelye, sarı bezelye bitkilerinin sarı bezelye verdiği ve diğer özellikleri de aynı şekilde olan bitkilerle işe koyuldu. Ardından çapraz ve düz üretilmeye geçti. Örneğin yeşil bezelyeleri sarı bezelyelerle çaprazladığında, ilk yavru nesildeki bütün bezelyeler (F_1 melezler) sarı oluyordu. Fakat melezler kendileriyle çoğaltıldığında (kendileme) bir sonraki, F_2 jenerasyonundaki bezelyelerin dörtte üçü sarı ve dörtte biri yeşil oluyordu. İlk baştaki yeşil gizemli biçimde yeniden karşımıza çıkıyordu. Başka özellikler gösteren bitkileri çaprazlayıp ardından kendileriyle çoğalttığında benzer bir örüntü aynı sayısal oranlarla tekrar ortaya çıkıyordu. Bir örüntünün ortaya çıktığı açıktı ve örüntüler açıklanmaya ihtiyaç duyar.

Mendel elde ettiği çok sayıda sonuca dayanarak bir hipotez oluşturdu. Elindeki ilk ipucu deneylerinin basit sayısal oranlarda değişkenlere yol açmış olması gerçeğiydi. Bu oranlar için elde ettiği ayırık sayıları açıklamak için her bir ayırt edici özellik (örneğin yeşil ve sarı bezelyeler) arasındaki farkın bitkideki farklı

Şekil 2.1 Mendel'in manastırındaki bahçesi. Mendel çalışmasını bezelyelerle yürüttü. Zamanla kısmen ekonomik nedenlerle ama aynı zamanda bezelyelerin çoğu özelliğinin genetik olarak bağımsız olması nedeniyle bunun iyi bir seçim olduğu ortaya çıkacaktı. Manastır bahçesi şu an begonyalarla bezenmiş durumda.



ayrık birimlerin varlığı nedeniyle olduğunu ileri sürdü. Mendel ayrık kalıtsal oluşumları belirtmek için “öge” terimini kullandı ve bitkilerinin dış görünümünü, fenotipi ele alırken farklı “özelliklere” atıfta bulundu. Gerekçelendirmesi büyük oranda bu gözlemlenebilir özelliklere dayanıyordu ve altta yatan “öğelerin” rolüne dikkat gösterenler daha sonraki yorumcular oldu. Bu oluşumlara o zamandan bu yana birçok isim verildiyse de, bugün Danimarkalı biyolog Wilhelm Ludvig Johannsen’in 1909’da önerdiği isimle anılıyorlar: *Genler*. Belirli bir fenotipten, örneğin bezelye renginden sorumlu olan genlerin farklı versiyonlarına ise *alel* denmektedir. Dolayısıyla yeşil bezelyeler ve sarı bezelyeler bezelye renginden sorumlu olan genin farklı alellerine karşılık gelmektedir.

Mendel basit sayısal oranlara açıklık getirmek için (günümüzün diliyle söylersek) genlerin çift halde var olduğunu, bir çiftin bir ayırt edici özelliğe karşılık geldiğini ve gametlerin (hayvanlarda yumurtalar ve sperm, bitkilerde tohum taslakları-ovüller ve çiçek tozları-polenler) her birinin genlerden birini içerdiğini kabul edebileceğimizi tespit etmişti. Döllenme gerçekleştiğinde (bitkilerde tozlaşma) erkek ve dişi gametler rasgele şekilde birleşiyor ve böylece tekil genleri tekrar çift hale getiriyordu. Mendel kalıtsal özelliklerin *baskın* ya da *çekinik* olduğunu tespit etmişti ve bugün bu ayrımın genlerde de geçerli olduğunu görebiliyoruz. Bu nedenle eğer baskın bir alel çekinik bir alele çiftleşirse fenotip baskın alelin özelliklerini gösterecektir. Örneğin Mendel’in deneyleri sarı bezelye alelinin yeşik bezelye aleline baskın olduğunu göstermektedir, çünkü saf sarı bitkiler saf yeşil bitkilerle çaprazlandığında, yavruların hepsi sarıdır.

Bu fikirleri sembolik yoldan gösterebiliriz. Sarı bezelye alelini *S* ile, çekinik yeşil bezelye alelini *s* ile gösterelim (Temel genetikteki uygulama budur: Baskın alel, kendisinin özelliğini gösteren bir harfle ve çekinik karşıtı da onun küçük harfle yazılışıyla gösterilir). Saf sarı bezelye ve yeşil bezelye bitkileri sırasıyla *SS* ve *ss*’dir. Her bir bitkinin gametleri sırasıyla *S* ve *s*’dir. Bunlar çaprazlandığında yavru bireyler *Ss* olur ve sarı (*S*) baskın olduğu için hepsi sarı bezelyeye sahiptir. Şimdi bu melezleri kendileriyle çöğaltalım. *Ss* bitkilerinin gametleri rasgele olarak *S* ve

s olduğu için Ss bitkilerinin yavruları SS, Ss, sS ve ss olacaktır. Sadece sonuncusu, ss yeşil bezelyelere karşılık gelir (çünkü Ss ve sS'de S baskındır); dolayısıyla bitkilerin sarı ve yeşil olma oranı tıpkı Mendel'in gözlemlediği üzere 3:1'dir. Mendel bu basit şemayı başka ayırt edici özelliklere ve kombinasyonlara genişletmeyi (örneğin bodur kalan yeşil bezelyeler) başardı ve her örnek durumunda beklediği oranların doğrulandığını buldu. (Fisher'in istatistik üzerinden yaptığı saldırı bu noktadadır, çünkü oranlar kesin değildi ve sonuçlardaki dağılım şüphe doğuruyordu; ki bunun nedeni örneğin hafif pürüzlü yüzeyi olan bir bezelyenin pürüzlü mü pürüzsüz mü olduğuna karar verirken istenilen doğrultuda düşünmekten doğabilecek sapma olabilir).

Kalıtım, Mendelci yasalara uyma ve basit istatistik özellikleri gösterme anlamında tümüyle ve istisnasız Mendelci değildir. Uzman tavsiyesi tarihinin belki de en kötü tavsiyesini veren kişi, Mendel'in savlarını anlamayan ve ona bezelyelerle uğraşmaktan vazgeçip farekulaklarını (*Hieracium*) çalışması gerektiğini söyleyen Münih Üniversitesinden Alman botanikçi Karl Wilhelm von Nägeli'dir. Fakat farekulağı somatik partenogenezle (yani eşeysiz şekilde) çoğalır ve Mendelci kalıtımı ispatlamak için ondan daha uygunsuz bir şey bulunamaz. Mendel farekulaklarıyla yaptığı deneylerin hiçbir sonuç vermeyip fikirlerini kesinlikle doğrulamadığında hüzenlenmiş olmalı. Daha önce fasulye bitkisiyle (*Phaseolus*) yaptığı deneylerden aldığı sonuçlar da moralini bozmuştu zaten; değerlendirdiği özelliklere o kadar çok sayıda gen etki ediyordu ki *Pisum*'da çok net olan beklediği sonuçlar orada da çıkmıyordu.

Eşeye bağlı kalıtımın hepsinin Mendelci olmamasının hemen göze çarpmayan daha derin nedenleri vardır; çünkü bazı genler başka genlere bağlıdır ve bazı özellik çiftlerinin kalıtımı rastlantısal değildir. Dahası birçok gen, fenotipin birden fazla özelliğini yönetmesi anlamında *pleiotropik*'tir ve organizma, özelliklerin genler üzerine bire bir eşlenmesi değildir. Örneğin birçok genetik araştırmanın kahramanı meyve sineği *Drosophila*'da görülen bir mutasyon petek gözlerinde ve böbreklerinde (Malpighi tüplerinde) pigmentlenme yokluğuna sebep olur; bir başka mutasyondaysa kanatlar yana doğru uzanmakla kalmaz, sineğin sırtındaki

bazı kıllar kaybolur. Mendelci kalıtımın apaçık olduğu örneklerde bile istatistikler ikincil etkiler sonucunda görünmez olabilir. Örneğin man kedisinde bir gen vardır, buna *t* diyelim ve *Tt* kediye normal omurga gelişimini engelleyerek bilinen kuyruksuz fenotipe sebep olur; alelin çifte dozu bir *tt* kediye verildiğinde hayatta kalamaz ve *tt* embriyoları ölür. *Tt* kedilerin kendisiyle çoğaltılması bu yüzden *TT*, *Tt* ve *tT* sonuçlarını verir, dünyaya getirdiği yavrularda beklenen 1:3 değil 1:2'lik bir oran görülür.²

Bu şekilde konu otuz beş yıl bekledikten sonra bahsettiğimiz hafif bulanık koşullarda gün yüzüne çıktı ve isteksizce kabul edildi. Fakat Mendel'in gözlemleri karanlıkta tutulurken biyoloji, onun yoluyla birleşmeye yazgılı başka bir yolda ilerliyordu.

Alman biyolog Ernst Haeckel (1834–1919) bir türün evrimsel tarihini kast ettiği *filogeni* kavramını ortaya attı ve *ontoloji* bir bireyin gelişimi olmak üzere, “filogeninin ontolojiyi yinelediğini” ileri sürdü. Anlatmak istediği, bir embriyonun rahimde gelişirken geçirdiği değişikliklerin türün evriminin hızlı bir versiyonu olduğuydu. Ayrıca ölümünden yirmi yıl sonra korkunç sonuçları doğacak şekilde siyasetin uygulamalı biyoloji olduğu düşüncesini ortaya attı. Şu anki konuyla daha ilgili olan özelliği, 1868'de biyolojik hücrelerin çekirdeklerinin kalıtımı yöneten bilgiyi içerdiğini ileri sürmesiydi. Alman embriyoloji uzmanı Walther Fleming bu fikri daha da ileri taşıyarak 1882'de semender larvalarının hücre çekirdeklerinin çubuğa benzer ve bazı renklerin emilmesiyle renklendirilebilen çok küçük yapılar içerdiğini keşfetti. Bu gözleme dayanarak 1889'da Wilhelm von Waldeyer kromozom (“renkli vücut”) adını önerdi.³

Hücrelerin çekirdeklerindeki kromozom sayılarının hesaplanması bilindiği üzere zordur, çünkü bölünmeye uğrayarak kendini kopyalamaya ve bölünmeye başlayınca dek çekirdek içerisinde çözük, dolanık ve dağılmış haldedirler. Bizim diğer hayvanlardan daha üstün olduğumuz ve bitkilerin genellikle biz-

2 Farklı renkte gözlere sahip man kedilerine sahip olunmasının kuyruklu olup olmamalarıyla bir ilişkisi yoktur.

3 Waldeyer isimler konusunda iyiydi, “nöron” kelimesini de 1891'de öneren o oldu.

den daha az kromozoma sahip olmasının da bunun göstergesi olduğu söylenir: Biz yirmi üç çift sahibiz, ev faresiyse sadece yirmi iki çift kromozoma sahip. Fakat domatesin yirmi iki kromozomu varken, patatesin yirmi dört kromozomu var. Aslında saymak o kadar zordur ki insanların uzun süre şempanzelerle aynı sayıda kromozoma sahip olduğu düşünülmüştür (yirmi dört çift); doğru sayı yirmi üç ancak gururumuzun çiğnenmesini kabul etme pahasına ve kromozom sayısının dediğim dedik kendini beğenmişliğimizle bağlantısız olduğunu öne sürmemiz sayesinde kabul edilebildi.⁴

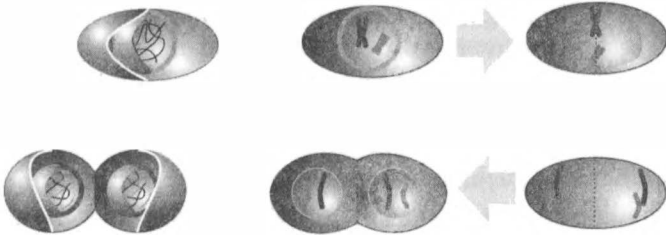
Yüzyılın dönümünde biyologlar kromozomların kalıtımın enstrümanları olduğundan şüphelenmeye başladılar. Kromozomların Mendelci kalıtımla iç içe geçmesi, 1902 yılında Walter Sutton (1877-1916) adlı New York'ta Columbia Üniversitesinde çalışan bir yüksek lisans öğrencisinin çekirgelerin (daha net belirtirsek ABD'nin batısı ve Meksika'nın ovalarında bulunan büyük hücreli ve kolay görülebilebilir kromozomlara sahip bir ova çekirgesi türü olan *Brachystola magna*) spermi üzerine çalışmasıyla oldu. Sutton eşli kromozomların aslında ayrıldıklarını ve her çiftin bir üyesinin başka bir hücrenin içine gittiğini bulguladı. Kendisinin keşfine *Sutton-Boveri kuramı* adı verildi, zira deniz kestanesi yumurtalarını inceleyen Alman biyolog Theodor Boveri (1862-1915) 1904 yılında kendisinin de aynı fikre Sutton'la hemen hemen aynı zamanda sahip olduğunu iddia etti. Boveri de (başkaları gibi) bazı önemli düşünsel katkılar yapmıştı ama (daha önemlisi) güçlü dostlara sahipti.

Bu aşamada artık Mendel'in genlerinin Sutton'ın kromozomlarıyla taşındığı sonucunu çıkartabiliriz. Dünya yeni bir bilim dalına hazırды; 1905'te "genetik" terimi, hafif acayip William Bateson tarafından Cambridge zoologlarından Adam Sedgwick'e yazılan bir mektupta önerilmesinin ardından 1906 yılında melezleştirme konusunda düzenlenen üçüncü uluslararası konferansta kamuoyuna duyuruldu. Tarzının aşırı ağırlığının ve bilimin halkla iletişiminin aradan geçen bir yüzyılda artışının göstergesi olarak burada onun terim hakkındaki vurgusunu aktarabiliriz:

4 Kitabın yazımı esnasında tanınmış bir elektronik ansiklopedi halen daha yirmi dört sayısından vazgeçmemiş durumdaydı.

(Genetik) emeklerimizin kalıtım ve varyasyon olgularının aydınlatılmasına, bir başka deyişle evrimci ve sistematikçinin kuramsal problemlerine ve ister hayvan ister bitki olsun besicilerin pratik problemlerine ilgi duymayı anıştırmakla beraber soyun fizyolojisine adanmış olduğunu yeterince işaret ediyor.

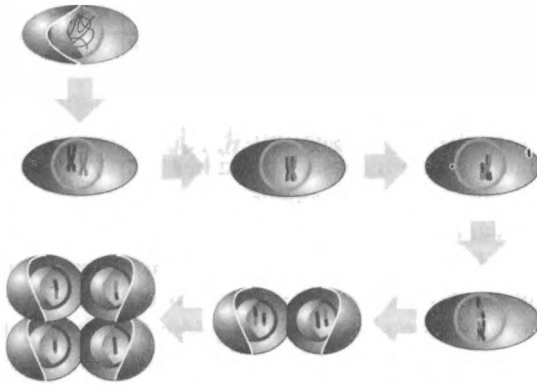
Genetik ve kalıtımın gizli dünyası konusunda ilerlemeden önce hayati önemde iki süreçten haberdar olmak zorundayız: Somatik hücrelerin (normal vücut hücrelerinin) bölünmesi, *mitoz* ve hayvanların gonatlarında (cinsel organlarında) ve bitkilerin erkek organları ve tohumluklarında gametlerin (sperm ve yumurtalar, polen ve tohum taslaklarının) oluşumu, *mayoz*. Bu son bahsedilen süreçteki incelikler, eşeyli üremenin evriminin bu kadar zor anlaşılmasının ve evrimsel *kazanımın* (1. Bölüm) bu kadar büyük olmak zorunda oluşunun nedenlerinden biridir. Buna rağmen doğa görevini yapar ve lojistik açıdan mitozdan çok daha talepkâr bir görev olan mayoz ihtiyaç duyulduğu yer ve zamanda gerçekleşir. Elinizdeki bir biyoloji ders kitabı değil, bu yüzden daha sonra aktaracaklarımızın anlaşılması amacıyla bu iki sürecin kabataslak bir aktarımını yapmakla yetineceğim.



Şekil 2.2 Mitoz süreci, somatik bir hücrenin iki eş kopyaya bölünmesi. İlk başta kromozomlar (burada iç küre şeklinde çizilmiş) çekirdeğin içerisinde dağılmış haldedir. Hücre bölünmesi başladığında kromozomlar sarılır, ikileşir ve sentromerde birleşen iki kromatit içeren uzatılmış X şeklinde cisimler oluşturur (burada sadece ikisini gösteriyoruz, bir insan hücresinde böyle yirmi üç çift vardır). Kromozomlar merkezi düzlemde hizalanır, hücre zarı çözünür, kromatitler ayrılır ve hücre sitoplazmasının içine çekilir. Bunun ardından hücre zarı değişime uğrar ve hücre zarı çekirdeklerin her birinin etrafına yaklaşır. Sonunda kromozomlar açılır ve başlarken elimizde bir adet varken artık özdeş iki diploit hücreye (çift kromozomlu hücreye) sahip oluruz.

İlk olarak mitozu, somatik hücrelerin ikileşmesini (replikasyonunu) ele alalım. Bir hücre, döngüsel bir yaşama sahiptir ve zamanının yaklaşık yüzde onu mitoz geçirme sırasında harcanır. Zamanının geri kalanı da ikileşme eyleminde kullanılacak birçok malzeme hazırlandığı için çok büyük öneme sahiptir. Görünüşe göre nadasa bırakılmış oysa aslında bereketli bu zamanın çoğunda bizim yirmi üç çift kromozomumuz genişletilerek hücre çekirdeği içerisinde dolanık şekilde dağıtılır. Mitozun başlangıcında (Şekil 2.2) kromozomlar daha kolay hareket edebilmek için hazırlanmak amacıyla sarılarak küçülür. Bu aşamada her kromozomun çoktan ikileşme yaşamış olduğu görünür hale gelir; çünkü her biri, *sentromer* adı verilen bölgede birbirine tutturulmuş *kromatit* denen özdeş çubuğa benzer iki birimden oluşur ve genişletilmiş birer X gibi gözükür. Ardından çekirdek kılıfı çözülür ve çekirdek bileşenleri ve etrafındaki *sitoplazma*, hücre duvarının içerisinde ama çekirdeğin dışındaki bileşen ve yapıların karmaşık karışımı iç içe geçerek birleşir. Kromatitler ayrılır ve (artık ayrılmış kromatitlere baktığımız için) iki kromozom topluluğu arasında yeni hücre zarı oluşmaya başlar, her ikileşmenin etrafında yeni birer hücre zarı oluşmaya başlar, kromozomlar çözülür ve sonuçta bir yerine iki özdeş hücremiz olur.

Şimdi de mayozu, gametlerin oluşumunu ele alalım. Bu süreç, nihai sonuç olarak her biri kromozomların tümlüğünün yarısına sahip (insanlarda yirmi üç kromozom) dört hücre oluşumu elde edileceği için mitozdan biraz daha inceliklidir. Biraz karmaşık bir süreç olduğu için bir çift kromozoma odaklanmış olduğumuz Şekil 2.3'teki adımları izleyin. İlk başta kromozomlar birbirine dolanıktır ve çekirdeği doldurmaktadır, ama mayoz başlayınca birbirlerinden ayrılmaya ve küçülmeye başlarlar. Bu aşamada mikroskopla bakıldığında her bir kromozomun ikileştiği ve aynı mitozdaki gibi alışık olunan uzatılmış X şeklinde sentromerde birleşmiş iki kromatitten oluştuğu anlaşılır. Fakat şimdi babadan ve anneden gelen kromatit çifti beraber hareket eder ve bir fermuarın iki tarafı gibi uzatılmış bir bütünlük oluşturur. Her kromozom ("uzak parçalar") denen uç kısımlarından çekirdek kılıfına bağlıdır; bu bağlanma muhtemelen fermuarın bir tarafının eşini bulmasına yardımcı olmaktadır. Kopyalanarak çoğaltılmış ili kromozom bir arada dururken, kromatitin içindeki babanın



Şekil 2.3 Mayoz süreci, gametlerin oluşumu. Mayozun stratejisi bir diploit hücreyi dört haploit hücreye (bir kromozomun tekil versiyonuna sahip hücrelere) dönüştürmeye ve ebeveyn kromozomların genetik birleşimini karıştırmaya dayanır. Bir kez daha ebeveyn hücredeki sadece tek bir kromozom çiftini göstereceğiz. İlk başta iki kromozom çekirdek içerisinde dağınıktır. Fakat mayozun başlamasıyla aynı mitozdaki gibi sarılır ve ikileşerek iki çift birleşmiş kromatit oluştururlar. İkili kromatitlerin uygun çiftleri beraber uzaklaşır ve yan yanayken genetik malzeme değişimi yapar. Ardından merkezi düzleme göç ederler ve burada ilk mitozla benzer bir bölünme gerçekleşir (ayrıntısını vermiyoruz), böylece her biri iki kromozom içeren iki hücre meydana gelir. Bunu ikinci bir mitoz bölünme izler ve her hücredeki iki kromozom tekrar ayrılır. Sonuçta dört haploit hücreye ulaşılır ve her biri ebeveyn hücredeki iki kromozomun genetik karışımı olan bir kromozom içerir. Öyleyse üreme, gametteki bir ebeveyn tarafından sağlanan tekil bir kromozomun diğer ebeveynin sağladığı tekil kromozomla birleştiği mayozun mekanik olarak değil ama kavramsal olarak tersidir.

girdisini temsil eden malzeme kromatitte annenin sağladığı girdinin bulunduğu bölgedeki malzemeye değiştirilir. Genetik varyasyonun organizmada gerçekleştiği an budur.

Organizmanın tarihindeki bu düğüm noktasının ardından *parça değişimi* sürecinde iki melez kromatit çifti iki bölgeye çekilerek mitozda olduğu gibi her biri bir çift kromatit içeren iki hücre oluştururlar. Bu çizimdeki “birinci mitoz bölünme”dir. Ardından “ikinci mitoz bölünme”de kromatit çiftlerinin her biri birbirinden koparılacak artık tekil hücreleri dolduran tekil kromozomlar haline getirilir. Sürecin bu son noktasında eskiden

bir hücremiz varken artık dört hücreye sahip oluruz ve her iki ebeveynden gelen genetik malzeme dört hücreye dağıtılmıştır. Bu hücrelerden birinin kromozomları sarı bezelyelerdeki genin baskın Y alelini içerebilir, bir başkası yeşil bezelyelerdeki çekinik y alelini içerebilir. Mendel'in aritmetiği kendi bahçesinde ortaya çıkmak üzeredir. Fakat burada bilimin başka bir özelliğine de dikkat edelim: Basit bir aritmetik gözlemin altında, bu örnekte hücre biyolojisinde gördüğümüz üzere, çok derin bir karmaşıklık yatabilir.

Şimdi sıra kromozomu çözmeye geldi. Kalıtımı sağlayan asıl öz nedir? Genetik bilginin fiziksel cisimleşmesi nedir?

Kalıtsal bilgiyi bir kimyasalın şifrelediği fikri 19. yüzyılda doğmuştu; tüm bu aktarılanlardan sonra başka ne olabilirdi ki? 1902 yılından itibaren proteinlerin belirli bir dizilimesahip (buna birazdan değineceğiz) yaklaşık yirmi aminoasitlik bir dizinden oluşmuş, uzun, iplikli (genellikle sarmal bir damlacık şeklinde) moleküller olduğu kabul edildikten sonra, proteinlerin genetik bilgiyi şifrelediği ve farklı aminoasit dizilişlerinin bir önceki nesilden sonrakine farklı mesajlar ilettiği fikrine genel bir rağbet gösterildi. Kuşkusuz hücre çekirdeklerinde başka bir molekül türü olması da zihinleri kurcalıyordu; çekirdekten geldiğinin bilgisiyle "nükleik asit" adı verilen molekül başka türde bir iplikten oluşuyordu ki bunu daha sonra açacağız. Bu nükleik asitler kromozomlarda taşınan muazzam bilgi miktarını iletebilme yönünden göze yapısal açıdan fazla basit ve sıkıcı göründüler. Bitkilerdeki selüloze benzer şekilde, yalnızca hücrelerin yapılarına katkı yaptıkları genel kabul gördü.

Bu görüş 1944 yılında değişecekti. Nova Scotia'da Britanya göçmeni bir ailede doğmuş, fakat tüm yaratıcı çalışmalarını Birleşik Devletler'de yapmış olan biyokimyacı ve de kornet sanatçısı Oswald Avery (1877-1955) pnömoni (zatürre) hastalarının ağızlarında, ayrıca da sağlıklı insanlarda bulunan farklı pnömokok türlerini araştırıyordu. Pnömokokların (pnömoniye sebep olan bakterilerin) çeşitlilik gösterdiği 1923 yılından beri bilinmekteydi: Öldürücü olmayanları göze pürüzlü gözükürken, öldürücü iplikler düz gözüküyordu. Londra'da Sağlık Bakanlığında *Strep-*

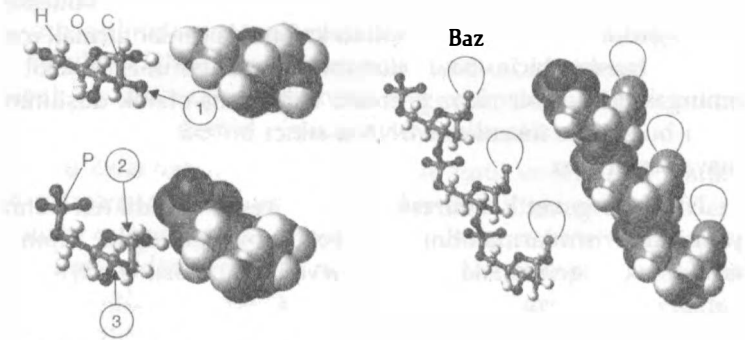
tococcus pneumoniae üzerine çalışan Frederick Griffith (1879-1941) pürüzlü ve düz ipliklerin birbirine dönüştürülebileceğini gösterdi. Avery ve arkadaşları 1930 yılında çalışmaya başlayarak kısa süre sonra bir bakteri türünden diğerine geçişin hücrelerden parçalar çıkartılarak başarılabileceğini ve etkin unsur gibi gözükken bir “dönüştürücü kaynağın” elde edilebildiğini buldular. Ardından Avery dönüştürücü kaynağın yapısını tespiti odaklandı. Proteinleri etkisizleştiren enzimler olan proteazların onların aktivitesine hiç etki etmediğini buldu, dolayısıyla kaynak bir protein değildi. Lipitleri parçalayan enzimler olan lipazların, hücre duvarlarını oluşturan yağlı maddelerin de etkisi olmadığını buldu, dolayısıyla kaynak lipit de değildi. Dönüştürücü kaynağın ne olmadığına karar verdikten sonra Avery bir dizi test yaparak devam etti ve bu testler kaynağın sıkıcı bir eski nükleik asit olduğunu kesin olarak gösterdi. Masa tamamen tersine çevrilmişti ve nükleik asitler Clark Kent’in Süperman’e dönüşmesi gibi dünyadaki en ilginç ve en önemli moleküller olmaya terfi ediyordu.

Herkes ikna olmamıştı. Kimileri kalıtımda protein kuramına o kadar bağlıydı ki dönüştürücü kaynağın belki de nükleik asitle ilişkili henüz saptanmamış bir protein olduğu iddiasında ısrarcı oldu. Bu görüş ilerleyen yıllarda kesin şekilde çürütülecekti. 1952 yılında Alfred Hershey (1908-1997) ve lisans öğrencisi asistanı Martha Chase bakterileri enfekte eden virüsler olan bakteriyofajlarla yaptıkları deneylerin sonuçlarını duyurdular. Fosfor elementinin nükleik asitlerde görüldüğünü ama proteinlerde görülmeyişini ve sülfürün proteinlerde görüldüğünü ama nükleik asitlerde görülmeyişini kaydettiler. Ardından her birinin radyoaktif versiyonlarını kullanarak iki elementin de bulundukları yerlerin izini sürerek enfeksiyon sürecinde bakteriyel hücreye yalnızca fajın nükleik asidinin girdiğini, proteininin hiç girmeyişini gösterdiler. Bu deney dünyayı kalıtsal bilgiyi bir nükleik asidin şifrelediğine ikna etti.

Bu arada özel bir nükleik asidin, deoksiribonükleik asidin (DNA) yapısı hakkında ilerleme sağlanmıştı. Bu bileşik 1868’te İsviçreli doktor Friedrich Miescher tarafından Alman şehri Tübingen’deki yaralı askerlerin atılmış iltihaplı bandajlarından elde edilen hücrelerin içinde tespit edilmişti. İltihap genellikle enfek-

siyonla savaşmak üzere toplaşan beyaz kan hücrelerinin birikmesidir; memelilerin kırmızı kan hücrelerinin çekirdeği yokken, beyaz kan hücrelerinin vardır, dolayısıyla da nükleik asitler için bir kaynak işlevi görür.

Bundan sonrasını anlayabilmek için biraz DNA'nın kimyasal bileşimini bilmeniz gerekecek. Bunu da en iyi onun tam adını, deoksiribonükleik asidi parçalarına ayırarak başarabiliriz. Söz konusu molekül, birimleri kendi üzerine düzgün şekilde bağlanmış uzun bir ip gibidir. İpin kendisi birbirini izleyen şeker molekülleri ve fosfat gruplarından oluşmuştur. Şeker molekülü ribozdur, glukozun yakın akrabasıdır, bir oksijen atomunun ekilmesiyle oluşur (isimdeki "deoksi" ve "ribo" kısımları buradan gelir). Şekil 2.4'te görüldüğü gibi riboz dört karbon atomu ve bir oksijen atomundan oluşan basit bir halkaya bağlı parçalardan oluşur. Deoksiriboz halkalarını birbirine bağlayan fosfat grupları bir fosfor atomundan oluşurlar (Hershey'nin deneyini hatırla-



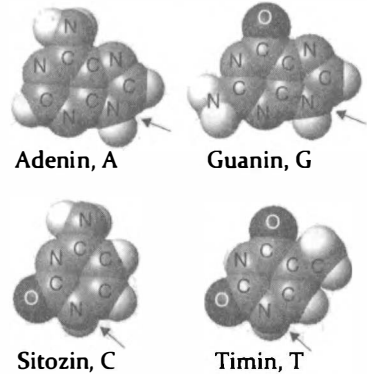
Şekil 2.4 Deoksiribonükleik asidin (DNA) yapısı. Bu karmaşık molekülün yapısını onu oluşturan basit bileşenlere bakarak anlayabiliriz. Sol üstte riboz şekerini görüyoruz. Bu molekül, dört karbon (C) atomu ve bir oksijen (O) atomunun oluşturduğu bir halkaya çeşitli küçük parçaların eklenmesinden oluşmuştur. Bir oksijen atomunun, halkanın güneydoğusundaki karbon atomunun üstündeki atomun (1 numaralı ok) kaldırılarak deoksiribozun oluştuğunu ve molekülün diğer ucuna bir fosfat grubunun bağlandığını düşünün. Şimdi de bir moleküler grubun, bir nükleotit bazın (bkz. Şekil 2.5, burada sadece küçük bir damla şeklinde gösterilmiş) halka karbon atomlarından birine eklenmediğini (2 numaralı ok) ve fosfat grubunu da, halkanın başka bir karbon atomuna bağlanmış olarak (3 numaralı ok) düşünün. Sağda bu durum gösterilmektedir. Bu zincir DNA'dır.

yın!) ve buna dört oksijen atomu bağlanır. DNA'nın omurgasını işte bu fosfat ve deoksiriboz gruplarının sırayla uzun, kırılğan bir inci dizisi gibi yüz binlerce tekrarla birbirini izlemesi oluşturur.

Omurga budur. Her bir deoksiriboz halkasına başka bir molekül bağlanmaktadır ve buna *nükleotit baz* denir. Bu isimdeki "baz" teknik bir kökene sahiptir; kimyada baz, asitle tepkimeye giren bir bileşiktir: Bu bileşiklerde "baz" özelliği moleküllerde azot atomlarının varlığına işaret eder, kimyada bazların ortak bir özelliği budur. DNA'da yalnızca dört nükleotit baz gerçekleşir: Adenin (A olarak kısaltılır), guanin (G), sitozin (C) ve timin (T). Bu moleküllerin yapıları hemen hemen aynıdır ve Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Çizimde görüldüğü üzere dört baz iki gruba ayrılır. Karbon ve azot atomlarının birbirine bağlandığı iki halka nedeniyle adenin ve guaninin şekilleri birbirine daha çok benzer. Bu yapı kimyacıların "pürin" dediği bileşik sınıfının ayırt edici özelliğidir. Öte yandan sitozin ve timin sadece bir karbon ve azot atomları halkasına sahiptir. Bu yapı da "pirimidin" denen bileşiklere özgüdür. Bir DNA molekülünü kafanızda canlandırmak için bu dört bazdan birini bazın konumu rasgele görünecek şekilde omurgadaki her bir riboz grubuna bağlanmış olarak düşünün. Belki bu sayede insanların DNA'yı sıkıcı bulma nedenini anlamaya başlarsınız.

DNA'nın genetik malzeme olduğu tespit edildikten sonra yapısının ayrıntılarına dönük çok yoğun bir ilgi doğdu. Yapının etrafındaki sisten sıyrılarak görülmeye başlanması, Ukrayna'nın batısındaki Chernivtsi'de (daha sonra Czernowitz adıyla Avus-

Şekil 2.5 Genetik şifrenin harflerini oluşturan dört baz. Adenin (A) ve guanin (G) pürin, sitozin (C) ve timin (T) primidindir. (İşaretlenmemiş küçük, açık gri atomlar hidrojenidir.) Oklar DNA'daki riboz birime bağlantıyı oluşturan azotu göstermektedir.



turya'ya katıldı) doğan ve New York'taki Columbia Üniversitesinde çalışmak üzere Amerika Birleşik Devletleri'ne göç eden Avusturya-Amerikalı biyokimyacı Erwin Chargaff'ın (d. 1905) konuya eğilmesiyle oldu. Chargaff 1950 yılında yakın akraba türlerin, karışımın bir kâğıt şeridine sürülmesi yoluyla ayırt edilerek tespit edilmesine olanak veren "kâğıt kromatografisi" adlı yeni tekniği kullanarak DNA'sını çıkardığı dokudan bağımsız olarak eşit adenin ve timin miktarları ve eşit guanin ve sitozin miktarlarının olduğunu tespit etti. Bu bir adeninin bir şekilde her zaman bir timinle ve bir guaninin de her zaman bir sitozinle birleşmiş olduğunu gösteriyordu. Ayrıca her bir baz çiftindeki oranların türden türe değiştiğini, ama aynı hayvanın farklı hücrelerinde aynı olduğunu buldu. Bu gözlem sadece bir değil çok sayıda DNA olduğuna ve her bir DNA'nın bileşiminin de o organizmaya özgü olduğuna işaret ediyordu. Ek olarak Chargaff DNA kaynağı olarak hangi türü kullanırsa kullansın pürinlerin (çift halkalı adenin ve guaninlerin) toplam sayısının primidinlerin (tek halkalı sitozin ve timinlerin) toplam sayısı ile aynı olduğunu buldu. Tüm bu bilgilerin DNA'nın yapısının anlaşılması açısından son derece büyük bir önem taşıdığı ve biraz sezgi eklenmesiyle molekülün yapısını hemen hemen çözdüğü ortaya çıkacaktı.

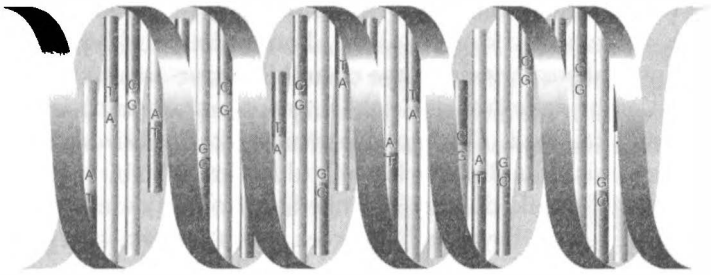
Yeni Zelandalı Maurice Wilkins (d. 1916) ve Rosalind Franklin'in (1920–1958) King's College, Londra'da gerçekleştirdikleri kırınımı çalışmalarında ortaya çıkan bilgiler ve onların sonuçlarının Cambridge'e Francis Crick (d. 1916, Northampton) ve James Watson'a (d. 1928, Chicago) ulaşmasıyla kalan sisi de dağıtan rüzgâr esmiş oldu. Binlerce kez anlatıldığı üzere bu bir hile, rekabet, tahrik, tatbik, düşmanlık, trajedi, mizojini (kadın düşmanlığı), aldatma ve hayal edilemeyecek başka şeylerin hikâyesidir. 20. yüzyılın en önemli keşiflerinden birinin insani duygu ve tutumların çoğunu açığa çıkarmış olması belki de o kadar şaşırtıcı değildir.

Trajik figür elbette otuz yedi yaşında çalışmasında kullanmış olduğu⁵ X ışınları maruziyetinden kaynaklandığından emin ol-

5 X ışını kırınımı X ışınları demetinin bir kristalden geçirilmesiyle uygulanan bir tekniktir. Işın demeti düzenli dizilişe sahip atomlarca farklı yönlere doğru saçılır ve ortaya çıkan yoğunluk örüntüsü kristalin içindeki atomların konumları üzerinden yorumlanabilir.

duğumuz yumurtalık kanserinden ölen Franklin'dir: Yaşam, sırrını, karşılığında yaşam almadan vermemektedir. Kulağa çekici gelse de Franklin'i trajik bir figürden trajik bir kadın kahramana yükseltmek ve anlatının merkezine yerleştirmek uygun olmaz. Bu çok insani öyküdeki gerçeklerin görünümünü birazdan aktaracağız. Öykümüz 20. yüzyıl ortasındaki İngiltere'de, erkeklerin kadınlara karşı tutumlarının bugünkü bakış açısıyla "gelişmemiş" olduğu dönemde geçiyor.

X ışını birimini kurmak isteyen laboratuvar yöneticisi Franklin'i King's College'a katılmaya ve X ışını kristalografisi uzmanlığını taşımaya çağırdığı sırada, Wilkins aynı üniversitede DNA üzerine çalışıyordu. Franklin alanındaki uzmanlığını Paris'teki bir laboratuvar da kömürün mikro yapısı üzerinde çalışarak kazanmıştı ve dikkatini artık fosil yaşamdan canlı yaşama yöneltmeye istekliydi. Geçiş yapmayı başaracağı hiç de kesin değildi, zira King's College o dönem kadınları öğretmenler odasına almıyordu.⁶ Franklin geldiğinde Wilkins okulda değildi ve döndüğünde Franklin'in rolünü yadırgamış gibi görünüyor. Uyumsuzluğun hızla ortaya çıkmasıyla her ikisi de DNA üzerine çalışmak amacıyla ayrı laboratuvarlar kurdular. Kısa süre sonra iki grup da molekülü oluşturan liflerin gayet güzel X ışını fotoğraflarını elde etti.

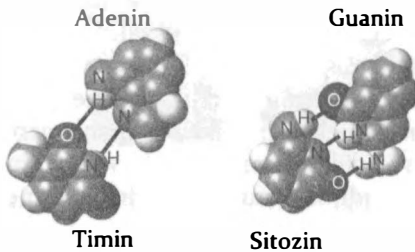


Şekil 2.7 DNA ikili sarmalı. İki nükleit asit ipliği birbirinin etrafına dolanarak biri dar yivli diğeri geniş yivli dolanık bir ikili sarmal oluşturur. İki ipliği bazların arasındaki hidrojen bağları bir arada tutmaktadır ve uzun çubukla gösterilen pürin bazı (A, G) kısa çubukla gösterilen pirimidin bazına (C, T) bağlıdır. Eşleşme her zaman A ... T ve G ... C şeklindedir.

6 Kıs kıs gülecek değilim: Oxford'da benim gittiğim öğretmenler odası da 1970'lere dek kadınlara giriş izni vermiyordu.

Wilkins Napoli'deki bir toplantıda James Watson adında genç bir Amerikalı biyologla tanıştı ve fotoğrafları ona gösterdi. Bu Watson'da DNA'nın yapısını araştırma isteği doğurdu ve Watson 1951 yılının Eylül ayında X ışını kristalografisinin kurucularından biri olan Sir Laurence Bragg tarafından yönetilen laboratuvarında X ışını kırınımı hakkında bilgi almak için Cambridge'e taşındı. Burada doktorasını bitirmek üzere olan Francis Crick'le karşılaştı.

1951 yılının Kasım ayında iki girişim, biri cesareten (ya da sabırsızlıktan) yoksun dikkatli ölçümleriyle, diğeri ölçümleri yapmak için gereken kaynaklardan (ya da sabırdan) yoksun ama hayal gücü yüksek düşünüşüyle karşı karşıya geldi. Watson Londra'ya gitti ve Franklin'i çalışması üzerine konuşurken dinledi. Aceleyle Cambridge'e dönerek Crick'le beraber ikisi Watson'ın Franklin'in verilerinden hatırlayabildiği kadarıyla açıklama getiren bir model inşa ettiler ve King's ekibini gelip bakmaya davet ettiler. Model yapılmasının (metal tel ve tabakalardan yapılma gerçek fiziksel modeller) protein yapısının açıklanması için güçlü bir teknik olduğu ortaya çıkmıştı ve Crick ve Watson dönemin modasına uymuştu. King's ekibi geldi ve modeli kendi verileriyle bağdaşmadığı için hemen reddetti. Aynı zamanda potansiyel olarak ve görüldüğü üzere fiili olarak da sonuç verici olan model oluşturma yaklaşımını da reddettiler. Dahası Bragg, Crick ve Watson'a DNA üzerine çalışmalarını söyleyerek projenin hakkını King's ekibine bırakma emri verdi. O günden bu yana bilimde hem sahiplik hem de kadınlara yaklaşım konusunda tutumlar değişti: Belki de ikinci adım ilkinin dönüm noktasına işaret ediyor.



Şekil 2.8 İki DNA ipliğini bir arada tutarak ikili sarmalı oluşturan baz eşleşmesi. Moleküller arasındaki hidrojen bağları çizgi şeklinde resmedilmiştir. Bir pürinin bir pirimidinle eşleştiğini ve eşlerin cüsselerinin yaklaşık olarak aynı olduğuna dikkat ediniz.

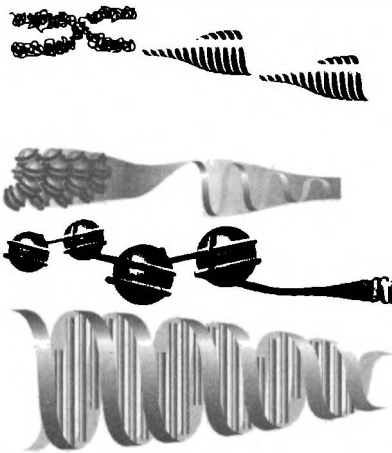
1952'de Crick ve Watson Bragg'ın yazılı emrinin geçerli olmadığı yerlerde proteinlerin yapısı konusunda çok başarılı olmuş Linus Pauling'in konu üzerine çalıştığını öğrendiler. Pauling bu konuda çalışıyorsa, diye akıl yürüttüler, o halde konu zaten King's'ten dışarı sızmıştı ve herkes kadar onların da konu üzerine çalışmaya hakkı vardı. Tam bu sırada tuhaf bir şey oluyor. İşte bu noktada Wilkins Watson'a Franklin'in X ışını kırınımı fotoğraflarını onun bilgisi dışında gösterdi (Şekil 2.6) ve Max Perutz da ona ve Crick'e Franklin'in son elde ettiği verilerini özetlediği, Medical Research Council'e yazılmış ama yayımlanmamış raporu sağladı. Nihayet sarmal molekülün boyutları hakkında kesin sayılara sahip olmuşlardı ve modellerini buna göre ayarlayabilirlerdi. Birkaç hafta içerisinde Wilkins'e ünlü modellerini zafer edasıyla yollayabilecek durumdaydılar ve Wilkins de onayladı. 25 Nisan 1953 tarihinde *Nature*'da üç yazı yayımlandı; biri Crick ve Watson'ın, diğeri Wilkins'in grubunun ve üçüncüsü de Franklin'in grubunun imzasını taşıyordu (Wilkins'in kendisinin verilerini ilettiğinden Franklin'in haberi hiç olmadı). Son iki makale birincisinin düşüncelerini destekleyen ölçümleri sağlamış oldu. O tarih, 25 Nisan 1953 modern biyolojinin doğduğu gündü.

DNA'nın yapısı bugün herkesçe bilinen ve her yerde görülen sembolik sağ elli ikili sarmaldır. Uzun bir nükleik asit ipliğinin bir başkasının etrafına sarılmasıyla dolaşık bir çift oluşmakta (Şekil 2.7) ve görüntü ironik bir biçimde Vatikan müzesinin halk girişindeki merdivenleri andırmaktadır.⁷ Kilit özellik ise, bir ipliğin nükleotit bazlarının diğerinin nükleotit türüne, adeninin her zaman timinle (bunu A ... T ile gösteriyoruz) ve guaninin her zaman sitosinle (G ... C) eşleşmesi anlamında örtüşmesidir (Şekil 2.8). Bu eşleşme Chargaff'ın seçtiği örneklerin hepsinde adenin sayısının timin sayısı ile aynı olması ve guanin sayısının sitozin sayısı ile aynı olması şeklindeki gözlemine açıklık getirmektedir: Eşleşme eşit miktarları garantilemektedir. Dikkat etmeniz gereken bir diğer husus da, hayli küçük pürinin (adenin ve guanin) her zaman daha iri yarı bir pirimidinle (timin ve sitozin) eşleşme-

7 Bu ikili sarmalın bir fotoğrafı şurada bulunabilir: <http://www.planetware.com/photos/SCV/RVATMS3.HTM>

sidir, çünkü bu sayede ikili sarmal biçimi düzgündür: İki büyük pürin çıkıntı yapacak, iki küçük primidin girinti oluşturacaktır. Bu eşleşme Chargaff'ın bir başka gözlemini de açıklar; seçilen bir örnekteki pürin miktarı (A + G) pirimidin miktarıyla (T + C) aynıdır.

İki nükleik asit ipliği arasındaki yapışmanın nedeni *hidrojen bağ* adıyla bilinen çok özel bir kimyasal bağ türüdür. Özel derken olağandışı demek istemiyorum; çünkü okyanuslardaki her bir su molekülü yanındakine bunlarla bağlıdır, dolayısıyla sadece okyanuslarda bunlardan yaklaşık 10^{44} adet bulunur, en az bunun kadar da başka yerlerde rastlanabilir. Hidrojen bağ şu anlamda özeldir: Olağandışı bir biçimde ve yalnızca birkaç belli türde atom, oksijen ve azot arasında oluşur. Hidrojen bağ oluşturmak için bir hidrojen atomu (çok küçüktür, o yüzden bu tür bir şey yapabilir) iki başka atom arasında yer alır ve bunları birbirine bağlayan bir tür zıncı gibi iş görür. İkili sarmalı anlamının en önemli hususlarından biri (Şekil 2.8'de gördüğümüz gibi) timin ve adenin azot, oksijen ve hidrojen atomlarının tam doğru şekil-



Şekil 2.9 DNA'nın ikili sarmalı hücre çekirdeğine yerleşirken azımsanmayacak bir sarım ve süpersarım geçirir. Çizimde sıkışmanın ayrıntıları gösteriliyor. Altta DNA'nın ikili sarmalının kendisini görüyoruz. Bu molekül küre şeklinde gösterilmiş histon moleküllerine sarılıyor ve sonuçta ortaya çıkan sarılmış-sarım düzenlemelerini sağlayan

sarılmış DNA sarımları çizimin üçüncü sırasında gösteriliyor. Bu sarılmış-sarım tekrar sarılıyor, tekrar sarılıyor, tekrar sarılıyor ve sonuçta süpersarımlı moleküller sargısı oluşuyor ve süpersarımlı molekülün kendisi de üstte gösterilen kromozomun içine sarım şeklinde giriyor.

de biçimleniş ve düzenlenişine sahiptir ve bu sayede iki hidrojen bağı çok rahat şekilde oluşabilmektedir. Benzer şekilde sitozin ve guanin de çok rahat şekilde birbirine uymakta, ama bunu üç hidrojen bağı oluşturarak başarmaktadır. Bu hidrojen bağlarının atomları bir arada tutarak kararlı moleküller oluşturan alışıldık kimyasal bağlardan çok daha zayıf olmaları, ikili sarmalın iki ipliğinin birbirinden hayli rahat ayrılabilmesi ve tıpkı suyun tekil su moleküllerini parçalamadan buharlaşması gibi nükleik asit ipliklerini el değmemiş halde bıraktığı anlamına gelir.

Şimdi Watson ve Crick'in kısa fakat olağanüstü makalelerini şu çekingen yorumla sonlandırdıklarını görebiliriz:

İleri sürdüğümüz bu eşleşmenin doğrudan doğruya genetik malzeme için muhtemel bir kopyalama mekanizması önerdiği bizim de dikkatimizden kaçmamıştır.

Aslında molekülün ayrıntılı yapısına 1970'lerin sonuna dek ulaşamamış olmasına rağmen modellerinin replikasyona bu kadar temiz bir açıklama getiriyor olması, bu kadar çabuk kabul görmesinin arkasındaki asıl nedendi. Bu çok ilginç ve cazip fikrin nasıl ortaya çıktığını görmek için iki ipliğin nükleotit bazlarının şu dizilime sahip olduğunu düşünün:

... ACCAGTAGGTCA ...

... TGGTCATCCAGT ...

Üst iplikteki ilk A hidrojen bağlarla alt iplikteki T'ye, C benzer şekilde G'ye bağlanmıştır vs. Ardından ipliklerin şu şekilde ayrıldığını varsayın:

... ACCAGTAGGTCA ... ve ... TGGTCATCCAGT ...

Şimdi de hücrede bir nükleotit baz fazlası olduğunu düşünün. Bu durumda bunlar ayrılmış ipliklere bağlanacak ve her biri yeni bir ipliğin yaratılması için bir kalıp oluşturacaktır:

... ACCAGTAGGTCA TGGTCATCCAGT...

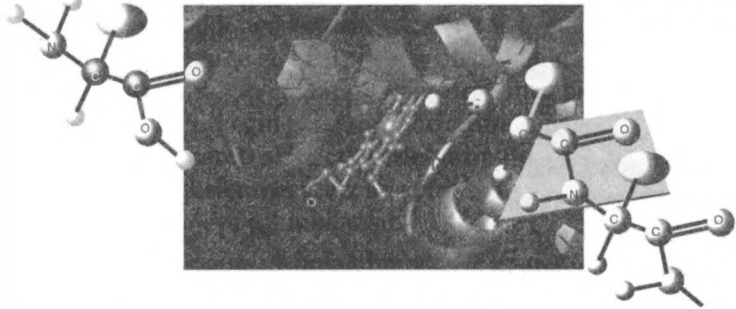
ve

... TGGTCATCCAGT ... ACCAGTAGGTCA...

İlk başta elimizde bir adet varken şimdi iki özdeş ikili sarmala sahip olduk. Reprodüksiyon gerçekleşti!

Bu noktada bölümde daha önce karşımıza çıkan reprodüksiyonda (hücre üremesinde) kromozom modeline görece daha rahat temas edebiliriz. Tek yapmamız gereken kromozomu bir DNA ipliği olarak düşünmek. Bu durumda mitoz süreci sadece (sorgulamamız gereken bir söz, her zamanki gibi) ikili sarmalın bir daha çoğalmasındır.

Şu “sadece” sözüne gelirsek... Karşımıza çıkan problemlerden biri DNA molekülünün çok uzun olmasıdır: Yirmi üç kromozomlu bir insan DNA’sı (her kromozomda bir DNA molekülüyle) çekip uzatılır ve birleştirilirse uzunluğu 1 metreyi bulur ve tüm bu malzemenin çok küçük hücre çekirdeğine sıkıştırılmış olma-



Şekil 2.10 Bir protein aminoasitlerden oluşur ve bunların genel yapısı çizimin sol tarafında gösterilmektedir. Gri elips her örnekte farklıdır, ama biyolojide karşımıza çıkan bütün aminoasitler aynı düzene sahiptirler. İki aminoasit birbirine bağlandığında $-COOH$ grubundaki karbon atomu (molekülün sağındaki) azot atomuna (molekülün solundaki) bağlanır. Birçok aminoasit bu şekilde bağlanarak sağdaki yapıda gösterilen şekilde uzun bir zincir oluştururlar. Bu zincire genel olarak *polipeptit* denir; bağlanmış iki aminoasit olduğundaysa *di-peptit* adını alır. Zincirin üzerindeki hafif boyalı düzlemde gösterilen $-CONH-$ grubu *peptit bağ*’dır. Bir peptit “artığı” (aminoasit molekülünün geri kalanı) bir başka artığa peptit bağla bağlanır. Uzun zincir tipik olarak sarmal şekilde burulmuştur; bu durum arkaplanda gösterilen hemoglobin parçasından da görülebilir, şerit olarak gösterilmiş olan sarmallar polipeptit zincirleridir.

sı gerekir. Kromozomlar ikileşmiş olduğuna ve insan vücudunda yaklaşık yüz trilyon hücre olduğuna göre her birimizin içindeki toplam DNA uzunluğu olağanüstü büyüktür. Bir i'deki noktayı oluşturmak için gereken iki yüz hücreyi hatırlayın: O hücreler yaklaşık 400 metre DNA içerirler. Bu harika paketleme becerisine ulaşmak için ikili sarmal, çıkıık görevi görevi gören histon adında protein molekülü kümelerinin etrafına dolanır. Ardından bu çıkırıklar da birbirlerinin etrafına dolanırlar. Bu sarımın kendisi de kendi kendisine sarılmıştır (buna *süpersarım*lı diyoruz) ve sarımın sıklığı kromozomların mitoz esnasında sarılıp sarılmayacaklarını ya da hücrenin kalan yaşamı boyunca olduğu üzere çekirdeğin içerisine yayılıp yayılmayacaklarını belirler (Şekil 2.9).

İnsan DNA'sında yaklaşık 3 milyar baz çifti vardır, fakat bu sayı küçük bir virüste yalnızca beş bin civarındır. Bu kadar karmaşık olduğumuz için kendimizle gurur duyabiliriz. Öte yandan havaya fazla girmememiz için bir semender türünün (*Triturus cristatus*) genomunda yaklaşık 20 milyar baz çifti bulunduğunu da belirtelim. Fazla DNA'nın gereksiz olduğu savıyla bu utançtan semender gibi kıvırtıp kaçabiliriz. Semenderin DNA'larının gerçekten de gereksiz fazlalıkta olması ve evriminin erken evresinde hücrelerinde bir süreliğine tek bir kromozom kümesiyle devam etmişken (yani gamet hücresi gibi "haploit"ken) ikinci bir kromozom kümesini kopyalarak edindiği sırada (bizim gibi "diploit" olurken) bu fazlalığın ortaya çıkmış olması mümkün.

DNA molekülü esasen bir bilgi deposu, nesiller boyunca iletilen bir mesajdır. Bu mesaj, içinde olduğu organizmanın yapılanması ve devamlılığı için gereken bütün bilgileri içerir. Dolayısıyla sorumuz bu bilginin ne olduğu, nasıl şifrelendiği ve nasıl yorumlandığıdır.

Canlı organizmalar için bir benzetmeyle söylersek, proteinler hücre kovanlarındaki işçi arılardır. Proteinler kasta, kıkırdakta, toynakta, pençede ve saçta olduğu gibi yapısal olabildiği gibi, hemoglobinde ve "canlı olma"yı oluşturan süreçleri kontrol eden

sayısız enzimde olduğu gibi işlevsel olabilir. Proteinlerin belirlenmesi kalıtımın merkezi işlevidir, dolayısıyla DNA'nın proteinlerimiz için bir tür harita ya da tarif olduğundan emin olabiliriz. Bu deneysel olarak da doğrulanmıştır, zira DNA değışiklikleri protein değışiklerine sebep olmaktadır. Çoğunlukla bu değışiklik proteinlerde çalışma bozukluklarına sebep olur ki buna hastalık diyoruz. Nadiren faydalıdır ve bu durumda hastalığın statüsü yükselir, buna da evrim diyoruz.

Daha önce bahsettiğimiz gibi, bütün proteinler yapıları Şekil 2.10'da gösterilen, "aminoasit" adı verilen küçük moleküllerden oluşan dizilerdir. Daha resmi ifade edersek, proteinin bir *polipeptit* olduğunu ve tipik proteinlerin yüz civarı aminoasit biriminden oluşmuş (bu sayı yapısal proteinlerde binlere çıkabilir) polipeptitler olduklarını söyleyebiliriz. İnsan vücudunda bulunan yaklaşık 30 bin farklı proteinin hepsi sadece yirmi farklı aminoasitten yapılmıştır, bu yüzden bir DNA molekülü bu yirmi aminoasitin birbirine bağlandığı dizilimi belirlemek zorundadır. Burada kazara bazı gelişmeler de olabilir. Organizmalar bu yirmi bileşenden oluşmuş olmasına karşın sonsuz sayıda başka aminoasit vardır ve eğer doğa olur da repertuarını genişletmek isterse (belki de başka gezegenlerde yapmıştır bile) etrafı karıştırıp kendisine başka aminoasitler bulabilir. Başka gezegenlerdeki yaşam farklı aminoasitlerden kurulmuş olabilir, dolayısıyla oralara gittiğimizde ne yediğimize dikkat etmek zorundayız. Aslında doğa dünyada genişlemenin sınırına kadar gelmiştir; yirmi birinci aminoasit olarak *selenosistein*'de bir sülfür atomunun yerini bir selenyum atomu alır ve bazı enzimlerin elementlerin en tehlikeli olan oksijene karşı hücreleri korumasına yardım etmek üzere kendisine yer yer ihtiyaç duyulur. Bu yazılanları Çin'in kuzey taraflarında okuyorsanız başınız dertte olabilir, çünkü orada toprak selenyum yönünden alışılmadık derecede fakirdir ve kas problemleri şeklinde kendisini dışa vuran Kashin-Beck sendromu riski altındasınız demektir.

Bir DNA molekülü A, C, G ve T şeklinde bir nükleotit diziliminden oluştuğu için bunların "harfler" olduğunu ve bir araya gelince "kelimeler" oluşturduklarını düşünmek doğaldır; işte *dizgi* (*kodon*) denen bu şeyler aminoasitlerin bağlanmak zorun-

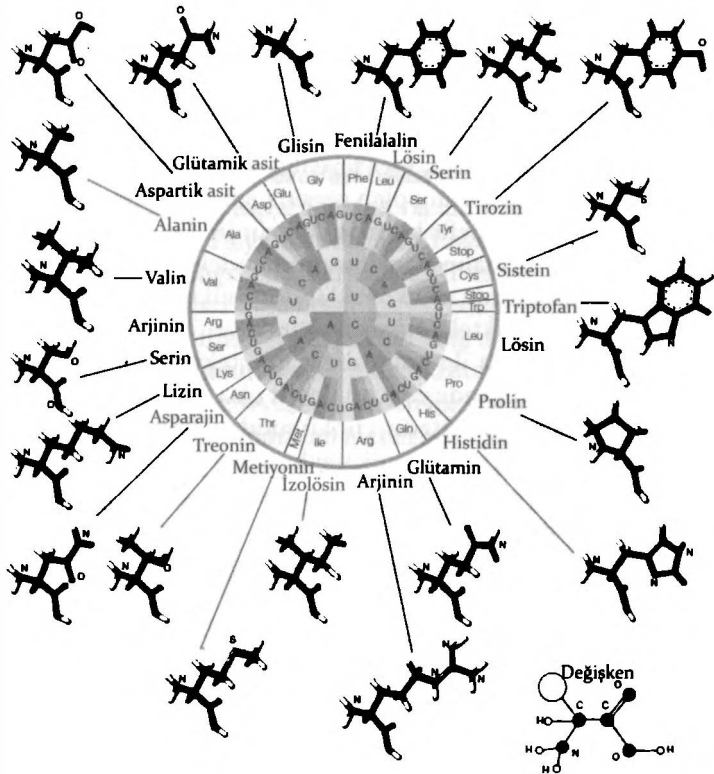
da olduğu dizilimi belirtirler. Yirmi aminoasit belirtmemiz ve bunu nerede başlayıp nerede bittiğine işaret ederek yapmamız için elimizde sadece dört harf olduğu için şifre açık ki tek harfli ya da iki harfli bir şifre olamaz. Tek harfli bir şifre yalnızca dört aminoasiti, iki harfli şifreyse sadece on altı aminoasidi belirtebilir. ACG bir aminoasiti, CAT bir başkasını vs şeklinde ilerleyen üç harfli bir şifreleme toplamda $4^3 = 64$ aminoasit ve noktalama işaretini belirtebilir. Doğanın doğal cimriliğini düşünürsek (yani kıt kaynakların bilinçsiz ama etkili kullanımı ve gereksiz enerji yayılımından bilinçsiz ama etkili kaçınma), genetik şifrenin bir üçlü şifre, üç harfli dizgilere dayalı bir şifre olduğunu düşünebiliriz. İki bazın bazı aminoasitleri, üç bazın başkalarını belirttiği vb değişken bir şifreyi devreden çıkarmak için *a priori* bir neden yoktur; ama doğa zarif olmayan bu çözüme gitmediği gibi, şükür ki genetik şifreyi kırmaya koyulan ilk işçiler de bu karanlık sokağı araştırmaya girmemiş gibi gözüküyor. Üçlü şifrenin bir avantajı da yeni aminoasitleri şifrelemek için doğaya şifredeki bolluğu kullanarak repertuarını genişletme izni vermesidir. Bu genişletmenin nasıl olabileceğine dair şimdiden bir ipucuna da sahibiz. Az önce yirmi birinci aminoasit olan selenosisteinin bazen birleşmemiş olduğunu gördük: Bu aminoasitin üçlü şifresi TGA'dır, aynı zamanda bir durdurma sinyali olarak da kullanır ve selenyumun olup olmadığına bağlı olarak işlevi değişir. Selenyum varsa, TGA “selenosistein kullan” der; yoksa, TGA “dur bakalım, bu proteini yapmayı bırak” der.

Şifre kırıcılar karanlık sokakları araştırdılar, bazıları da çok zarıftı, ama bunu Aristocu tarzda koltuklarında yaptılar; bir kez daha imdada deney yetiştirdi ve doğanın işin başında eğer insanlar olsaydı onların seçeceği en zarıf, en ekonomik şemaları izlememiş olduğunu gösterdi. Genetik şifre, şifre kırıcıların hayaliydi; çünkü şifredeki semboller çok az (dört) ve çıktı da muharebe düzeninde değil, yaklaşık yirmi seçimden biriydi sadece. O dönemde, 1953'te elde neredeyse hiç veri yoktu, çünkü DNA'daki nükleotit dizilimini kimse bilmiyordu ve proteinlerdeki bilinen aminoasit dizilimleri de çok eksikti: Frederick Sanger (d. 1918) protein insülinin dizilişini düzenlemeyi tamamlamak üzereydi (1955 yılında başardı), ama elde başka da bir şey yoktu. İnsan-

lıgın önünde, hayallerin kısıtlanmadığı geniş bir faaliyet alanı uzanıyordu.

Rus fizikçi George Gamow'un (1904-1968) kısıtsız bir hayal gücü olduğu kesindi, zira evrenin kökeni için Büyük Patlama kuramını ortaya atmakla kalmamış, elementlerin kökeni için de bir kuram tasarlamıştı. Her şeye ilgi duyuyordu ve dikkatinin 1950'lerin en gözde sorunu olan genetik şifreye yönelmesi de gayet doğaldı. Gamow nefis bir fikir ileri sürdü: Proteinler ikili sarmalın dışında, sarmalın kanallarının içindeki elmas şeklindeki kovuklarda büyüyordu. Bu kovuklar dört nükleotit bazdan oluşmuştu, ikisi bir iplikteki elmasın altında ve üstünde, diğer ikisi aynı iplikten bir baz ile onun diğer iplikteki partnerini köşeye sıkıştırıyordu. İşin içinde dört nükleotit olsa da bu usta bir tarzda üçlü bir şifre oluşturmaktadır, çünkü sondaki ikisi (A ... T gibi bir tamamlayıcı baz çifti) bir olarak sayılır (çünkü bir baz A ise diğeri T olmak zorundadır). Ardından aminoasiti kendi uygun nişine yerleşmiş olarak düşündü ve bir enzimin hepsine katılmak üzere geldiğini hayal etti. Yatay ya da dikey olarak çevrilme yoluyla bağlantılı olan elmasların aynı aminoasit için şifrelendiklerini varsayarak devam etti, böylece geriye sadece yirmi ayrı dizgi (kodon) kaldı ve bu da tam olarak onun istediği sayıydı. Burada akıllılık yaramadı ama, çünkü bu durumda dizgilerin başlayıp durmaları için yer de fazlalık da yoktu. Gamow coşkunun getirdiği iyimserlikle belki de bu problemin çevresinden dolanmanın bir yolu olabileceğini düşündü.

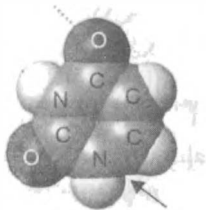
Gamow'un *elmas kodu* bir başka özel niteliğe daha sahipti: Bu, her bir nükleotit bazın aynı anda üç dizgiye de katkıda bulunması anlamında bir *örtüşümlü şifre*'dir. Bu nedenle AGTCTTG dizisi AGTCTTG, AGTCTTG, AGTCTTG, AGTCTTG, AGTCTTG dizgilerinden oluşur. Örtüşümlü bir şifre çok verimli ve etkilidir, bu yüzden doğanın benimsemesi açısından çekici bir aday gibi gözükmektedir. Fakat doğa başka türlü düşünmektedir. Örtüşümlü şifrelerdeki problemlerden biri birçok aminoasit dizisinin elenmiş olmasıdır. Örneğin bir dipeptiti, iki aminoasitten oluşan çok küçük bir proteini şifrelemek istediğimizi varsayalım. Bunun bir örneği bir tür tatlandırıcı olan aspartamdır (gıda katkı maddesi olarak satılır) ve aspartik asit ve fenilalanin adlı aminoasit-



Şekil 2.11 Aminoasitlerin üç harfli dizgilerle gösterilen genetik şifre ve yapıları. Örneğin merkezden dışarı doğru okunurken UAC dizgisi tirozini (Tyr) kodlar. U, urasil anlamına gelmektedir (Şekil 2.12). Bütün aminoasitler küçük çizimde görülen düzene sahiptir. Bazı aminoasitlerin birden fazla yerde olduğuna ve şifrenin son derece, özellikle de üçüncü harfinde müsrif olduğuna dikkat ediniz. Örneğin ACG,ACU,ACT ve ACA hepsi treonini (Thr) kodlamaktadır.

lerin hafif değiştirilmiş biçimlerinin birleşiminden oluşur. Doğal olarak ortaya çıkan yirmi aminoasit olduğu için $20 \times 20 = 400$ olası dipeptit vardır. İki aminoasiti örtüşümlü şifreyle kodlamak için dört baza ihtiyacımız var; prolin aminoasiti için CCGA (ki öyle olacak) ve arjinin için CCGA elde etmek için CCGA gibi. Fakat dört nükleotit baz için sadece $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ olası kombinasyon var, dolayısıyla birçok dipeptit şifrelenemez (aspartam da bunlardan biridir). Fakat bu yasaklı kombinasyonlar karşımıza çıkmaya başladı ve bu doğanın örtüşümlü şifrenin zarafetini kullanmamış olduğunu gösterdi: Hiç sonlanmayan zahmetli evrim oyunundaki faaliyeti için daha fazla esneklik istemişti. Sidney Brenner (d. 1927) bu problemin tanılayıcı analizini yaptı: Olası örtüşümlü şifrelerin hepsinin bilinen aminoasit dizilerince elenmiş olduklarını gösterdi. Artık kesinlikle çatılmış bu mezara bir başka çivi de, bir harfteki değişikliğin proteinin yapısını üç aminoasite kadar etkileyebilmesidir. Bu yüzden AGTCTTG mutasyona uğrayıp AGGCTTG olsa, bu durumda AGGCTTG, AGGCTTG, AGGCTTG ve diğer dizgilerden oluşacak ve bunun protein için ve de genellikle bir bazdaki değişiklikten bile sağ çıkamayan organizma için muhtemelen korkunç sonuçları olacaktır.

Spekülatif fizikçilerce tutulan ama doğanın tenezzül etmediği ortaya çıkan şu ekonomik ve şık fikirlere uyan bir başka karanlık sokak daha vardı. Noktalama sorunluydu. Nereden başlayacağımızı nasıl bileceğiz? Örtüşümlü olmayan bir şifrede bile . . . AGTCTTG . . . şöyle okunabilirdi: . . . (AGT)(CTT)(G . . . , . . . A)(GTC)(TTG)(. . . , . . . AG)(TCT)(TG . . . , vs. Temsili örneklerde görülen farklı seçimlere şifrenin çerçevesi kaymış okumaları denmektedir. Crick hücrede düzeneğin yalnızca belirli bazı dizgiler için var



Urasil, U

Şekil 2.12 RNA molekülünün içinde timinin yerine görülen urasil bazı, U. Urasilın timinden farkı, timinin kuzeydoğu köşesindeki bir metil gruba (CH_3) sahip olmamasıdır. Ok riboz bağlanma noktasını işaret etmekte, noktalı çizgiler de molekülün adenine oluşturduğu hidrojen bağları göstermektedir.

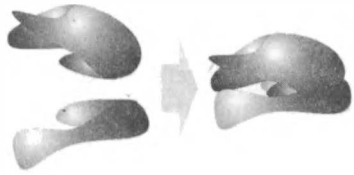
olduğunu ve şifrenin de çerçevesi kaymış okumaların hepsinin saçma olacağı şekilde olması gerektiğini ileri sürdü. Bu örnekte doğru okumanın . . . (AGT)(CTT)(G . . . olduğunu varsayalım; bu durumda AGT ve CTT geçerli şifreler olacak, ama çerçevesi kaymış okumalar GTC ve TCT saçma olacaktır. Bu tür bir şifreye noktalama olmadan belirsizlik yaratmayacak biçimde okundukları için *virgülsüz* denmektedir. Altmış dört dizgi adayı bu kısıtlama akılda tutularak gözden geçirildiğinde yirmisinin geçerli olduğu ortaya çıktı ve bu gerektiği düşünülen sayıyla tam olarak aynıydı. Örneğin TTT elendi, çünkü . . . TTTTTT . . . kombinasyonu . . . (TTT)(TTT) . . . ve . . . T)(TTT)(TT . . . gibi okuma çerçevesi belirsizlikleri içermektedir. Şifre tam olarak gereken dizgi sayısını sağlıyor ve çerçevesi kaymış okumalar probleminden kaçınıyor gibi gözüktüğü için hızla tüm dünyada kabul gördü.

Ama doğa kabul etmemişti. Bu kısıtsız spekülasyona 1961 yılındaki müdahalesiyle sert bir karşılık vererek artan spekülasyonlarla daha fazla vakit kaybedilmesinin önüne geçti. Onun bu sert karşılığını tespit eden kişiler olan Marshall Nirenberg ve Heinrich Matthaei TTT'nin geçerli bir dizin olduğunu ve fenilalanin anlamına geldiğini gösterdiler.⁸ Böylece zarif, kısıtlayıcı, virgülsüz şifremiz nalları dikti.

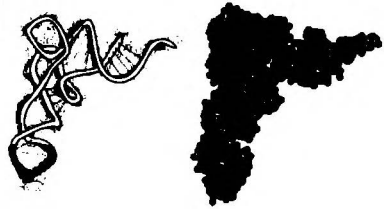
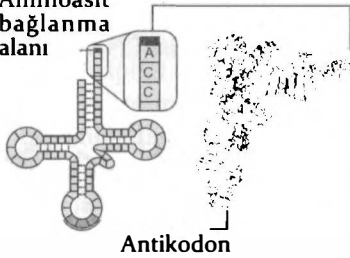
Doğanın o tipik, bilinçsiz, kasıtsız muzipliğiyle kandırmaca yaptığı ortaya çıktı. Var olan en basit şifreyi geliştirmişti, ne fazlalık umurunda olmuş ne de şifrenin kendisindeki okuma çerçevesi problemine özel bir dikkat göstermişti. 1960'lı yıllarda parçaları ağır ağır birleştirilen gerçek genetik şifre son derece müsriftir ve aynı aminoasite karşılık gelen altı dizgi ve üç kasıtlı durma bile görülebilmektedir (Şekil 2.11). Bu müsrif bolluk çok zekicedir, çünkü tecrübeyle görülebileceği üzere bu, replikasyondaki "hataların" ölümcül sonuçlar doğurmasını daha az olası hale getirir. Örneğin CCT, CCC, CCA, CCG hepsi prolini kodlar, dolayısıyla son harfin kopyalanmasında yapılan hata önemli değildir. Tek bir harf değişiminin önemli olduğu yerlerde bile, sonuç genellikle bir aminoasitin yerini benzer başka birinin almasıdır. Örneğin

8 Henüz bahsetmediğimiz, birazdan bahsedeceğimiz RNA üzerine çalışıyorlardı: RNA'da timinin yerini urasil (U) alır ve onlar fenilalanin için şifrenin UUU olduğunu gösterdiler.

Şekil 2.13 Ribozom, kopyalama gerçekleştiğinde tek bir birim oluşturmak üzere (sağda) bir araya gelen eşit olmayan büyüklükte iki bileşenden oluşur. Her birim küçük bir fabrikadır. Büyük birim tipik olarak sırasıyla yaklaşık 2900 ve 120 baz uzunluğunda iki ribozomal RNA (rRNA) molekülünden ve yaklaşık otuz iki farklı, çoğu durumda tek kopya proteinden oluşur. Küçük birimde yaklaşık 1540 baz uzunluğunda bir rRNA molekülü ve yirmi farklı proteinden birer kopya vardır.



Aminoasit bağlanma alanı

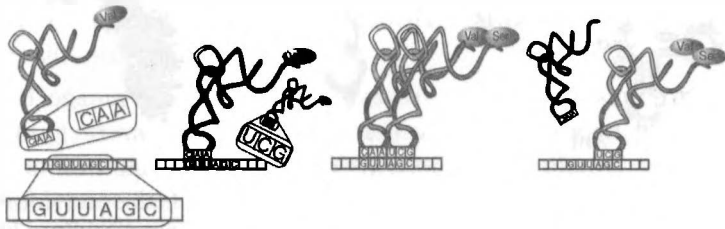


Şekil 2.14 Bir taşıyıcı RNA (tRNA) molekülü. Biyolojik moleküller o kadar karmaşıktır ki betimlenmeleri için vurgulanmak istenen özelliklere bağlı olarak çeşitli gösterimler kullanılır. Solda bazların (kareler) konumlarının sistematik düzenini ve molekülün genel şeklini görüyoruz. Antikodon, mesajcı RNA'daki kodon (dizgi) dizilimini ayırt etmek için kullanılan kısımdır ve uygun aminoasit gösterilen alana bağlanır. İkinci çizim gerçek bir tRNA molekülündeki (fenilalanin mayalı RNA) bağları göstermektedir. Üçüncü yapı, çizgi yapının üstüne kurulmuş yapının omurgasıdır. Son olarak dördüncü yapı atomların hepsini göstermekte ve molekülün gerçekte hacim dolduran şekli hakkında bir fikir vermektedir, ama ayrıntıların (diğer moleküller haricinde) görülmesi zordur.

TTT, TAT şeklinde değiştiğinde, fenelalalinin yerini onun kuzeni tirozin alır. Bu açıdan şifre gayet optimaldir. Son olarak, altmış dört dizginin hepsi uygulanabilir olduğu için, doğa daha önce bahsettiğimiz gibi çeşitlilik ve denemeler için alan sahibi olur.

Aşılması gereken üçüncü engel, şifrenin hücre içerisindeki malzemelerce yorumlanmasıdır. Temel problem DNA hücre çekirdeğine hapsolmuşken, protein sentezinin çekirdeğin çevresindeki sitoplazmada gerçekleşmesidir. Bir DNA molekülü çekirdek zarından geçerek sitoplazmaya giremeyecek kadar büyüktür, o halde taşıdığı bilgi kullanıldığı yere nasıl gitmektedir?

Şimdi DNA'nın daha ilkel bir çeşidi olan ribonükleik asite (RNA) giriyoruz. Ribonükleik asitler DNA'yla aynı genel yapıya sahiptir ve şeker-fosfat omurga ve ona asılı nükleotit bazlardan oluşurlar. Ne var ki şeker deoksiriboz değil ribozdur (bu yüzden DNA'daki D'nin yerine RNA'da R vardır) ve ribozun ilk baştaki fazladan oksijen atomu kaybedilmemiştir. İkincisi RNA'da timi-



Şekil 2.15 Mesajcı RNA'nın (mRNA, harf şeridi) yönlendirmesi altında protein sentezi ve taşıyıcı RNA'nın (tRNA) faaliyeti. Faaliyet ribozomun içinde gerçekleşir; burada gösterilmemektedir. Bir tRNA, CAA antikodonuyla beraber ve bir valin molekülü yüklenmiş olarak GUU kodon dizisine konar. Bir süre sonra başka bir tRNA, bu kez UCG antikodonuyla beraber ve bir serin molekülü yüklenmiş olarak dolanır ve onun kodunu AGC dizisinin üzerine yerleşir. Ardından enzimler valin ve serin moleküllerine katılarak dipeptit Val-Ser'i oluştururlar, boşalan CAA tRNA'sı başka bir yerde başka bir valin molekülüne katılmak üzere yüzüp gider ve ribozom bir sonraki kodonun üzerine geçer ve uygun tRNA molekülü ve onun aminoasitinin gelişini bekler. Bu şekilde mRNA'nın belirlemesiyle polipeptit zinciri oluşur.

nin yerine çok benzer ama oldukça farklı primidin, urasil (U, Şekil 2.12) vardır. T'nin yerine neden U'nun olduğu ya da omurgada neden deoksiriboz yerine riboz kullanıldığı tam olarak bilinmemektedir: Muhtemelen molekülün oluşturabildiği hidrojen bağlarının kuvvetlerindeki çok küçük farklar yüzünden olsa gerek. Büyük farklardan biri RNA'nın tek bir iplikten oluşmuş olmasıdır. RNA'nın orijinal şifreleme maddesi olduğu fakat evrimin erken bir aşamasında onun işlevini daha kararlı olan DNA'nın üstlendiği düşünülmektedir. RNA'nın bir enzim olarak da davranabildiğinin gözlenmesi bu görüşe destek sağlamaktadır. Bu işlev yaşamın kökenine ilişkin bir problemi çözüme ulaştırır: Hangisi daha öncedir, tavuk mu (enzimlerin genetik malzemenin faydalanması gerekti) yoksa yumurta mı (genetik malzemenin enzimleri belirlemesi gerekti)?

İki ana tür RNA vardır: *mesajcı RNA* (mRNA) ve *taşıyıcı RNA* (tRNA). Öncelikle mRNA'ya odaklanacağız, çünkü DNA'da şifrelenmiş bilgiyi sitoplazmanın dışına bu taşımaktadır. Mesajı almak için mRNA DNA kopyalarına benzer bir bireşime sahiptir; bir DNA ipliği açıktadır ve bir enzim, *RNA polimeraz* bu ipliği mRNA'yı üretmek için şablon olarak kullanır. DNA'nın sadece bir ipliği kullanılır, ama bunun kromozomda kullanılan iplikle aynı olması şart değildir ve kopyalama iplik üzerinde her zaman aynı yönde gerçekleşir (dolayısıyla Beethoven'ın tersten çalınmasının eşdeğerini elde edemeyiz). Kopyalama neredeyse makineli tüfek hızında ilerler: Omurgalı RNA polimerazı saniyede yaklaşık otuz baz kopyalar ve bir hücrenin bütün DNA malzemesini çoğaltmak yaklaşık yedi saat sürer. Yaklaşık olarak bir milyonda bir baz yanlış şekilde kopyalanır, fakat düzeltici enzimler görevlerini dikkatle yerine getirir ve hataların çoğu düzeltilerek yaklaşık 10 milyonda bazda bir hata görülür. Kopyalama bir "dur" dizisine ulaştığında RNA oluşturmayı bırakır ve DNA'dan uzağa taşınır, çekirdek zarının içindeki boşluklardan geçerek sitoplazmaya değerli bilgisini taşıya taşıya gider.

Sırada *ribozomlar* var (Şekil 2.13). Bu küçük kurnaz organeller (hücrenin belirli işlevlerde uzmanlaşmış bileşenleri) önce birbirinden ayrı damlalar olarak saklanan, ardından hücre çekirdeğinde ortaya çıkıp sitoplazmanın kimyasal açıdan tehlikeli

dünyasında beliriveren mRNA'ya bağlandıklarında tek bir işlevsel birimde birleşen protein ve RNA yığınlarıdır. Sitoplazmanın bu aşamada dikkat etmemiz gereken diğer bileşeni taşıyıcı RNA, proteinin asıl kuruluşunu sağlayan nükleik asittir. Şekil 2.14 bir tRNA molekülünün şeklini birkaç biçimde göstermektedir. İki önemli kısım vardır. *Antikodon* ilmeği mRNA'daki kodonu (dizgiyi) tanıyan kısımdır. Örneğin dizgi arjininin kodu CGU ise, bu durumda antikodon, hidrojen bağların uyararak ona cırt cırt gibi yapıştığı CGU dizgisini bulabilen tamamlayıcı dizilim CGA olacaktır. Diğer önemli kısım nükleik asit zincirinin sonundaki aminoasit *bağlanma alanı*'dır. Bu molekülün bir başka cırt cırt benzeyen kısmıdır ve sadece bir aminoasite, bu örnekte arjinine bağlanabilen bir nükleotit dizilimine sahiptir.

Şimdi bir ribozom mRNA'nın etrafına kenetlendiğinde sitoplazmada neler olduğunu aktarabiliriz. Ribozom ilk dizgiyle karşılaştığında duraksar, çeşitli tRNA molekülleri şansını dener, ama yanlış antikodon yapışır (Şekil 2.15). Ardından bağlanma alanına valin takılmış halde, GUU için bir antikodonu olan bir tRNA molekülü gelir. Bu gelen yapışır ve bu sayede ribozomun bir sonraki dizgiye, örnek itibarıyla AGC'ye tutunabilmesini sağlar. Bir süre sonra AGC için antikodona sahip bir tRNA yaklaşır; sitoplazmanın başka bir yerinde çarpışıp birleştiği bir serin molekülünü taşımaktadır. Antikodon dizgiye yapışır, kendi serin molekülünü valin molekülüne yaklaştırır. Bir enzim valini tRNA'sından kaydırarak çıkartır ve serin molekülüne bağlar, böylece dipeptit valin-serini oluşturur ve boşalan ilk baştaki tRNA ağır ağır sıvıda dolanarak bilinçsiz şekilde başka bir valin aramaya koyulur. Ardından ribozom bir sonraki dizgiye geçer ve süreç tekrarlanmaya başlar. Böylece ağır ağır protein zinciri büyür ve ilk başta çekirdekteki DNA'nın içinde yer alan bilgi işlevsel proteine dönüştürülür. Hayat devam eder.

Hikâyemizi şu şekilde özetleyebiliriz. Genetiğin *santral dogma'sı* bilgi ve faaliyet akışının DNA → RNA → protein şeklinde olmasıdır. Bilgi RNA'dan DNA'ya çok nadiren akar (ileride göreceğiz). Bir proteinin bir DNA molekülünü etkileme becerisine sahip olmaması, (1. Bölümde aktardığımız) Lamarkçı edinilen

ayırt edici özelliklerin kalıtımı yaklaşımının doğru olmamasıyla tutarlıdır.

DNA yapısının bilinmesinin ne kadar büyük önem taşıdığı görülmüş olmalı, ama yanıtlamamız gereken bir dizi soru daha var. Ben bir dizi soru diyorum ama aslında bunlar şu anda da çok geniş faaliyet alanları ve uçsuz bucaksız araştırma olanakları sunuyor.

İlk olarak meselenin 1. Bölümde ele aldığımız konuların moleküler temeliyle, evrimle bağlantısı var. DNA replikasyon ve transkripsiyon süreçleri hiçbir zaman mükemmel değildir: Nükleotit ve aminoasitler bile etrafta el yordamıyla dolanırken, şekle ve elektrik yükü tepki verip olabildiğince uyum sağlarlarken yanlışlıklar yapar, bazen yanlış pozisyona saplanıp yaptıkları hatadan çıkamaz, bir sonraki bağın gelmesi ya da oluşmasına kadar bulundukları konumda kalırlar. DNA bir sonraki nesli oluştururken yanlış ikileşebilir, mRNA molekülü DNA'yı okurken hata yapabilir, tRNA molekülü yanlış dizgiye bağlanabilir, hatta doğru bağlanmış bir tRNA yanlış aminoasite bile sebep olabilir. Fakat ilk söylenen hariç hepsi kısa sürelidir: Hücreyi etkiler, ama bir bütün olarak vücuda etki etmezler. Sadece *somatik mutasyon* adı verilen ilki tüm vücuda etkiler, çünkü organizmanın gelişiminin başındaki yanlış bir adım kopyalana kopyalana bütün vücuda yayılacaktır. Mayoz gerçekleşip gametler oluştuğunda mutasyona uğramış DNA germ hattına girer ve vücudun akıllıca uydurulmuş genişlemesi olan bir sonraki nesle devredilmeye hazır olur. Bu tür mutasyonlara *germ hattı mutasyonu* denir.

Birçok şey ters gidebileceği için replikasyonun tehlikeli bir iş olduğu açıktır. Aslında mutasyonlar sık gerçekleşmediği için oldukça kararlı bir süreç olduğundan emin olabiliriz, aksi halde var olmazdık. Bir gün elbette biz de (bizim türümüz) var olamayacağız. DNA'nın dayanıklılığının nedenlerinden biri her hücrenin mutasyonları fark edip düzeltecek gelişkin bir koruma ve onarma sistemi olmasıdır. Bir başka neden DNA'nın bolca çöple olmasıdır, laf olsun diye var olup hiçbir şeyi şifrelemeyen ("ifade edilmeyen") *intron* denen bölgeleri söz konusudur. DNA'nın ciddi bölgelerine, aktif şifreleme yapan bölgelerine ise *ekson* denir.

İntronlarda mutasyonlar olduğunda bunun organizma üzerinde etkisi olmaz, çünkü bu genetik malzeme protein olarak ifade edilmez. DNA'mızın önemli bir bölümü intron çöpüdür, çünkü doğa zarif ve ekonomik denilen ama aslında dağınık tarzıyla işe yaramıyor olsa da o çöprü atmaya zahmet etmez ve nesilden nesile sürüklemeye devam eder. Bu biraz gariptir, çünkü en değerli kaynağın, enerjinin hafıfsenmeyecek bir miktarının işe yaramazlığın sürdürülmesine ayrılması demektir. Belki de çöp bizim henüz fark etmediğimiz bir işleve sahiptir. Belki de kendisini asla açık faaliyette karşılaşılan tehlikelere maruz bırakmayan, bilginin nesilden nesile aktarılmasının güvenceye alınmasının en mükemmel yoludur. Çöp DNA amaçsızca var olma dışında bir amacı olmayan, saf, ölümsüz, ifade edilmeyen bilgidir. Bu amaçsız DNA son derece başarılıdır, zira taşıdığımız DNA'nın yaklaşık yüzde 98'i çöptür, proteinleri kodlama anlamında sadece yüzde ikisi faydalıdır.

Çok çeşitli DNA mutasyonları vardır. *Bazlarda yer değiştirme*, bir bazın yerine bir başkasının geçmesidir. Bazı yer değiştirmeler, mutant kodonun orijinaliyle aynı şekilde kodlanması, dolayısıyla ortaya çıkan proteinin etkilenmemesi anlamında sessiz değişimlerdir. Başka baz yer değiştirmeleri mesajı değiştirebilir ve etkinin şiddeti, ortaya çıkan değişmiş aminoasidin proteindeki orijinalinden ne kadar farklı olduğuna bağlıdır. *Eklenme mutasyonu* ya da *silinme mutasyonu*, baz çiftinin tümünün eklenmesi ya da silinmesidir: Bunlar DNA'nın yorumlanmasında bozukluk yaratabilir; çünkü . . . ATGGTCT . . . normalde . . . (ATG)(GTC)(T . . . şeklinde okunacağına, ikinci T'nin silinişiyle mesaj . . . (ATG)(GCT)(. . . olarak okunur ve o andan itibaren de protein tamamen farklı olabilir ve işlevsiz sanılabilir. Öte yandan bu belki de çitanın çenesini ya da geyiğin koku duyarlılığını kuvvetlendirebilir.

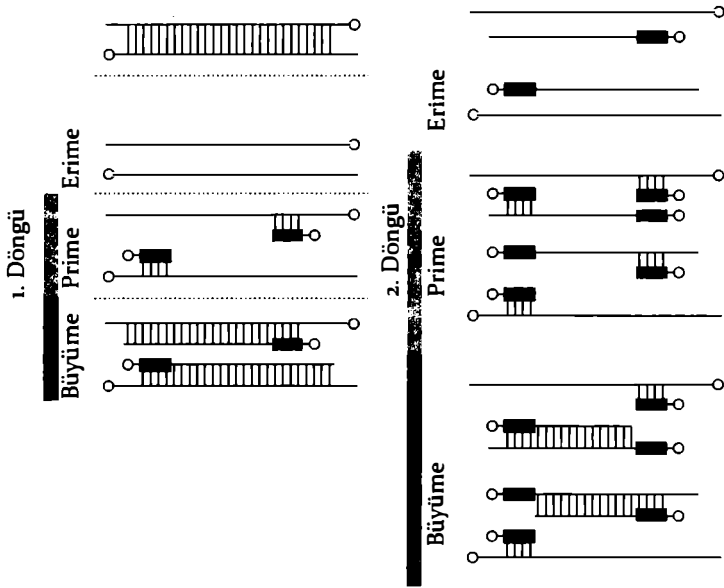
Mutasyonlar kendiliğinden ya da uyarılarak gerçekleşebilir. Kendiliğinden mutasyonlar sabit hızla gerçekleşir ve biyosfer içerisinde istikrarlı şekilde işleyen bir *moleküler genetik saat* oluşturur. Belirli bir gendeki mutasyon hızı hemen hemen hiç oynamaz, dolayısıyla iki tür arasındaki aminoasit farklılıklarının sayısına bakılarak ortak bir atadan ayrılarak uzaklaştıkları zamanı çıkartabiliriz. Evrimin kestirimci olduğuna dikkat çektiğimiz

1. Bölümde aklımızda olan bilgi türü buydu, zira bu bilgi türü şimdiye dek hiçbir örnekte tür dizilimi hakkındaki bilgimizle çelişmemektedir. Moleküler saat ayrıca kladistik soy grafiklerini (Şekil 1.2'deki gibi) zaman ölçeği ekleyerek nicelleştirmektedir. Mutasyonlar çevresel etmenlerce de uyarılabilir; nükleer ve morötesi ışınlama maruz kalma, sindirilen kimyasallar ve süperoksit radikal gibi (fazladan bir elektronu olan bir oksijen molekülü) öldürücü oksijen içeren türler tarafından oksidasyonun kontrol dışına çıkması: Uzun ömürlülük uğruna ve oksijen kullandığımız için ödediğimiz bedeller bunlar.

Santral dogma bilginin DNA'dan RNA yoluyla proteine akışını tanımlamasına karşın, bazı istisnalar olduğunu da belirtmiştik. *Retrovirüs*, kendi replikasyonu için konak görevi gören çift iplikli bir DNA molekülünden faydalanan tek iplikli bir RNA molekülü içermektedir. *Edinilmiş Bağışıklık Eksikliği Sendromu*'na (AIDS) sebep olan *İnsan Bağışıklık Yetmezliği Virüsü* (HIV) bir retrovirüstür: Bağışıklık sistemine saldırır ve vücudu enfeksiyonlara karşı korunmasız hale getirir. Bu virüs 1983 yılında Paris'te Pasteur Enstitüsünde Luc Montagnier, ABD'de Ulusal Kanser Enstitüsünde Robert Gallo ve San Francisco'da California Üniversitesinde Jay Levy tarafından izole edildi. HIV virüsü bir tür beyaz kan hücresi olan T-lenfositine bağlanır, RNA'sını ve *ters transkriptaz* enzimini transfer eder. Bu moleküller kromozomda DNA molekülünün yakınına ulaşır ve enzim, viral RNA'nın bir DNA versiyonunu ve bu yeni yapılan DNA'nın bir kopyasını sentezler. Bu aşamada viral RNA'nın çift iplikli bir DNA versiyonu vardır. Bu DNA konak DNA'sının içine katılır ve ardından viral mRNA hücrenin replikasyon mekanizmasını kullanarak bu DNA'dan sentezlenir. Böylece viral mRNA daha fazla virüs parçacığı oluşturmak için gerek duyulan proteinlerin yapılması için yorumlanmış olur. Ardından bu parçacıklar hücreden aldıklarını koruyucu zar olarak kullanarak gelişmeye başlar. Bu süreç lenfositin yüzeyini keser ve bir süre sonra onu öldürerek organizmanın başka enfeksiyonlara karşı bağışıklığını azaltır. Retrovirüslerin bazıları insanlarda da görülen çeşitli kanserlere neden olduğu da düşünülmektedir.

Restriksiyon enzimi çeşitli bakteri türleri tarafından üretilen ve bir DNA molekülündeki belirli bir nükleotit baz dizisini ta-

nıyarak o yerdeki DNA'yı kesen bir enzimdir. Bu yolla oluşturulan DNA parçaları *ligaz* denen enzimlerce bir araya getirilerek birleştirilebilir. İçerisinde büyüdükleri konak hücrede DNA'dan bağımsız olarak kopyalanabilen DNA parçalarına *vektör* denir; bakterilerde bulunan dairesel DNA molekülleri olan *plazmidler* de vektördür. DNA kesitlerinin içine giren vektör moleküllerine *rekombinant DNA* denir. Bu vektörler belirli bir DNA parçasının çok sayıda kopyasını oluşturarak orijinal malzemeyi çoğaltır ve büyük miktarlarda *DNA klonu* üretirler. Bu yolla oluşturulan topluluğun üyeleri, insülinin genetik mühendislik yoluyla üretimin-



Şekil 2.16 Bu grafik dizisi PCR tepkimesinin nasıl gerçekleştiğini göstermektedir. Sol üstte hedef DNA ikili sarmalı temsilen görüyoruz. Birinci adımda (daha alt sol) iplikler ayrılır ve her birine primerler bağlanır. Ardından enzimler her bir ipliğin sağladığı şablon üzerinde tamamlayıcı iplikler büyütür. İkili iplikler yeniden erir ve her birine primerler bağlanır. Enzimler yine daha önceki gibi ipliklerin tamamlayıcı versiyonlarını oluşturur, fakat şimdi iki primer arasında bulunan DNA kopyaları, hedef dizi karışımın içinde ve birkaç döngü sonra karşımıza çıkar.

de olduğu gibi hedeflenen ürünü oluşturabilir ya da gen terapi-
sindeki gibi orijinal organizmanın içine tekrar sokulabilir.

DNA'nın değıştirilmesinde daha yakın dönemde ortaya çı-
kan yöntemlerden biri de, yeni gen içeren genetik malzemenin
ince uçlu bir cam iğne kullanılarak alıcı hücrenin içine enjekte
edildiğı *mikroenjeksiyon* tekniğidir. Hücre kendisinin (ya da en
azından başka bir organizmanın kendiliğinden) bakımını üstle-
nir ve enjekte edilen genlerin konak hücrenin çekirdeğinin içine
getirilmesi ve orada tutularak birleştirilmesi için bir mekanizma
sağlar. Genler hücre zarında boşluklar oluşturma ve gelen genle-
rin hücre içerisine girmelerine izin verme yoluyla da birleştirile-
bilir. *Kimyasal porasyon*'da hücreler özel kimyasal çözeltilerinde
yıkılır; *elektroporasyon*'da hücreler zayıf bir elektrik akımına
tabî tutulur. Bu tekniklerin fazla rafine olduğunu düşünüyorsanız,
küçük metal kıymıkların genetik malzemeye kaplandıktan
sonra doğrudan hücrenin içerisine mermi misali sıkıldığı *biyolis-
tik* ya da *biyobalistik* denen işlemde faydalanabilirsiniz. India-
na Jones filmlerinden birinde geçen, karşısındaki adamın yaptığı
son derece havalı ve özenle çalışılmış geleneksel kılıç kullanma
hareketlerinin ardından Jones'un onu sıradan bir hamleyle ateş
ederek rahatça vurduğu sahne aklıma geldi.

Ateş etmekten bahsetmişken, DNA'yı anlamamanın bir başka
temel sonucu da *DNA testi*, daha resmi adıyla *DNA profillemesi*
ya da *DNA genetik parmak izlemesi* denen adli incelemedir. Bil-
diğimiz asıl parmak izi tespiti olan, parmak uçlarındaki derideki
çizgi örüntülerinin şüphelilerin kimliğinin belirlenmesinin aracı
olarak kullanılmasını öneren ve kısa süre sonra da buradaki bir
hırsızlık olayında masum bir şüpheliyi kurtararak asıl suçluyu
bulmakta kullanan kişi 1880 yılında Tokyo'da çalışan İskoçyalı
hekim Henry Faulds oldu. Bundan yüz yıl kadar sonra 1894'te
Leicester Üniversitesinde çalışan Alec Jeffries "DNA parmak izle-
mesini" keşfederek kişinin tespit yöntemini parmak uçlarından
vücudundaki tüm hücrelere doğru genişletmiş oldu. Kullanılan
teknğin iki özelliğini anlamamız gerekir: Birincisi çok küçük
DNA miktarlarının arttırılması; ikincisi de bildiğimiz parmak
izlemesi. DNA profillemeye adli tıp, babalık testi ve evrim çalış-
malarında o kadar önemli bir tekniktir ki sonraki yıllarda farklı

koşullarda çeşitli şekillerde uygulanarak çok büyük bir gelişme yaşamıştır. Biz burada çok kabataslak bir aktarımla yetiniyoruz.

Polimeraz zincirleme tepkimesi'nin (PCR) yaratıcısı Kary Mullis (d. 1944) bu fikrin aklına 1983 yılında Kaliforniya dağlarında ay ışığında araba sürerken geldiğini söylüyor; Nobel ödülü almanın en güzel yollarından biri bu olsa gerek. Polimeraz, hatırlayın, bir DNA ipliğini şablon olarak kullanarak kopyalamaya yardım eden bir enzimdir; aynı enzim *in vitro*⁹ kullanılabilir. Çalışması için enzim, bol bir nükleotit baz arzına ve iki *primer*'e ihtiyaç duyar (primerler, tepkimenin başlamasına yarayan yaklaşık yirmi nükleotitlik kısa dizilerdir). İlk önce karışımın ısıtılmasıyla DNA iplikleri birbirinden ayrılır (DNA "eritilir"), ardından çözelti soğutulur ve bu primerlerin DNA ipliğinin uygun parçalarına yapışmasını (primer moleküller kendi tamamlayıcılarını tam olarak buluncaya dek etrafta itişip dururlar, sonra da bağlanırlar) ve kopyalanacak olan molekülün bölgesinin sınırları şeklinde davranmalarını sağlar. Sonunda sıcaklık tekrar polimerazın etkin şekilde faaliyet gösterebileceği değere yükselir ve şablonun üzerinde tamamlayıcı bir iplik büyür. Enzim erime aşamasındaki yüksek sıcaklığa dayanmak zorunda olduğu için, *Thermus aquaticus* gibi kaplıcalarda bulunan bir bakteriden çıkartılır. Tüm bu döngü yaklaşık üç dakika sürer. Sonra sürekli tekrarlanır, otuz-kırk kere tekrarlanmasıyla primerler arasında yatan orijinal DNA'nın ipliğinin on milyonlarca kopyası üretilir (Şekil 2.16). Bu mikroskopik küçüklükte bile olsa hedeflenen DNA örneğinin kapladığı bölgenin büyütülerek araştırılabilmesi anlamına gelir.

Profilleme tekniğinde aslında genlerimizin *polimorfizm*'inden (çok biçimliliğinden), bireyler arasında DNA moleküllerinin çok büyük farklılıklar göstermesi olgusundan faydalanılır. Örneğin intronlarımızın çöp DNA'sı mayoz sırasında biriken anlaşılmaz uzun DNA dizileri içerebilir. Burada *değişken sayılı bitişik tekrarlar*'a (VNTR) odaklanırsınız; farklı bireylerin DNA'larında toplanmış ve aynı bölgede bulunan değişken sayıda . . . CGATCGATCGATCGAT . . . gibi. Bu bitişik tekrarlar bir intron bölgesinde olduğunda ifade edilmezler ve eksonlardaki kahverengi ya

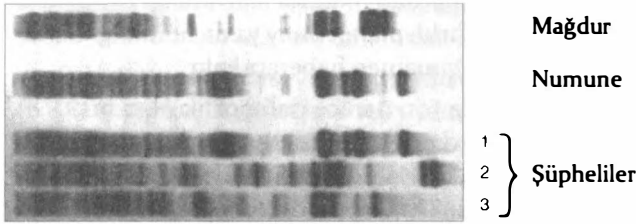
9 *In vitro*, biyoloji ve tıp alanlarında sık kullanılan ve "laboratuvar ortamında ya da yapay koşullarda" anlamını taşıyan bir terimdir -çn.

da mavi göz gibi varyasyonlardan (ikincisi kahverengi pigmentin yokluğunun sonucudur) farklı olarak birey ya da herhangi bir izleyici onların varlığından tamamen habersiz kalır.

Şimdi bireyler arasında son derece polimorfik olan bir DNA molekülünün bir parçasının büyütülmesi için PCR kullanmış olduğumuzu düşünelim. *Alul* gibi bir restriksiyon enziminin faaliyeti, onun AGCT dizisini bulana kadar itişip kakışması, ona kendisini tutturması, ardından molekülü parçalaması ya da *EcoRI* gibi GAATTC'ye rastladığında bağlanan ve o noktada kesilen bir faaliyet; büyütülen DNA bölgelerini bireydeki bitişik tekrar sayısına bağlı olarak farklı boyutlar alan bir dizi parçaya bölecektir. Numune bu durumda *elektroforez* adı verilen bir işlemle elektrik akımı uygulanarak bir jel aracılığıyla yönlendirilir. Çok küçük parçalar jelin içindeki çapraz bağlar ormanında büyük parçalardan daha rahat kıvrıldığı için numune biraz çubuk koda benzeyen kuşak dizilerine ayrılır (Şekil 2.17). Kuşak örüntüsü numunedeki bitişik tekrarlar tayfını, dolayısıyla bireyin ayırt edici özelliklerini resmektedir.

Bu yolla ya da bu yolun daha inceltilmiş biçimleriyle tecavüz-cüler suçlu bulunmuş, masumlar saliverilmiş, çarların kimliği belirlenmiş, Anastasia soyundan gelenler açığa çıkarılmış, evrimsel ilişkiler tespit edilmiş, hırsızlar tek bir saçtan yakayı ele vermiş, çocuklar ailelerine kavuşmuş (bütün ailelerin acımasızca parçalanıp dağıtıldığı Arjantin'deki gibi) ve baba olmadığını iddia eden adamlara açılan velayet davaları çözüme kavuşturulmuştur. Moleküler alanda görülen pek az ilerleme (penisilinin geliştirilmesi ve doğum kontrol hapi da aynı sınıfta yer alır) toplum üzerinde böylesi bir doğrudan etkiye sebep olmuştur.

20. yüzyılın en tutkulu projelerinden biri, insan genomundaki nükleotit dizilerinin hepsinin tespit edilmesi idi. Hedef, elbette, doğası gereği olanaksızdır, çünkü şimdiye dek yaşamış olan herkes (ayrırımsız ikizler hariç) farklı bir genoma sahiptir. Fakat eksonların kompozisyonlarının farklılıkları oldukça sabittir ve "tipik bir genom" mantıklı bir kavramdır: Bireyler arası baz



Şekil 2.17 Bir mağdurun, numunenin ve üç şüphelinin DNA izleri. Profiller net şekilde 1. şüphelinin suçlu olduğunu gösteriyor.

farkı yaklaşık olarak binde birdir, dolayısıyla bireyler arasında çoğu önemsiz olmak üzere yaklaşık 3 milyon harf farkı vardır. Belki de günün birinde her birimiz kendi genomumuzu kopyalayabilecek ve bunu hekimlerimize (ve belki de sigorta şirketlerimize) götürebileceğiz ve bir bebeğin genomu doğumda belirlenebilecek: İçindeki bilgi bir DVD'ye sığabilecek ve ömür boyu korunabilecek.

İnsan genomunun boyutlarını düşünerek önümüze koyduğumuz hedefin büyüklüğünü anlayabiliriz. Genomunuzda yaklaşık 3 milyar nükleotit baz var. Bu kitap yaklaşık 1 milyon harf içeriyor, bu durumda sizin genomunuz yaklaşık olarak 3000 kitaplık bir kütüphaneye denk geliyor. Sizin gerçekten çok zeki bir kimyacı olduğunuzu varsayalım, bilinen laboratuvar tekniklerini kullanarak çeşitli tepkimeler gerçekleştirme yoluyla saptamalar yaptığınızı ve bazların sıralarını saatte bir hızla tespit edebildiğinizi kabul edelim. Üç milyar saatlik çalışma 34.000 yıl eder. Bu saçma uzunluktaki zaman yerine hedefinize on yılda ulaşabilmeniz için 3400 kat daha hızlı çalışmanız gerekir ve DNA dizilimini oluşturmak için saniyede bir baz hızla günde yirmi dört saat, haftada yedi gün çalışmanız şarttır. Diziden emin olmak için çalışmanızı birkaç kez tekrarlamanız gerekir. Diziden on kez tekrarladığınızda emin oluyorsanız, dizilemeyi saniyede on baz hızla yapmanız gerekir.

İnanılmaz ama bu başarıldı. Genetikteki önceki iki dev adım olan Mendel'in kalıtımı nicelleştirmesi ve Watson-Crick'in DNA modeli gibi İnsan Genom Projesi de öncelik ve doğruluk müca-

deleleri yaşadı. Genom savaşlarının ayrıntılarına, bu ayrıntılar çalışmaya önderlik eden enerjik Craig Venter (d. 1946) ve insancıl John Sulston (d. 1942) tarafından (diğer aktörler Frank Collins ve Eric Lander de unutulmamalı) başka yerde geniş geniş anlatıldığı için burada girmeyeceğiz, ama konunun en canlandırıcı iksir olan, özel şirketlerin kâr amacı için insan genomu alanındaki bilgilerin paylaşılmamasının ahlâkîliği çevresinde döndüğü bilinmelidir. Patlayan kavga insanlık tarihinde başarının doruğu olması gereken anı mahvetti, ama hayat ve özelde de onun genomu böyle işte. Birkaç yıl sonra düşman taraflar Fransa-Prusya Savaşı ne kadar hatırlanıyorsa o kadar hatırlanacak ve başarıya giden yolda kullanılan araçları hatırlamasak da, başarıyı hatırlayacağız.

İzlenen kritik yöntem, her bir kromozomdaki her bir DNA ipliğinin içindeki her bir nükleotit bazının dizilimini tespit etmektir. İşlem Frederick Sanger'in çalışmasına dayalıydı; Sanger bir proteini başarıyla diziledikten sonra dikkatini DNA'ya yöneltmiş ve 1977 yılında ϕ X174 virüsünün toplam 5375 bazının hepsini dizilemişti. İzlediği yolu aktaralım. Sanger ilk olarak yeni bir DNA tamamlayıcı ipliğini tek iplikli bir şablona son harf radyoaktif bir etiket (bir atomun yerini bir radyoaktif izotopun aldığı molekül) taşıyacak şekilde sentezledi. Bunu başarmak için normal enzim ve nükleotit karışımına dideoksinükleotit denen modifiye bir nükleotit çeşidi ekledi. Bu modifiye nükleotit, katıldığında kopyalamayı durdurur ve o bazda sonlanan bir DNA ipliğine sebep olur. Ardından prosedürü alfabenin diğer üç harfi için olan dideoksinükleotitlerle tekrarladı. İplikler şablon molekülde farklı noktalarda sonlandıkları için her bir deneme farklı uzunlukta bir DNA molekülü sonucunu verdi. Karışım, bir jel oluşturan moleküllerin dolanık çalılıklarından sürüklenerek çekildiğinde farklı uzunlukta moleküller etrafa saçılır ve X-ışını filminde farklı benekler şeklinde gözükür. Otomatik dizileme makinelerinde kullanılan modifikasyon, lazer ışığıyla aydınlatıldığında farklı renklerde floresan yayan etiketler kullanmaktır, böylece A kırmızı olarak, C yeşil olarak vs gözükür.

İkinci önemli adım bu işlemin saatte binlerce bazı tespit edebilen bir seri üretim hattı temeline oturtulmasıdır. İki ana

yaklaşım vardır. Biri bilinen DNA iplikleri üzerinde sırayla çalışmaktır. Diğeri, “saçma yaklaşımı” ise DNA’yı on binlerce parçaya bölme ve ardından bu karmaşayı dizilemektir. İkincisindeki zorluk DNA dizisini bu parçaları birleştirerek tekrar toplamaktır. Süper bilgisayarlar işte bu tekrar toplama işinde asıl rolü oynarlar. Genel olarak ifade edersek, düzenli yaklaşım daha yanlışsız, ama saçma yaklaşımı daha hızlıdır. Pratikte ikisinden de faydalanılır.

İnsan genomunun ilk taslağı 2001 yılında, DNA’nın yapısının belirlenmesinden yaklaşık elli yıl sonra ve Mendel’in çalışmasının kabul görmesi ve genetiğin başlamasından da yaklaşık yüz yıl sonra açıklandı. İnsan genomunun bilinmesinin yaratacağı sonuçlar hem iyi hem de kötü yönde hesaplanabilir nitelikte değil. Bilimde her zaman karşılaştığımız gibi bilgi, melekleri de memnun edebilir, şeytanları da. En azından şimdi yıldızlar arası uza-ya gönderdiğimiz uzay aracına kendi tarifimizi yapıştırabiliriz, böylece tüm fiziksel varlığımız evrenden silinse bile insanların yeniden yaratılabilmesi için bir şansımız olur belki de. En iyimser görüşle de, şu anki dünyamızdaki akrabalarımızın farkına varır ve büyük amaçlarımızı genlerimizdeki birkaç harf farkından çıkan küçük hırgürlere kurban etmeyiz.

3 ENERJİ

HESAPLANABİLİRLİĞİN EVRENSELLEŞMESİ



Enerji ebedi hazdır.

WILLIAM BLAKE

Güneşten gelen enerji olmasaydı, ne inorganik Dünya'dan doğan titreşimli biyosfer ne de şimdi onu sürdüren ve çoğaltan moleküler faaliyet olurdu. Peki bu enerji denen şey nedir? Kelime herkesin ağzında olabilir, bir bilim insanıysa onu evreni anlaşılabilir canlı bir bütüne bağlayan şey olarak görebilir; iyi ama aslında enerji nedir?

Şairler o benzersiz yetenekleriyle enerji kavramını, konu bilimcilerin dikkatini çekmeden çok önce kullanmışlar. Sir Philip Sidney 1581 yılında *The Defence of Poesie*'de (Şiirin Savunusu) "yazarın o etkili gücü ya da (Yunanların ifadesiyle) *Energie*"sine dikkat çekmiş. Aklında sonradan onu öldürecek olan misket mermisinin hareket özelliği değil, ifade kuvveti varmış. Yunanlar buna bire bir çevirisi "çalışmada" olan *ἐνέργεια* derdi ve buradan edebi etkiye uzanan etimolojik yolu hissedebiliyoruz. Bugün halk enerji kelimesini bağrına basmış ve ne olduğunu kesin olarak bildiğine inanmış durumda, onu pahalı buluyor, modern

dünyaya yaptığı önemli katkıyı hissediyor ve ulaşılabilir olmama olasılığından korkuyor.

Enerji edebi söylemde hâlâ yer buluyor, ama bilimde yeni, zengin ve çerçevesi kesin olarak çizilmiş yeni bir hayata başlamış durumda. Bu hep böyle değildi. 1807 yılına, Büyük Britanya Kraliyet Kurumu adlı bilimsel dorukta doğa felsefesi profesörü olarak çalışan ve sonra zamanının hayran olunacak bilgi birikimiyle Rosetta Taşı'nın deşifre edilmesine katkıda bulunan Thomas Young'ın (1773-1829) "enerji terimi bir cismin kütlesi ile hızını gösteren sayının karesinin çarpımına büyük yerindelikle uygulanabilir" diye yazarak kavramı bilime taşımaya dek kavramın bilimsel kullanımının izini sürebiliriz. Birçok öncüde görüldüğü gibi Young'ın iddia ettiği "büyük yerindelik" de tam pişmemiş bir düşünceydi ve pişirilmesi için biraz çalışmamız gerekecek. Bu çalışma sırasında enerjinin modern yorumlanışını anlayacak ve korunumunun taşıdığı önemi göreceğiz.

Enerjinin doğasını anlamak için dünyadaki olay ve süreçlerle ilgili çok önemli iki özelliği anlamamız gerekir. Bunlardan biri uzaydaki cisimlerin hareketi, diğeri ısıнын doğasıdır. Uzayda hareketin tanımlanması esasen 17. yüzyılın sonunda tamamlanmıştı. Isının doğasını kavramaksa çok uzun bir zaman ve mücadele gerektirdi. 19. yüzyılın ortalarına dek de başarısız kaldı. Hareket ve ısı anlaşıldıktan sonra bilimciler olayların doğasını çözmüş olduklar ya da o sırada çözdüklerini düşündüler.

Yunanlar cisimlerin hareketi konusuna gereksiz yere eğildiler ve dünyanın kafasını iki bin yıl boyunca karıştırmış oldular: Onların oturdukları koltuktan yaptığı sorgulama tarzı matematik ve etiğe daha uygundu, fiziğe değil. Bu yüzden Aristoteles (MÖ 384 – MÖ 322) okun uçmasını arkasındaki havada oluşan girdapların faaliyetine borçlu olduğunu düşündü ve bu nedenle okun vakumda (boşlukta) hemen durmak zorunda olduğu sonucuna vardı. Genellikle yaşandığı gibi bilim genel kabul gören görüşü

1 Londra'da Kraliyet Kurumu'nda verdiği doğa felsefesi dersleri (1801-1803) *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts* (1807) adıyla yayımlanmıştır.

tepetaklak etti ve şimdi bunun tam tersinin doğru olduğunu biliyoruz: Bir ok havanın direnci tarafından yavaşlatılır, ittirilmez. O hantal zamanlarda karşı koyan bir kuvvete gereksinim duyulduğunun kanıtları da boldu, çünkü öküzler gıcırdayan tahta arabaları hareket halinde tutmak için çabalamak zorunda kalıyorlardı: Aksini düşünmek ne kadar saçmaydı, zira aksi halde çiftçilerin doğal hareketini sürdürmesi için öküzleri hareket eden bir arabanın arkasına sürmeleri gerekirdi! Havada uçan oklar ve taşlar daha problemliydi, çünkü bu kez işin içine karışan öküzler de gözüküyordu. Aristoteles'in o müthiş bereketli akli havadaki burgaçların oku ileri götürdüğünü gördü ve teorisini bu yolla kurtardı.

Aristoteles olayların nedeni ve cisimlerin hareketi konusunda başka genel sabuklamalara da sahipti.² Pratik olarak bakıldığında aslında sabuklamaları oldukça mantıklıydı ve hiç durmadan açıklama araması ve doğayı sıkıştırarak yanıtlar bulma çabası hayranlık vericiydi. Fakat tümünden yanlış olmasının yanında, görüşleri bugün açıklayıcı güç dediğimiz şeyden yoksundu ve niceleştirelmeye tamamen elverişsizdi. Usunda canlandırdıkları arasında örneğin bir dizi merkezdeş küre vardı; merkezdeki küresel Dünya'nın çevresinde sırayla su küresi, hava küresi ve ateş küresi vardı ve hepsi göklerin kristal küreleri içerisinde yer alıyordu. Onun ortaya attığı modelde madde doğal yerine ulaşmaya çalışıyordu, dolayısıyla dünyevi cisimler ilk başta yukarıya doğru savrulduktan sonra Dünya'ya doğru düşüyor ve ateşten alevlerse yukarıya doğru uçarak doğal yerlerine ulaşmaya çalışıyordu. Şu anki bakış açımızla böyle bir modelde boşluklar bulmak kolaydır, ama insanların zihninde iki bin yıl boyunca egemen olmuştur, bunun nedeni belki insanların kendi gözlemlerine dayanmak yerine otoriter öğretimi kabul etmenin boyunduruğu altında olmaları, belki de otoritenin karşısına gözlemi koymak için gereksinim duyulan soru sorma pratiği için gereken cesarete sahip olmamalarıdır.

Galileo'nun bu hikâyeye en önemli katkısı otoritenin körleştiriciliğini bir kenara bırakması ve gözlerini gözleme açarak

2 Bu kitabı iki bin yıl sonra okuyacak okurların da bizim sabuklamalarımızı aynı acayıplikte bulacaklarına kuşku yok; ama en azından bunlar Aristoteles'inkilerden daha ikna edici.

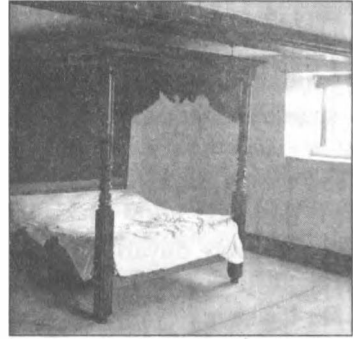
Aristoteles'in olayları açıklayışının yanlış olduğunu *deneyssel olarak* kanıtlamasıdır. Galileo bir cismin etkilendiği bir kuvvet olmadığında kendi hareket durumunu koruduğunu ileri sürdü. Bu sonuca eğik bir düzlemde aşağıya doğru yuvarlanan, ardından da ona eş bir başka düzlemde yukarıya çıkan bir topu düşünerek ulaştı; ikinci düzlemin açısı ne olursa olsun top aynı yüksekliğe çıkıyordu. İkinci düzlem yatay hale getirilirse topun sonsuza dek yuvarlanacağı, zira başlangıçtaki yüksekliğine asla ulaşamayacağı sonucuna vardı. Eğimli bir düzlemin hesaba katılması dahiya-ne bir fikirdi, çünkü süreçleri (cisimlerin düşüşünü) niceliksel ve kesin olarak üzerinde çalışılabilecek noktaya dek yavaşlatmıştı ve bu sayede kanı yerini gözleme bırakmıştı.

Galileo'nun ulaştığı sonuç bir deneyin ana hatlarını gölgeleyen işe karışan etmenlerin göz ardı edilmesi demek olan idealizasyonun ve Önsözde bahsettiğim soyutlamanın gücünü vurguladığı için bilimde çok büyük bir dönüm noktasıydı. Elbette Galileo hiçbir zaman topun sonsuza dek yuvarlanacağını *açık şekilde* ispatlamamıştır ve bu tür bütün deneylerde gerçek bir top aslında çok açık bir kesinlikle Aristotelesçi tarzda er veya geç duracaktır. Fakat Galileo bir yanda davranışın *özel* bileşenlerinin, diğer yanda dıştan gelen etkilerin olduğunu bilince çıkarmıştı. İkincisi sürtünmeye ve hava direncini kapsıyordu: Bunların azaltılmasıyla (örneğin topun ve düzlemlerin yüzeylerinin pürüzlerinin giderilmesi) ideale doğru, özel davranışın ortaya çıkarılmasına doğru ilerleyebilirdi. Aristoteles'in öküzlerin ağır arabaları çamurun içinde çeke çeke yürüttüğü dünya deneyiminde dıştan gelen etkiler arabanın özel davranışına tamamen baskın çıkıyordu.

Galileo'nun meşalesini Newton devraldı. Isaac Newton (1642-1727)³ eski takvime göre Galileo'nun öldüğü yıl doğdu (Şekil 3.1), dolayısıyla romantizme meyilli ruh göçü sevdalıları burada özel bir ruhun bir başkasına geçişini görebilir. Galileo'nun aksine Newton herkesin dediğine göre son derece kavgacı ve aksi bir adam olsa da tüm zamanların en büyük bilim insanlarından biriydi. Neredeyse tek başına matematiğin fizikle ilişkisini kurdu ve böylece modern nicelikselleşmiş fizik bilimine giden yolu açtı. Fazlasını da yaptı: İlerlediği yolda kendisine gereken matematiği

3 Newton hakkında aradığınız bütün bilgiler için bkz. <http://www.newton.cam.ac.uk/newton.html>

Şekil 3.1 Newton ve modern fizik 1642 yılının Noel günü sabahında bu odada doğdu. Mobilyalar orijinal değildir.



icat etti ve 1687'de yayımlanan *Principia*'sı⁴ [*İlkeler*] insanın anlama yetisinin gözlemin rasyonalizasyonuna uygulanışının sahip olduğu gücün görkemli abidesi oldu.

9. Bölümde ele alacağımız Eukleides'in geometriyi formülleştirdiği beş aksiyomu uzayın yapısını özetler, böylece bunlar sayesinde nerede olduğumuzu biliriz. Newton'ın üç yasası o uzayın içerisindeki hareketi özetler, böylece bunlar sayesinde nereye gittiğimizi biliriz. Hafif basitleştirilmiş biçimiyle bunları aktaralım:

1. *Bir cisim bir kuvvete maruz kalmadıkça düz bir hat üzerinde özdeş hareket durumunu sürdürür.*
2. *Cismin ivmesi uygulanan kuvvetle orantılıdır.*
3. *Her etkiye karşı gelen eşit ve zıt bir tepki vardır.*

Newton'un yasalarına dayalı olarak hareketin betimlenmesine verilen isimle, *klasik mekaniğin* devasa yapısının tümü ve parçacıkların, topların, gezegenlerin (ve bu aralar) uyduların ve uzay gemilerinin hareketinin anlaşılması ve tahmininin hepsi bu üç basit önermeden çıkar.

Newton'ın ilk yasası Galileo'nun Aristotelesçilik karşıtı gözleminin bir başka teyididir sadece ve yer yer *atalet* (*eylemsizlik*) yasası olarak adlandırılır. İkinci yasası genel olarak üç yasa içinde en verimli olarak değerlendirilir, çünkü bir kuvvet etki ettiğinde bir parçacığın bir bölgeden geçerken izlediği yolu he-

4 Tam adıyla *Philosophiae naturalis principia mathematica* ya da *Mathematical principles of natural philosophy* [Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri].

saplamamıza olanak verir. Arkadan bir kuvvet ittirdiğinde aynı yönde daha hızlı gideriz; önden ittirdiğinde yavaşlarız. Kuvvet yandan ittiriyorsa, yönümüz bizi zorladığı yöne doğru sapar. Yasa şu şekilde ifade edilir:

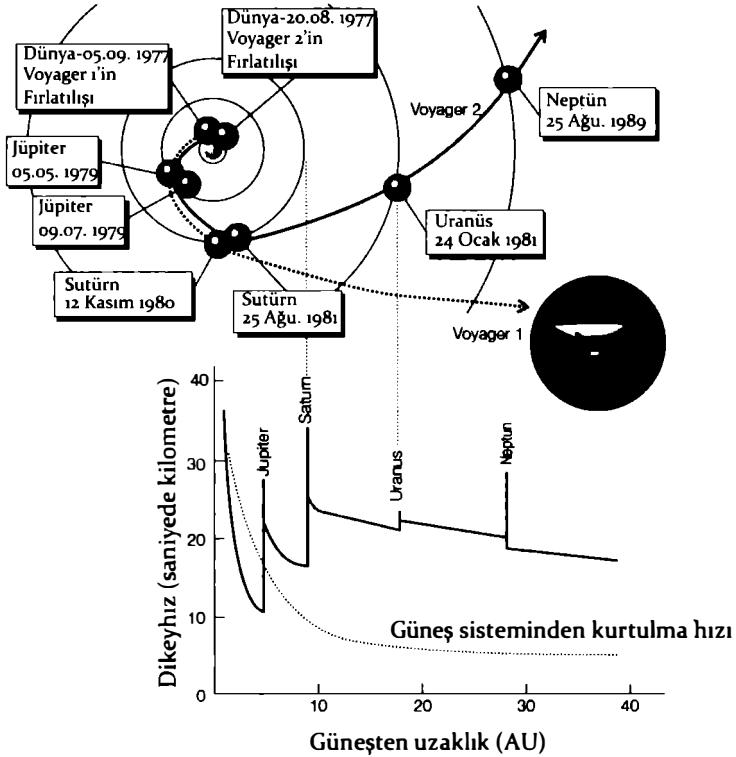
$$Kuvvet = k\ddot{u}tle \times ivme$$

Buradaki k\ddot{u}tle (daha net ifadesiyle *eylemsiz k\ddot{u}tle*) parçacığın kuvvete duyarlılığının ölçüsüdür. Kuvvet sabit tutulduğunda, k\ddot{u}tle küçükse ivme büyüktür, k\ddot{u}tle büyükse ivme küçüktür. Bir başka ifadeyle yüksek eylemsiz k\ddot{u}tle düşük duyarlılığa işaret eder, tersi de doğrudur. Keskin bir göz bu yasada bir totoloji sapar, çünkü k\ddot{u}tleyi kuvvet cinsinden ve kuvveti k\ddot{u}tle cinsinden tanımlamaktadır.

İvme hızın değişimi olduğu için, Newton'ın ikinci yasasının içerisinde gömülü olan bir başka şeyin, verili bir kuvvete, yerden yere değişebilen ve farklı zamanlarda farklı değerler alabilen bir kuvvete maruz kalan bir parçacığın izleyeceği yolu öngörmenin yolunu bizlere sunduğunu fark edebilirsiniz. "Gömülü" burada doğru sözcüktür, çünkü yolların hesaplanması cebirden ziyade mezardan çıkarmaya daha yakın, ustalık ve dikkat isteyen bir işlemdir. Buna rağmen bazı basit durumlarda, ikili yıldızlardaki ve hatta gezegenler arası etkileşimler dikkate alındığında kendi güneşimizin etrafındakiler gibi karmaşık kuvvet alanlarında bilgisayar kullanılarak üstesinden gelinebilir (Şekil 3.2). Kısacası bir parçacığın (hatta bir grup parçacığın) verili bir zamanda nerede olduğunu bilmemiz şartıyla ikinci yasayı gerçek anlamıyla kullanabilir, ardından ilkesel anlamda nerede bulabileceğimizi ve ileride bir zamanda nerede olacağını tahmin edebiliriz. Bu tür yörüngelerin kesin şekilde öngörülebilmesi klasik mekaniğin zaferlerinden biri olmuştur.

Newton'ın üçüncü yasası görüldüğünden daha derindir. İlk bakışta sadece bir sopa bir topa kuvvet uygularsa, top da sopya eşit ve zıt bir kuvvet uygular fikrini vurguluyor gibi görünür. Gerçekten bir topa bir beyzbol sopasıyla ya da ayağımızla vurduğumuzda uygulanan kuvveti biz de hissedebiliriz. Fakat üçüncü yasanın asıl önemi bir "korunum" yasasına işaret etmesidir. Korunum bu bölümün esas konusu zaten, bu yüzden dikkatimizi

Şekil 3.2 Uzay araçlarının izlediği yörünge yolları Newton mekaniği kullanılarak hesaplanır. Uzay araçları gezegenlerin etkilerine maruz kaldığı için hesaplamalar karmaşıktır. Üstteki çizim 1977'de fırlatılarak yolculuklarına başlamış ve o günden beri işlevlerini sürdüren Voyager 1 ve Voyager 2'nin izlediği yolları gösteriyor. Şu an evrendeki insan yapımı en uzaktaki cisim olan Voyager 1 güneş sistemi dışına doğru yılda yaklaşık 3,6 AU hızla (1 AU, bir astronomik birim Dünya'nın Güneş'in etrafındaki yörüngesinin ortalama yarıçapıdır ve yaklaşık 150 milyon kilometreye karşılık gelir) gezegen yörüngeleri düzleminin 35 derece dışında ilerlemektedir. Voyager 2 de yine güneş sisteminin dışına doğru yılda yaklaşık 3,3 AU hızla, ters yönde düzlemin 48 derece dışında ilerlemektedir. Altta çizim uzay araçlarının yanlarından geçtikleri gezegenlerce savrulularak eriştikleri hız artışlarını gösteriyor. Kütleçekimin yardımıyla gerçekleşen bu hız artışları, araçların hedeflerine ulaşmaları için gereken hıza ulaşarak güneş sisteminin dışına çıkmalarını sağlamaktadır.



yönelteceğimiz asıl yer de bu. Ama önce ilgili kavramları açmamız gerekiyor.

Bir *korunum yasası* bir şeyin değişmediğini söyleyen bir ifadedir. Bu size bilimde olabilecek en sıkıcı yorum türü olarak gözükebilir. Aslında bu en derin ve en önemli bilim yasası türüdür, çünkü sistemlerin simetrisi (esasen şekli) ve hatta uzay ve zamanın simetrilerinin iç yüzünü anlamamıza olanak sağlar. Newton'ın üçüncü yasasının işaret ettiği korunum yasası, *doğrusal momentumun korunması*'dır. Klasik mekanikte bir parçacığın *doğrusal momentumu* kütlesiyle hızının çarpımıdır:

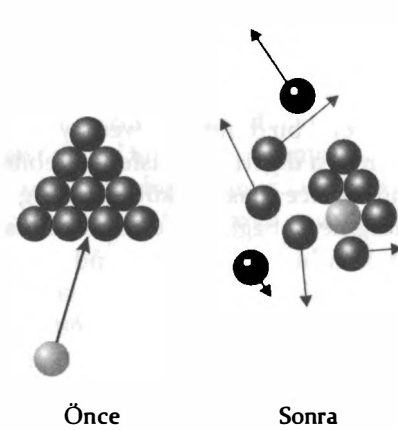
$$\text{Doğrusal momentum} = \text{kütle} \times \text{hız}$$

Bu tanım hızla hareket eden bir güllenin yüksek bir momentumu, yavaş hareket eden bir pinpon topunun düşük momentumu olduğu anlamına gelir. Doğrusal momentum, hareket eden bir cismin bir nesneye çarptığında yarattığı etkinin kuvvetinin göstergesidir; bir güllenin etkisinin masa tenisi topunun etkisiyle karşılaştırılmasıyla gösterilen bir farktır. Doğrusal momentumun korunması yasası bir parçacık yığının toplam doğrusal momentumunun dışarıdan uygulanan herhangi bir kuvvet olmadıkça değişmediğini söyler. Dolayısıyla örneğin iki bilardo topu çarpıştığında bunların çarpışmadan sonraki toplam doğrusal momentumu öncesiyle aynıdır. Bu ifadeyi kavramak için "doğrusal momentum"un anlamını tam olarak açmamız gerekiyor.

Momentum, aynı kütlede aynı hızla ama farklı yönlerde hareket eden iki parçacığın farklı momentumlara sahip olmaları anlamında yönlü bir niceliktir. Birbirine doğru aynı hızla hareket eden iki bilardo topu eşit ama zıt doğrusal momentumlara sahiptir ve toplam doğrusal momentum sıfırdır. Kafa kafaya çarpışıp durduklarında her birinin doğrusal momentumu aniden sıfır olur ve çarpışmadan sonraki toplam da yine sıfırdır. Bu örnekte parçacıkların bireysel momentumları değişmesine rağmen toplam doğrusal momentumun korunduğunu görüyoruz. Bu vargı tamamıyla geneldir: İlk başta parçacıkların bireysel doğrusal momentumları ne olursa olsun, bu momentumların toplamı

(momentumların büyüklükleri yanında yönlerinin farklı olmasına izin verdiğimizde) bu parçacıklar etkileştikten sonra eskisiyle aynı olacaktır (Şekil 3.3). Bıardo hemen hemen tümüyle doğrusal momentumun korunumu ilkesine dayalı bir oyundur: Toplarla bantlar ya da topların kendi arasındaki çarpışmaların her biri yasayla uyumludur ve masada ilk baştaki hedef açığı bağı olarak farklı yollara sebep olur.

Şimdi bıardo salonundan evrene dev ama kontrollü bir sıçrama gerçekleştirebiliriz. Eğlenceli tarafı şu ki doğrusal momentum bütün süreçlerde korunduğu için evrende sabit miktarda bir doğrusal momentum olmak zorunda. Bu yüzden arabanızla yolculuk ederken süratlendikçe momentum kazanıyor olsanız da, bir virajı alırken momentumunuzun yönü değişse de, bir şekilde bir yerlerde bir şeyler momentumu azaltıyor ve böylece evrendeki toplam momentum değişmiyor. Aslında araba sürerken Dünya'yı biraz zıt yönde ittiriyorsunuz: Bir yönde giderseniz Dünya'yı yörünge hareketinde hızlandırıyor, zıt yönde gittiğinizde yavaşlatıyorsunuz. Dünya'nın kütlesi sizin arabanızın kütlesiyle karşılaştırıldığında o kadar büyük ki elbette siz ne kadar lastik



Şekil 3.3 Çarpışmalar ve genel olarak etkileşimler doğrusal momentumu muhafaza eder, bunun sonucunda bir çarpışmadan sonraki toplam doğrusal momentum ilk başlangıçtaki toplam doğrusal momentumla aynı olur. Burada bir topun bir grup topa çarpmasını görüyoruz. Beyaz topun doğrusal momentumu soldaki okun uzunluğu ve yönüyle gösteriliyor. Doğrusal momentum "kırmızı" topların altına taşınıyor, onların bireysel momen-

tumları da sağdaki okların uzunluk ve yönleriyle gösterilmiş. Bu okları arka arkaya yönlendirmelerini değiştirmeden koyarsanız, toplamlarının ilk baştaki okun uzunluk ve yönünü verdiğini görürsünüz.

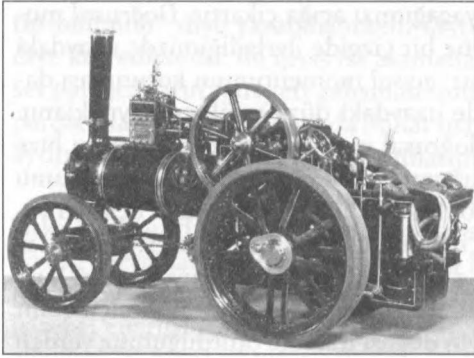
yakarsanız yakın etki toplamda saptanamaz düzeyde. Ama yine de var işte.

Bir korunum yasasının bir şeylerin simetrisinin sonucu (ya da işareti) olduğunu söylemiştim. Bu örnekte bir şeyler uzayın kendisi, dolayısıyla uzayın simetrisi nihayetinde doğrusal momentum korunumundan sorumlu. *Uzayın simetrisi, uzayın şekli*: Bu ne demek olabilir? Bu örnekte bu uzayın yumrulu olmadığı anlamına geliyor. Boş uzayda doğrusal bir hatta hareket ederseniz, uzay tamamen aynı kalır: Her yer düz ve değişmezdir. Momentumun korunumu uzayın yumrulu olmadığına işaret eder işte ve Newton'ın üçüncü yasası bunu "yüksek düzeyde" söylemenin bir biçimidir.

Newton'ın üçüncü yasasının başka bir sonucu daha, başka bir korunum yasası ve uzayın şekline ilişkin işaret ettiği başka bir yön daha var. *Doğrusal momentumu*, doğrusal bir hatta ilerleyen bir parçacığın momentumunu ele aldık. Bir de *açısal momentum* dediğimiz daire şeklinde ilerleyen bir parçacığın momentumu var. Hızla dönen ağır bir volan çok büyük bir açısal momentuma, yavaşça dönen bir bisiklet tekerleğiye düşük bir açısal momentuma sahiptir.

Eğer bir cisim bir başka cisme *tork*, bir dönme kuvveti uyguluyorsa açısal momentum bu cisimden diğerine transfer edilebilir ve ikinci cismin torka duyarlılığı sadece o cismin kütlesine değil, o kütlenin nasıl dağılım gösterdiğine de bağlıdır. Örneğin kütlesi kenarlarında toplanmış olduğunda bir tekerleği hızlandırmak, aynı kütlenin aksın yakınında yoğunlaşmış olduğu zamandan daha zordur. Volanlarda çeliğin kenara yakın yerlerde yoğunlaşması bundandır (Şekil 3.4), dağılım açısal hızda değişimleri sonlandırmada başarılıdır: Metalin aksa yakın olması daha az etkili, dolayısıyla savurgancadır.

Açısal momentumun korunmasının şartı sisteme dışarıdan herhangi bir tork uygulanmamasıdır. Dönen iki bilyardo topunun falsolu bir vuruşla çarpıştıklarını düşünelim, bu durumda açısal momentum birinden diğerine aktarılırken, birinin dönmesi de



Şekil 3.4 Volanda aks-
larından büyük bir
uzaklıkta büyük bir
kütlenin yoğunlaşmış
olduğu görülür. Böy-
le bir tekerleğin açı-
sal momentumunun
değiştirilmesi için
büyük bir tork (dön-
me kuvveti) gerekir.
Resimdeki buharlı
lokomobil modelinde
volan (tekerleklerden
en üstteki) pistonun
düzgün hareketini
korumaya yardımcı
olmaktadır.

diğerine aktarılabilir. Yine de çarpışmadan sonraki açısal momentumların toplamı başlangıçtakiyle aynıdır: Açısal momentum korunmuştur. Aynısı genel olarak geçerlidir: Etkileşime giren bir parçacıklar yığınının toplam açısal momentumu yaratılamaz ve yok edilemez. Dönen bilyardo topu sürtünmeyle yavaşlasa bile açısal momentum kaybolmaz: Dünya'ya aktarılır. Bunun sonucunda Dünya biraz daha hızlı (eğer bilyardo topu ilk başta Dünya'yla aynı yönde dönüyorsa) ya da biraz daha yavaş (eğer top zıt yönde dönüyorsa) döner. Kuzey yarımkürede bir vidayı döndürürken Dünya'nın dönmesini hızlandırabilirsiniz, mola verdiğinizde ya da durduğunuzda tekrar yavaşlatırsınız; aynısını güney yarımkürede yaparsanız yavaşlatır, durursanız hızlandırabilirsiniz. Evren bir bütün olarak sıfır açısal momentuma sahip gibi, bir bütün olarak evrende dönme yokmuş gibi gözüküyor. Her zaman da böyle kalacak, çünkü açısal momentum yaratamıyoruz, sadece onu evrenin bir parçasından bir başka parçasına taşıyabiliyoruz.

Bu durumda açısal momentumun korunması bize uzayın şekli hakkında ne söylüyor? Açısal momentum dönme hareketiyle ilgili olduğu için, onun korunumunun biz döndüğümüzde uzayın aldığı şekil hakkında bir şeyler söylediğinden şüphelenebiliriz. Aslında açısal momentumun korunması, eğer belirli bir noktanın etrafında daire çizerek ilerlersek uzayda herhangi

bir yumruyla karşılaşmayacağımızı açığa çıkartır. *Doğrusal* momentumun korunumu düz bir çizgide ilerlediğimizde uzaydaki düzgünlükten kaynaklanır; *açısal* momentumun korunması daire çizerek ilerlediğimizde uzaydaki düzgünlükten kaynaklanır. Daha teknik ifadesiyle, doğrusal momentumun korunumu bize boş uzayın homojen olduğunu, açısal momentumun korunumu bize boş uzayın eşyönlü olduğunu söyler. Newton'ın üçüncü yasası bize bariz olduğunu düşünebileceğimiz bir şey söyler: Uzay nereye gidersek gidelim düzgündür (dışarıdan uygulanan kuvvet ve torklardan uzak duralım, yeter). Fakat yasanın ölçülebilir sonuçlarının olması uzayın doğası üzerine oturduğumuz yerden yaptığımız spekülasyonların deneysel doğrulamaya açılmış olduğu anlamına gelir ve bu harika bir şeydir.

Tartışmamızda *enerjinin* henüz sahneye çıkmamış olduğunu fark etmişsinizdir. Newton kavramı hiç kullanmadı ve Young ortaya atmadan yüzyıl önce de öldü. Newton'ın mekaniği tüm özgünlüğü ve zarafeti bir yana, neredeyse kelimenin gerçek anlamıyla elle tutulabilir olan kuvvet kavramını kullanışıyla esasen köyün (ya da daha yakından bakarsak, buz pistinin) fizikidir. Siz de ben de kuvvetin ne olduğunu bildiğimizi düşünürüz, zira onu ne zaman uyguladığımızı ya da ona ne zaman maruz kaldığımızı biliriz. Newton tarafından mekaniğinin merkezi meselesi olarak kabul edilmiş olması fiziğin zar zor da olsa köyden çıkmakta olduğunun göstergesidir. Galileo'da gördüğümüz gibi bilimde ilerleme yürüyüşüne genellikle somuttan soyuta geçiş eşlik etmiştir, zira konunun kavranışı böyle derinleşir. Takım elbise çoktur ama insan iskeleti esasen tektir; iskeleti bir kez anladık mı, giysilerin salınışını izlemekle öğrendiğimizden çok daha fazlasını öğreniriz. Enerjinin girişi fizikte soyutun ortaya çıkışına ve onun ışığın da dünyaya yayılan olağanüstü aydınlığa işaret eder.

Bu aydınlığın dünyaya yayılması yarım yüzyılı buldu. 19. yüzyılın başında enerji hâlâ edebi bir terimken yüzyılın ortasına gelindiğinde artık fizik tarafından ele geçirilmişti. Nihai kabul ediliş tarihi net şekilde saptanabilir, çünkü 1846'da William Thomson (1824-1907, 1892'den sonra Lord Kelvin) "fizik kuvve-

tin bilimidir” diye yazabiliyorken, 1851’de “enerji temel ilkedir” diye ilan ediyordu. Bu geçiş iki aşamada gerçekleşti: nce bireysel parçacıkların hareketi çalışmalarında (gezegenler dediğimiz parçacıklar da dahil), sonra da buhar makineleri adını verdiğimiz ayrıntılı ve karmaşık parçacık yığınlarının eyleminde.

19. yüzyılın ilk yıllarında parçacıklar dünyasına bir dizi aydınlatıcı parlamayla girildi. İlk olarak, bahsettiğimiz üzere Thomas Young *enerji* kavramının bir parçacığın kütlesi ile hızının karesinin çarpılmasıyla elde edilen niceliğe uygulanmasını önerdi. Bu hareket enerjisi *vis viva* ya da canlı kuvvetin ölçütü olarak olarak algılandı ve parçacık yığınlarında gerçekleşen olayların canlılığının duyarlı bir ölçütü olarak görüldü. Paradoksal olarak bir top gllesinin canlı kuvveti ne kadar büyükse yarattığı ölüm ve yıkım o kadar fazlaydı.

Young’ın enerjii *ktle × hız²* olarak tanımlaması pek doğru değildi. Bu iddiaya hareket eden bir cismin bir şeyle çarpıştığında uyguladığı kuvveti düşünerek ve verili bir cismin hızı iki katına çıktığında uyguladığı kuvvetin dört kat artacağı şeklindeki hemen algılanmayan bir kabulde ulaşmıştı. Bu doğrudur, ama Young’ın ifadesindeki sayısal çarpan yanlıştır. Yanlışının fark edilmesi 1820 yılı civarında (birazdan ele alacağımız) *iş* kavramının Newton’ın ikinci yasasıyla birleştirilebileceğinin ve buradan hareketten ortaya çıkan enerjinin bu niceliğin yarısıyla daha iyi ifade edildiği çıkarımının yapılabildiğinin anlaşılmasıyla oldu. Bir süre ortaya çıkan bu niceliğe *aktüel enerji* dendi, ama kısa süre sonra *kinetik enerji* yerleşmeye başladı ve bugün tüm dünyada bu kavram kullanılıyor. şöyle ifade ediyoruz:

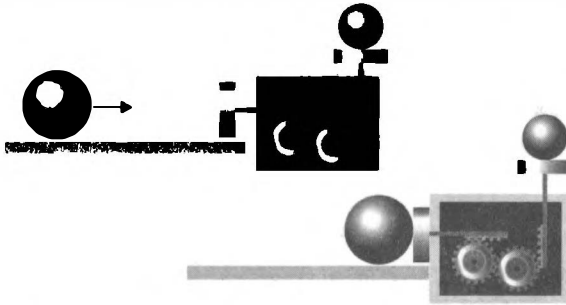
$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2} \times \text{ktle} \times \text{hız}^2$$

Bu yüzden hızlı hareket eden ağır bir cisim yüksek bir kinetik enerjiye, yavaş hareket eden hafif bir cisimse düşük bir kinetik enerjiye sahiptir. Düşen bir top hızlandıkça kinetik enerji kazanır. Doğrusal momentumdan farklı olarak hareket eden parçacığın yönü ne olursa olsun kinetik enerji aynıdır; belirli bir hızda yatay olarak hareket eden bir top yönü ne olursa olsun aynı kine-

tik enerjiye sahiptir, fakat doğrusal momentumu gittiği her bir yön için farklıdır.

Bahsettiğimiz “iş” enerji alanında kritik önemde bir kavramdır ve açıklanmayı hak etmektedir. Bir bilim insanının iş dediğinde neyi kastettiğini anlamamız gerekir, zira gündelik kullanımdaki anlamıyla tam olarak aynı değildir. Bilimde bir cisim karşı bir kuvvete karşı hareket ettirildiğinde iş yapılmış olur. Cismi ne kadar uzağa hareket ettirirsek yapmamız gereken iş o kadar artar. Karşı kuvvet ne kadar büyükse, yapmamız gereken iş o kadar büyüktür. Kütleçekim kuvvetine karşı (ağırlığın yukarı doğru hareketine karşı koyduğu için karşı kuvvettir) ağır bir cismi kaldırmak bayağı bir iş gerektirir. Masada duran bir kâğıt parçasını kaldırmak da iştir, ama öyle çok fazla bir iş de değildir. Aynı cismi aynı uzaklıktan geçerek Ay’da havaya kaldırmak, kütleçekim daha az olduğu için, Dünya’dakine göre daha az işi gerektirir.

Metal bir kalıbı kütleçekim çekmesine karşı havaya kaldırmaksa düşündüğünüzden daha ilginçtir. İlk olarak kaygan, sürtünmesiz bir yüzeyde, buz pistinde yapılan bir atış gibi ittiğimizizi düşünelim. Metal kalıp biz ittirmeyi sürdürdükçe hızlanacaktır. Bunun sonucunda kinetik enerjisi başlangıçta sıfırken

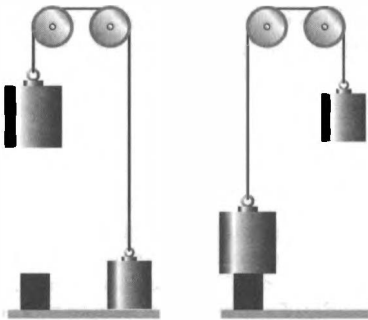


Şekil 3.5 Bir cismin hareketi iş yapmak amacıyla kullanılabilir, bu şekilde bir enerji formuna karşılık gelir ve buna kinetik enerji denir. Bu alette top pistonu çarpar ve pistonun hareketi dişli zincirinden geçerek başka bir topla temsil edilen ağırlığın kaldırılmasına dönüştürülür. İkinci topun kaldırılmasıyla yapılan iş (ağırlığı ve kaldırıldığı yükseklikle orantılıdır) yuvarlanan topun kinetik enerjisine eşittir.

istediğimiz değere dek ya da biz yorgunluktan bitap düşüp kuvvet uygulamayı bırakıncaya dek artacak ve metal buzda bizden uzağa sabit bir hızla kayacaktır. Yaptığımız iş kinetik enerjiye, hareket enerjisine dönüşmüştür. (Kinetik enerji ifadesindeki $\frac{1}{2}$ çarpanı bu iki niceliğin, yapılan iş ile elde edilen kinetik enerjinin eşit olmasını sağlamak için ortaya atılmıştır.) Şimdi bu yorumdan ilerleyerek bizim Gelileocu, sürtünmesiz masamızda durmadan hareket eden metal kalıbın hareketini bir ağırlığın kaldırılmasına çevirebilen bir tür mekanizmayla çarpışmasını sağlayalım (Şekil 3.5). Kinetik enerjinin hepsi işe, ilk baştaki hızlandırmada harcadığımız aynı iş miktarına dönüştürülür.

Bu gözlem şu tanıımı destekler: *Enerji iş yapma kapasitesidir.* Aslında enerji aynen budur. Enerji teriminin edebi değil, teknik anlamda kullanıldığını gördüğümüz her yerde anlatılmak istenen iş yapma kapasitesidir. Çok miktarda depolanmış enerji (hızla hareket eden ağır bir kütle) ilkesel anlamda çok iş yapabilir; büyük bir ağırlığı büyük bir yükseklığe kaldırabilir. Çok az enerjiye sahip olan bir cisim (yavaş hareket eden hafif bir kütle) ancak az miktarda iş yapabilir; az bir ağırlığı ancak küçük bir yükseklığe kaldırabilir. Cismin hızını iki katına çıkarmak yapılması için kullanılacak işi dört katına çıkarır.

Şimdi bir sonraki adıma geçelim. Bir ağırlığı belirli bir yükseklığe kaldırdığımızı ve onu başka bir ağırlığı kaldırabilen bir dizi makaraya bağladığımızı düşünelim (Şekil 3.6). İlk ağırlık



Şekil 3.6 Bir cisim durağan olmasına karşın yine de konumu sayesinde enerji sahibi olabilir: Bu enerji formuna potansiyel enerji denir. Solda, büyük ağırlık alçaltılmak üzere. Sağda, büyük ağırlık platforma alçatılmış ve bu süreçte küçük ağırlığı kaldırmış durumda. Büyük ağırlık iş yaptı, bu yüzden ilk başta da enerjiye sahip olmuş olması zorunlu. Bu enerji, onun ilk baştaki potansiyel enerjisiydi.

serbest bırakıldığında ikinci ağırlığı kaldırır. Yani iş yapar. Dolayısıyla ilk ağırlık ilk başta hareket etmiyor olmasına rağmen iş yapma kapasitesine sahiptir. Bu nedenle sahip olduğu bir enerji vardır. Bu enerji formuna, belirli bir konumda olma sayesinde sahip olunan enerjiye *potansiyel enerji* denir. Kavramı 1853 yılında ortaya atan İskoçyalı mühendis William Macquorn Rankine (1820-1872) enerji biliminin kurucularından biridir ve anlatımımızda karşımıza bir kez daha çıkacaktır.⁵

Bu aşamada sadece iki enerji formu olduğunu görüyoruz: Kinetik enerji (hareket sayesinde iş yapma kapasitesi) ve potansiyel enerji (konum sayesinde iş yapma kapasitesi). Sık sık “elektrik enerjisi”, “kimyasal enerji”, “nükleer enerji” gibi terimlerle karşılaşılıyor olsanız da, aslında böyle bir şey yoktur: Bu terimler kinetik ve potansiyel enerjinin özel ve belirli kombinasyonları için kullanılan elverişli kısaltma terimleridir. Elektrik enerjisi esasen artı yüklerin varlığı koşullarında eksi yüklü elektronların potansiyel enerjisidir. Kimyasal enerji biraz daha karmaşıktır, ama izini sürdürdüğünüzde moleküllerdeki elektronların potansiyel enerjisine ve bunlar molekül içerisinde hareket ettikçe, hareketlerinin kinetik enerjisine dek ulaşabilirsiniz. Nükleer enerji de benzerdir, ama atom çekirdeklerinin içerisindeki atomaltı parçacıkların hareket ve etkileşimlerinden doğar. Kinetik ve potansiyel enerji kavramlarının geçerliliğine aykırı tek kuraldışı durum, elektromanyetik ışınlam enerjisidir (örneğin ışık enerjisi, Güneş’ten Dünya’ya taşınıp bizi ısıtmak, fotosentez ve yiyeceklerin üretimi için kullanılır). Maddenin içerisinde depolanmış enerji açısından bakıldığında bu da tamamen kinetik ve potansiyel enerjiden oluşur. Böylelikle bu noktada artık enerji hakkında bilmemiz gerekenleri anlamış durumdayız.

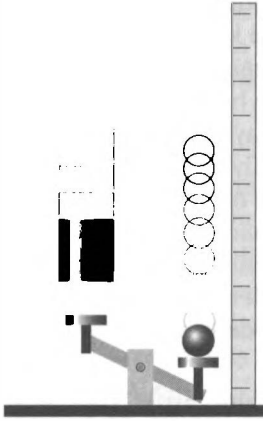
5 Enerji biliminin, özellikle de termodinamiğin kurucularından iki kişinin adı sıcaklık ölçeklerine verilmiş. Thomson’ın (Lord Kelvin) adını verdiği *Kelvin ölçeği*’nde ulaşılabilen en düşük sıcaklık olan mutlak sıfır -273°C , Rankine’in adının verildiği *Rankine ölçeği*’nde ise mutlak sıfır -460°F ’dir.

Aslında pek öyle değil. Bu bölümde geriye kalan sayfa sayısının yanı sıra, diğer bölümlerin enerji kavramını detaylandıracak olması olgusundan da çıkartabileceğiniz üzere her şeyi biliyor değiliz. Enerji bu kadar yer bulmayı hak ediyor, çünkü evren ve onun içerisindeki bütün yapı ve olaylar açısından merkezi bir önem taşıyor. Aslında bilimin iki büyük temel ayağı nedensellik, bir olayın onu izleyen bir başka olaya etki etmesi ve enerji. Nedensellik esas itibarıyla evrenin hareketini sürdürmesini sağlayan emir-komuta zincirinin bütünlük ve tutarlılığıken, enerji bu nedenselliğin sadece yasal eylemlere neden olmasını güvence altına alarak kurallara uymanın son derece dikkatli savunuculuğunu üstleniyor.

Enerji kavramını açmaya başlayalım artık. Potansiyel enerji potansiyel, çünkü *vis viva*'ya, aktüel enerjiye, kinetik enerjiye çevrilebilir. Ağırlığı yukarıda tutan kabloyu kestiğimizi düşünelim. Aşağıya düşer (bu deneyi Dünya'da, Dünya'nın kütleçekim alanında yapıyoruz) ve düşerken hız kazanır. Yere çarpmadan önceki anda çok fazla kinetik enerji elde etmiş ve bütün potansiyel enerjisini kaybetmiştir.⁶ Halen daha iş yapma kapasitesine sahiptir. Uygun tasarlanmış bir mekanizmayla, panayırlerde görülen eski güçlü adam performanslarındaki gibi, bir kaldırıca çekiçle vurulmasının bir ağırlığı yukarıya kaldırarak zili çaldırması misali, düşen ağırlığı başka bir ağırlığı yukarıya yönelten bir manivelaya çarptırarak kinetik enerji elde edebiliriz (Şekil 3.7). Hatta böyle bir performans gösterisi bu bölümün içiğinin özünü harika bir biçimde özetler. Sonuç olarak potansiyel enerji ile kinetik enerjinin rahatlıkla birbirine çevrildiğini kabul edebiliriz.

Yaptığımız deney aynı zamanda *toplam enerjinin*, birinci ağırlığın kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamının sabit olduğuna işaret eder. Bu sayede *enerjinin korunumuna* ulaşırız, enerjinin yaratılmadığı ve yok edilemediği, toplam enerjinin sabit olduğu yönünde bir gözlem gerçekleştiriyoruz. Bu varğı Newton'ın ikinci yasası kullanılarak formel şekilde kanıtlanabilir, dolayısıyla üçüncü yasa nasıl örtük olarak momentumun korun-

6 Genel kabul uyarınca Dünya'nın yüzeyinin yakınında gerçekleşen olaylarda yüzeydeki parçacıklara sıfır kütleçekimsel potansiyel enerji atfedilir.



Şekil 3.7 Fuarlardaki “gücünüzü ölçün” makinelerinin bu soyut biçiminde soldaki düşen ağırlığın kinetik enerjisi sağdaki topun yukarı doğru yönelmesini sağlıyor. Düşen ağırlığın kinetik enerjisi (bu tokmak da olabilir) topun kaldırılması işine dönüştürülüyor.

masını ifade ediyorsa, bu yasa da bir anlamda enerjinin korunumunu ifade etmektedir.

Karşımıza çıkmış olan diğer korunum yasalarının her ikisi de (doğrusal ve açısal momentumun korunması) bir simetriyle ilişkiliydi ve bize uzayın şekli konusunda bir şeyler söylemişti. Şimdi akla gelen bariz soru da, enerjinin korunumunun simetrisinin bir sonucu olup olmadığı, eğer öyleyse bu simetrisinin ne olduğu olacaktır. 9. Bölümde uzayı değil, *uzayzamanı* düşünmemiz gerektiğini ve zamana uzayla eşit tarzda muamele gösterilmesi gerektiğini göreceğiz. Momentumun korunumu uzayın şekline kaynaklanırken, enerjinin korunumunun zamanın şekline kaynaklandığını sezebiliyor olmamız gerekiyor. Gerçekten de durum budur ve enerjinin korunuyor olması olgusu zamanın yumrulu olmaması olgusundan kaynaklanmaktadır: Ezilmiş ya da uzatılmış parçaları olmadan, geçmişten geleceğe düzgün şekilde uzanmaktadır. Korunum yasaları ile uzayzamanın simetrisi arasındaki ilişki o kadar derindir ki korunum yasaları Newton’ın hareket yasaları geçersizleştğinde bile geçerliliğini sürdürür, zira momentumun ve enerjinin korunumu görelilikte ve kuantum mekaniğinde bile varlığını sürdürmektedir.

Newton’ın ikinci yasası aynı zamanda enerjinin korunumunun da etkili bir ifadesi olduğu için, nasıl üçüncü yasa uzayın pürüzsüzlüğünün (düzgünlüğünün) doğrudan bir sonucuysa, bu yasa da zamanın düzgünlüğünün doğrudan bir sonucudur.

Gayretkeş bir dindar olan Thomson'ın ve onun çok sayıda çağdaşının Tanrı'nın ihsanının bir sonucu olarak gördükleri enerjinin korunumu hakkında hissettikleri coşkuyu teşvik etmektense bugün çok sayıda bilim insanı böylesi bir açıklamayı daha ikna edici buluyor. Thomson'lara göre Tanrı dünyaya enerjiiyi bir hediye olarak bağışlamıştı ve bu enerji insan eliyle çoğaltılmadığı gibi, kutsal olduğu için bizim tarafımızdan da hiçbir biçimde yok edilemezdi.

Parçacıkların davranışının kinetik enerji, potansiyel enerji ve enerjinin korunumu yoluyla açıklandığı bu analiz 1867 yılında Thomson ve Tait'in tumturaklı eseri *Treatise on natural philosophy*'nin [Doğa Felsefesi İncelemesi] yayımlanmasıyla fiziğin temeli olarak genel kabul görmüş oldu. Aslında enerji kavramının fiziğin bütün dallarını birleştirmeye yardım ettiğinin farkına ondan öncesinde de varılmıştı. 1847 yılında bilgin bir insan olan Herman von Helmholtz (1821-1894) mekanik, ışık, elektrik ve manyetizmanın altta yatan birliğini göstermek için bu kavramı kullandı. Yine de onun başarısına rağmen bütün binayı tehdit eden kusur vardı, ısı problemi.

Isı hep gizemli bir olgu olagelmişti, buna rağmen buhar makinesinin gelişimi ve ulusal ekonomilerin buna dayanması ve etkili şekilde kullanımıyla savaşta ve ticarete başarı elde edilmesi sonucunda bilimsel dikkat yeniden ona yöneldi. Fakat problem sadece ısıнын doğasının bilinmiyor oluşu değil, aynı zamanda o dönemki fiziğin kapsamı dışındaymış gibi gözükmesiydi.

Uzun süre boyunca birçok kişi ısıнын (adını "ısı"nın Latince *calor*'dan alan) *kalorik* denen bir sıvı, eski araştırmacıların pek sevdiği "ölçülemez", ağırlıksız sıvılardan biri olduğunu düşünmüştü. Kalorik hem ölçülemez (ve bu yüzden tartma yoluyla rahatça tespit edilemez), hem de her yere, hatta birbirine çok yakın istiflenmiş parçacıkların arasına bile girebilmesi anlamında da "incelikli"ydi. Bu yanlış kanılara gülüyor olabilirsiniz, ama günümüzde "ısı" dendiğinde neyin anlatılmak istendiğini açıklayamayanlar olduğu gibi, üstüne üstlük kaloriğin dili gündelik dile ha-

len nüfuz etmiş durumda, zira bugün de ısının sanki bir sıvıymış gibi sıcak bir cisimden soğuk bir cisme “aktığını” söylüyoruz.

• Kaloriğin bilimin dışına itilmesini 1798 yılında bilimci, mucit, siyasetçi, zampara, asker, ikiyüzlü, hayırsever, devlet adamı, reformcu ve casus Benjamin Thompson, Kont Rumford (1753-1814) başardı. Thompson Massachusetts’te doğdu, 1776’da İngiltere’ye kaçtı, 1799’da Kraliyet Kurumunu kurdu ve Bavyera’ya giderek burada Kutsal Roma İmparatorluğunun savaş bakanı, polis bakanı, saray nazırı, devlet şurası üyesi ve kontu oldu. Unvanını eşlerinden ilkinin doğmuş olduğu New Hampshire’daki Rumford (daha sonra Concord) şehrinden aldı.⁷ Kaloriğin bilimsel sayılmamasını Rumford’ın Münih askeri deposunda topları denetlerken sıkılması sonucu yaptığı gözlemler sağladı. Şöyle yazmış:

Bir meşe sandıkta 18,77 lb (8,5 kg) su. Başlangıçta 60°F (15,5°C); iki at çarkı 2½ saat çevirdikten sonra su kaynadı.

Bu ve buna benzer deneylerden ulaştığı vargı, ısının sürekli olarak üretilebildiği ve tükenmez olduğuydu. Ayrıca sürtünmeyle yaratılması gerekiyordu ve bu yüzden metalin içinde gizlenmiş bir sıvı olarak değil, topun metalini oluşturan parçacıkların hareketi olarak görülmesi gerekirdi.

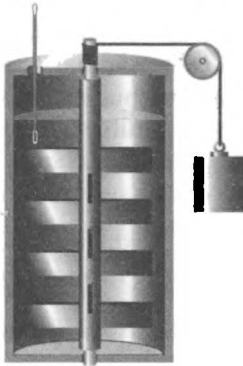
Isının bilime niceliksel olarak dahil oluşuna, onun gerçek atomik yapısının saptanmasına ve nihayet enerjinin korunumu yasasıyla uyumlulaştırılmasına dek daha alınması gereken çok yol vardı. Isıyı anlama dürtüsü, belirtmiş olduğumuz gibi buhar makinesinin sanayide çok büyük bir önem taşımasından doğdu ve ısıya ilişkin şu anki kavrayışımıza ulaşmamızı sağlayan gelişmelerin çoğunun Glasgow ve Manchester’da toplaşmış kuzey Britanyalı bilim insanları tarafından ve imalat sanayiiyle yakın ilişki içerisinde elde edilmiş olması şaşırtıcı değildir.

Kitap boyunca tekrarlanacak olan bir tema da, temel sabitlerin ortadan kalkmasının bilimdeki ilerlemeye işaret ediyor olmasıdır. Neyden bahsettiğimize dair ve sağladığı berraklık açısından ilk örneklerden birini şimdi göreceğiz. 19. yüzyılda (ve itiraf etmek gerekirse yeryüzünün kimi bölgelerinde 21. yüzyılda) iş

7 Daha sonra eşi Antoine (5. Bölüm) kellesini kaybettikten sonra Madame Lavoisier’e kalbini kaptırdı. Evlilikleri başarılı olmadı.

bir birim kümesiyle (erg cinsinden ama ayrıntılar şu an önemli değil), ısı bir başka birim kümesiyle ölçülürdü (kalori). Bu iki niceliğin ölçümü için farklı birimlerin kullanılması aslında bu niceliklerin özünde aynı olduğunu örtülüydü. 19. yüzyılda “ısının mekanik eşdeğerini”, belirli bir ısı miktarından elde edilebilen işi ölçmek ve işe yarar bir kaloriyi erge çevirme katsayısı bulmak için büyük çaba harcandı. Bu çaba bilimdeki ilerlemenin olmazsa olmaz bir parçası olmanın yanı sıra, enerjinin korunumu yasasının deneysel kuruluşunun da bir parçasıydı. Fakat bugünkü yaklaşımımızla baktığımızda zaman kaybından ibaretti. Yanlış anlamayın: *Olmazsa olmaz* bir zaman kaybıydı. Olmazsa olmazdı, çünkü bizim ısının bir enerji formu olduğunu görmemize, ancak tüketilen ısı kadar iş üretildiğini ve ancak yapılan iş kadar ısı üretildiğini görmemize yardımcı oldu. Zaman kaybıydı, çünkü şimdi iş ve ısının tek bir varlığın, enerjinin görünüşleri olduğunu biliyor, onları aynı birimlerle ölçüyor ve bir birimden diğerine çevirme gereği duymuyoruz.

Zamanını bu kadar olağüstü bir verimlilikle boşa harcayan insanlar içerisinde isminin en üste yazılmasını hak eden kişi James Joule'dur (1818–1889). Manchester'da zengin bir bira üreticisinin oğlu olarak doğan Joule 1875 yılı civarında parası tükenene dek araştırmasını sürdürmeye yetecek bir kaynağa sahipti. Ünlü deneyinde Joule suyu karıştırarak düşen ağırlıkla itilen ve kuvvetle dönen su çarkları kullandı (Şekil 3.8). Suyun sıcaklığını artırmak için gerekli olan işin aynı etkiyi yaratmak için gereken ısı miktarıyla karşılaştırılması sonucunda ısının mekanik eşde-



Şekil 3.8 Joule'un ısının mekanik eşdeğerini ölçmek için kullandığı aletin ideal biçimi. Düşen ağırlık, yalıtımlı muhafazanın içindeki suda yer alan paletleri hareket ettiriyor. Yapılan iş, ağırlığın düştüğünde ilerlediği uzaklıktan hesaplanabiliyor. Suyun sıcaklığı izleniyor ve ardından sıcaklıktaki artış aynı etkiyi yaratmak için gereken ısıyı hesaplamak için kullanılıyor.

ğerini ölçmesi mümkün oldu. Bugün faydasız görülen bu miktarı ölçmeyi başarmış olmasına karşın, aslolarak ısı ile işin denkliğini saptamış olması ve bu sayede ölçmek için bu kadar zaman harcadığı miktarın önemli olmadığını gösterdiği için büyük bir övgüyü hak ediyor. Bu katkısını onurlandırmak için hem iş hem ısıнын ve elbette enerjinin de ölçüldüğü birimlere bugün joule adı veriliyor.⁸ Bir joule (J) oldukça küçük bir enerji birimidir: İnsanın her bir kalp atışı yaklaşık 1J iş yapar. Bir günde gerçekleşen yaklaşık yüz bin kalp atışıyla kalbiniz yaklaşık yüz bin joule iş yaparak kanınızı bedeninizde dolaştırır, dolayısıyla sadece işin tıkırında gitmesi için bu enerji miktarını sağlamaya yetecek yiyeceği tüketmeniz gerekir. (Bir de bu son söylenen üzerine düşünöcek olursanız ekstradan yiyecek tüketmek gerekir.)

Joule'un ve çağdaşlarının çalışmaları, ısı ve işin enerjinin formları olduğunu ve bunlar hesaplanırsa enerji bilançosunun sağlam kalacağını ispatladı. Isıyla çalışıp buharla pofurdayan ağaç kesme makinelerinde bile, nesneleri oluşturan çok daha basit parçacık yığınlarının Newton dinamiğine uyduğı ve enerjinin korunumlu olduğı kanıtlanıyordu.

Enerjinin korunum yasasının evrensel geçerliliğe sahip olduğunun görülmesi, bir daimi hareket makinesinin üretilmesi olasılığını da geçersiz kılmaktadır. *Devridaim makinesi* de denen *daimi hareket makinesi*, yakıt harcamadan iş üreten cihazdır. Yani enerji üretir. Dolandırıcıların enerjisiyse daimi harekete sahip gibi gözükmemektedir; bu iddiaya sahip çok acayip makineler halen daha sergilenmekte ve hepsinin analiz edildiğinde ya da sadece parçalara ayrıldığında bile dolandırıcılık ürünü olduğı gösterilebilmektedir. Enerjinin korunumlu olduğuna o kadar eminiz ki bilim insanları (ve patent ofisleri) yasayla çelişen iddiaları artık ciddiye bile almıyorlar ve daimi hareket arayışı bugün hafiften çatlak ya da saplantılı insanların uğraşı olarak görülüyor.

Isı ve iş, enerjinin iki yüzü olmasına karşın sağduyuyla da sezelebileceğı üzere aralarında bir fark vardır. Isı ve işin tam anla-

8 Bir joule (1J) 1 newton (1N) büyüklüğünde bir kuvvete karşı 1 metre ilerlemek için gereken iş tir.

myla kavranması ve enerjinin dışavurumları olduklarının anlaşılması için aradaki farkın moleküler kavranışının gelişimine dek beklemek gerekti. Bilimde sık karşılaştığımız gibi, anlamının gelişimiyle beraber de var olmadıkları fark edildi: Isı diye bir şey yoktu ve iş diye bir şey yoktu! Gündelik yaşamımızda her ikisiyle o kadar sık karşılaştığımız için burada biraz daha açıklamaya ihtiyaç var. Girişelim bakalım.

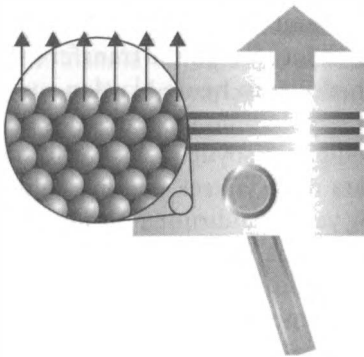
İlk olarak daha önce söylenen her şeyle çelişik görünebilecek şekilde ısı da iş de bir enerji formu değildir derken ne demek istiyorum? Kritik nokta şu: Her ikisi de aslında enerjinin bir yerden başka bir yere *aktarılmasının* yolu. Enerji transferinin bir yolu iş, diğeri de ısı. Bir makinenin içinde depolanmış ve bizler bir yolda ilerlerken ya da yük kaldırırken serbest kalan “iş” diye bir şey yok. Tamamen aynı şekilde (terimin gündelik dilde kullandığımız biçimine aykırı olmasına rağmen) bizler bir cismin sıcak olduğunu düşünsek bile herhangi bir cisimde depolanmış “ısı” diye bir şey de yok. Isı, enerjiyi *iletmenin* bir yolu: Isı bir şeyin sahip olduğu enerji değil, aktarma halindeki enerji. Sanıyoruz ısı dendiğinde söylenmek isteneni size anlatabilmem için, terimin gündelik konuşma diline ait özensiz kullanımına dayalı peşin hükümlerinizin hepsini göz ardı etmeniz gerekecek. Bir terimi önerirken bilimciler sık sık bilinen bir kelimeyi alır, onun etini, yağını sıyrır ve altta kalan kemikleri kullanırlar. Yine aynı sıklıkla bilimciler dili sadeleştirirler, amaçları itici ya da soğuk olmaya çalışmak ya da şairlerin ekmeğiyle oynamak değildir, bunu neyden bahsettiklerini *gerçekten* bilebilmek için yaparlar.

İş, en azından ilkesel anlamda bir enerjinin bir ağırlık kaldırmak (ya da daha genel olarak bir cismi karşıt bir kuvvete karşı hareket ettirebilmek) için kullanılabileceği biçimde transfer edildiği enerjidir. Ne olaydan önce makinenin ne de olaydan sonra hareket ettirilmiş cismin içinde depolanmış iş vardı. Olaydan önce makinenin içinde *enerji* dediğimiz soyut varlık vardı, hareket ettirilen cisim olaydan sonra daha yüksek enerjiye sahipti; kinetik enerjisi artmış olabilir ya da kaldırılmış bir ağırlıkla potansiyel enerjisi eskisine oranla daha yüksek olabilir. Enerji makineden cisme iş aracılığıyla aktarılmış oldu: İş aktarımın aracıdır, aktarılan varlık değil. Yan çizme sözcükleri olan “ilkesel

anlamda” ifadesi gözünüzden kaçmamıştır. Bu örnekte bunun anlamı, makineden (ya da hangi cihazı kullanıyorsak ondan) kurtulan enerjinin bir ağırlığın kaldırılması için aslında kullanılmamış olsa bile kullanılabilme olasılığının olmasıdır. Örneğin iş, elektrikli ısıtıcıdan geçecek elektrik akımını tetikleyen bir jeneratörün çalıştırılması için kullanılabilirdi. Son ürün kaldırılmış ağırlık değil, sıcak su oldu. Fakat enerjiyi ağırlık kaldırmak için de kullanabilirdik, o zaman iş olarak serbest kalırdı.

Isı, enerjinin sıcaktan (yüksek sıcaklıktan) soğuğa (düşük sıcaklığa) akmasıyla, bir sıcaklık farkının sonucu olarak aktarılan enerjidir. Olaydan önce kaynakta depolanmış ısı yoktur; olaydan sonra alıcı cisimde depolanmış ısı yoktur. Olaydan önce kaynaktaki depolanmış enerji vardı; ısınan cisimse olaydan sonra daha yüksek enerjiye sahiptir — örneğin su varsa birazı buharlaşmış, buzsa erimiş olabilir. Enerji kaynaktan cisme ısı aracılığıyla aktarılmış oldu: Isı aktarımın aracıdır, aktarılan varlık değildir.

Olayları moleküler düzeyde düşündüğümüzde her şey aydınlanır. Makinenin dışından atomların hareketine bakabildiğimizi varsayalım. Daha net konuşursak; gelin, genleşen gaz (araba motorunda) ya da buhar girişi (buhar makinesinde) tarafından dışa itilen pistonu yakından, gerçekten çok yakından bakalım. Pistonun atomlarını görebiliyor olsaydık, piston dışı doğru hareket ettiğinde hepsinin aynı yönde hareket ettiğini görürdük (Şekil 3.9). Nihayetinde büyük ölçekli, gözlemlenebilir hareket de sayısız atomun düzgün hareketidir. Buhar türbininde piston yoktur; onun yerine buhar kuvveti türbin kanatlarını çevirir ve

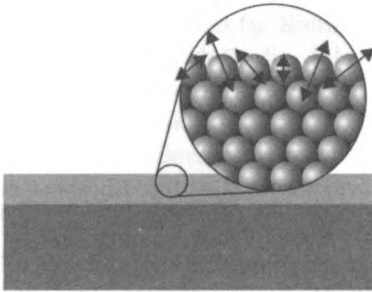


Şekil 3.9 İş yapıldığında enerji atomlar düzgün, yönlendirilmiş şekilde hareket edecek şekilde aktarılır. Yukarı doğru hareket eden bu büyütülmüş piston çiziminde atomların hepsinin birbiriyle uyumlu şekilde yukarı hareket ettiklerini görüyoruz. Bu hareketi pistonu dayanan ya da bağlanan bir cisme aktarıyor ve örneğin bir ağırlığın kaldırılmasını sağlıyorlar.

bu hareketi iş yapmak için kullanabiliriz. Kanatların atomlarını görebiliyor olsaydık, kanatlar döndükçe hepsinin aynı döngüsel yönde hareket ettiğini görürdük. Elektrik bataryasının kutuplarına tel bağlandığında elektrik akımını (elektronların akışını) oluşturan elektronlar içinden geçer. Telin içindeki elektronları görebiliyor olsaydık, hepsinin aynı yönde hareket ettiğini görürdük. Bu elektrik akımı örneğin devreye bir elektrikli motor bağlanarak iş yapmak için kullanılabilir. Her durumda iş atomların (ya da elektronların) düzgün hareketiyle bağlantılıdır. İş denen şey budur: Çevredeki atomların *düzgün* hareketini uyaran enerji transferidir.

Peki ya ısı? Atomların hareketini görme gücüne sahip hayali mikroskopla bir daha bakalım. Şimdi hareket eden bir piston ya da türbin kanadı yok, sıcak cismin hareketli parçası da yok. Bunun yerine enerji iletken bir duvardan geçerek sızıyor. Çevredeki atomların net bir hareketi yok, rasgele şekilde itiştiklerini görüyoruz (Şekil 3.10). Enerji cisimden ayrılıp çevreye girdiğinde çevredeki atomlar çok daha büyük bir hararetle itişiyor ve itişmelerinin enerjisini komşularına iletiyorlar ve onlar da kendi komşularına iletiyor. Kısacası enerjinin ısı olarak transferi çevredeki atomların *rasgele* hareketini uyaran enerji transferidir.

Atomların rasgele itişme hareketine *termal (ısıl) hareket* denir. Bu ısı değildir. Isı, enerji transferi tarzıdır. Asla “ısı aktarıldı” dememeliyiz, diyeceksek de bunun enerji ısı olarak ya da ısıtma yoluyla aktarıldı demenin kolay yolu olduğunu bilmeliyiz. Aslında ısı bir isim ya da sıfat olmaktan çok yüklem olmaya daha uygundur. Isı, ısı enerjisi değildir. Çok yaygın kullanılmasına rağmen

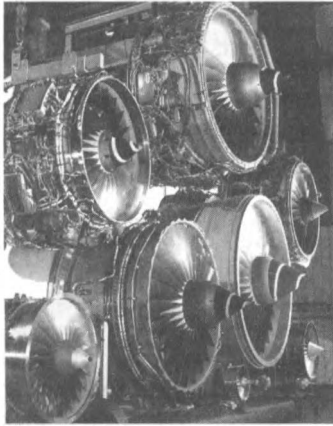


Şekil 3.10 Enerji ısı olarak aktarıldığında atomların hareketi düzensizdir. Sıcak cismin ve iletken duvarının (yatay plakalar) atomlarını konum elde etmek için hararetle salınıyor ve birbirleriyle itişiyor şekilde düşünebiliriz. Bu itişme etrafı enerji iletir ve atomlar bu ısı hareketi kapar.

men böyle bir şey yoktur (yalnızca her ikisi de ısı hareket enerjisine katkı yapan kinetik enerji ve potansiyel enerji vardır, bir de ışıma enerjisi). Isı, termal enerji değildir. Böyle bir şey yoktur, sadece ısı hareketin enerjisine gönderme yapan bir şey olabilir.⁹

İş ile ısı arasındaki bu atomik ayrımın uygarlığın gelişimine büyük etkisi oldu. Enerjiyi ısı olarak ortaya çıkarmak oldukça kolaydır: Enerjinin atomik hareketin rasgele itiş kakışının içine düşmesi yeter. Bu yüzden ilk insanlar bir süre sonra bunu başara-bildi. Enerjiyi iş olarak ortaya çıkarmak çok daha zordur, çünkü enerjinin düzenli atomik hareket olarak doğması gerekir. Hayvanların bedenleri haricinde, bu düzenli ortaya çıkarma tarzını başarabilen cihazlar (tek tük örnekler dışında) 18. yüzyıla dek yapılmamış ve istenen verimliliğe ulaşmaları için de geliştirme yolunda yüzyıllar harcanması gerekmiştir (Şekil 3.11).

Artık ısıнын nasıl saflara katıldığını ve enerjinin nasıl gerçekten korunduğunu görebiliyoruz. Artık enerjinin ısı ya da iş olarak transfer edilebildiğini biliyorsak, bu durumda enerjinin hem *dinamik* (tek tek cisimlerin hareketi ve kinetik enerji ile potan-



Şekil 3.11 Enerjiyi iş olarak ortaya çıkarmak için gereken karmaşık cihazlar yığınının bir örneğini görüyorsunuz. Isı olarak değil de bu şekilde enerji çıkarmak uygarlığın hayli geç bir döneminde mümkün oldu.

9 Kılı kırk yarıcı bir tavır sergiliyorum, doğru. Aslında bütün isim ve sıfatların da (kediler, köpekler, ısı, ısı enerji, kimyasal enerji) şeylere gönderme yapmanın kullanışlı biçimleri olduğunu itiraf etmem gerek. Fakat kafanızdaki düşünceleri boşaltıp arınma sağlamak istiyorum.

siyel enerjinin karşılıklı çevrimi) hem de *termodinamik* (ısı ile işin karşılıklı çevrimi) alanda korunduğu sonucuna varabiliriz. Enerji kozmik muhasebede geçerli gerçek bir evrensel para birimi, çünkü enerjinin yaratıldığı ya da yok edildiği hiçbir olay gerçekleşmiyor. Bu nedenle enerji evrende mümkün olan olaylar üzerinde bir tür kısıtlama, çünkü evrendeki toplam enerji miktarında bir değişime karşılık gelen hiçbir olay gerçekleşmiyor. Bu vargı Thomson ve Clerk Maxwell'i mutlu ederdi; zira ikisinin de enerjinin korunumundan coşku duymasının nedeni büyük oranda Tanrı'nın Yaradılıştaki evrene sonsuz bir bilgelikle seçilmiş sabit bir enerji miktarı bahşetmiş olduğuna ve insanoğlunun Tanrı'nın sonsuz inayetiyle uygun gördüğü şeyle yetinmesi gerektiğine duydukları inançtı.

Thomson and Maxwell'in kafasındaki soru muhtemelen evrende ne kadar enerji olduğuydu, çünkü bu Tanrı'nın alicenaplığının niceliksel bir ölçüsü sayılabilirdi. Büyük olasılıkla da bu miktarın sonsuz olduğunu farz ettiler, çünkü daha azı Tanrı'nın cömertliğinin bir sınırı olduğuna işaret eder, bu nedenle de kabul edilemez şekilde ilahi bir cimriliğin var olduğunun iması anlamına gelirdi. Enerji korunumlu olduğu için eğer şu an var olan toplam enerjiyi hesaplayabilseydik, bu en baştaki cömert bahşedilmeyle aynı olurdu. O zaman şimdi ne kadar enerji vardır? Dürüst yanıt bilmiyoruz diye cevaplamaktır. Fakat toplama işaret eden bir ipucu var.

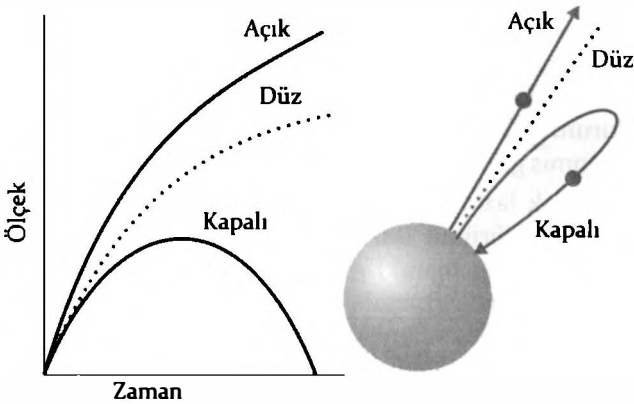
Önce bilimde her zaman yapılması gerektiği gibi önyargılarımızı aşmamız gerekiyor. Çok fazla enerji olduğu kesin: Evrene muazzam bir enerji birikimi bahşedilmiş olduğu vargısına ulaşmak için Dünya'daki yanardağları ve kasırgaları, yıldızların parlaklığını düşünmeniz bile yeter. Gerçekte gözün görebildiğinden fazlası da var, çünkü (9. Bölümde ayrıntılı ele alacağımız üzere) kütle enerjiyle eşdeğerdir, dolayısıyla maddenin tümü bir enerji formudur ($E = mc^2$). Görünen evrendeki bütün galaksilerdeki bütün yıldızların kütlelerini toptasak, devasa bir toplam kütleyle ve dolayısıyla devasa bir toplam enerjiye ulaşırız. Fakat bilimde de yaşamda olduğu gibi her şeyi hesaba katmak durumundayız. Enerjiye katkıda bulunan başka bir şey daha var: Maddeler arasındaki kütleçekimsel çekim. Çekim etkileşime giren cisimlerin

enerjisini düşürür, dolayısıyla ne kadar çoksa, enerji o kadar *düşüktür*. Bunu hesaba katmanın yollarından biri kütleçekimsel çekimin enerjisine negatif bir değer yüklemektir, böylece çekim ne kadar büyükse toplam enerjideki azalma o kadar büyüktür.¹⁰ Onun negatif katkısı yüzünden galaksilerdeki yıldızlar arasındaki ve galaksiler arasındaki kütleçekimsel etkileşimlerin hepsini hesaba kattığımızda ilk baştaki devasa toplam enerjimiz azalma gösterir.

Peki tümünden mi tükenir? Açıkçası durum hafiften öyle gözükmeye başladı. Evrenin net toplam enerjisine onun genişleme hızını inceleyerek karar vermemiz mümkündür (bu konu 8. Bölümde daha ayrıntılı ele alınacak). Negatif kütleçekimsel etkileşim eğer kütlenin pozitif katkısını aşarsa, bu durumda uzun vadeli geleceğinde evrenin genişlemesi yavaşlayacak, ardından genişleme tersine dönecek ve sonunda Büyük Çöküşte kendi üzerine çökecektir. Bu bir topun kopup kaçamayacağı kadar az kinetik enerjiyle havaya atılmasından farksızdır: Sonuçta yerin çekimi onu Dünya'ya geri getirir (Şekil 3.12). Bu tür bir gelecek senaryosunun giderek daha az muhtemel olduğu düşünülüyor. Öte yandan eğer kütleçekimsel çekim zayıfsa, bu durumda evren sürekli genişler. Bu bir topun Dünya'nın kütleçekiminden kurtulabilecek kadar muazzam bir kinetik enerji miktarıyla fırlatılması, galaksiler arası uzaya doğru yükselmesi ve sonsuzluğa yakınsar şekilde hareketini sürdürmesine benzer. Bu muhtemel bir gelecek senaryosu olarak halen geçerli: Gözlemlerimiz aksini ispatlamış değil.

Enerjiye pozitif ve negatif katkılar tam olarak eşitse, evren yine sonsuza dek genişleyecek ama büyüdükçe genişlemesi giderek yavaşlayacaktır; bu durumda evrenin çok uzak bir gelecekte genişlemeye devam etme ile çöküş arasında salınacağını düşünebiliriz. Bu bir topun tam olarak gereken kurtulma hızıyla fırlatılıp *tam da* kurtulmak için gereken kinetik enerjiye sahip olacağı şekilde atılması, ama sonsuzluğa yakınsarken hareketinin dur-

¹⁰ Dünya ile Güneş arasındaki çekim enerjisi toplamda -5.3×10^{33} J'luk bir düşmeye sebep olur, dolayısıyla kütleçekimin kendisi zayıf olmasına rağmen kütleçekimsel potansiyel enerji göz ardı edilebilir olmaktadır çok uzaktır.



Şekil 3.12 Küreden dışarı uzanan yollar Dünya yüzeyinden bir top fırlattığımızda ne yaşanacağını gösteriyor. Topu görece nazik (kurtulma hızından daha az bir hızla) atarsak, geri düşer. Daha kuvvetli (kurtulma hızından daha büyük bir hızla) atarsak sonsuzluğa kaçar ve sonsuzluğa yakınsar şekilde hareketini sürdürür. Noktalı yol kurtulma hızıyla tam olarak aynı hızla atarsak olacakları gösterir: Top kurtulur, fakat sonsuzluğa yakınsarken yavaşlar ve hareketi durur. Noktalı çizgi kurtulma ve yakalanma arasındaki ayrım çizgisidir. Grafik bu fikrin evrenin bütününe nasıl uygulanacağını gösterir. Kütleçekim güçlüyse (evrende çok madde olduğu için), bu durumda evren gelecekte bir zamanda çökecektir (havaya atılıp geri düşen top gibi). Kütleçekim çok zayıfsa (evrende fazla madde olmadığı için), bu durumda evrenin ölçeği sonsuza dek artacaktır (fırlatılan ve hiç durmadan ilerleyen bir top gibi). Kütleçekim ile dışı doğru hareket tam olarak dengedeysse, bu durumda evren sonsuza dek genişleyecek ve süzülerek durmaya yakınsayacaktır (kurtulma hızıyla atılan top gibi).

ma noktasına doğru yavaşlamasına benzemektedir." Böyle bir top hareket etmediği için kinetik enerjisi sıfırdır ve Dünya'dan sonsuz şekilde uzak ve onun kütleçekiminin erişemediği bir yerde olduğu için potansiyel enerjisi de sıfırdır, dolayısıyla toplam enerjisi sıfırdır. Enerji korunumlu olduğu için değişen kinetik enerji ve potansiyel enerji miktarlarına sahip olmasına karşın to-
pun toplam enerjisi daima sıfır olmak zorundadır. Evrenin geniş-

11 Dünya'dan kurtulma hızı 11 km/sn'dir ve kütlesi ne olursa olsun bütün cisimler için aynıdır.

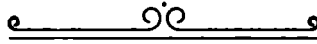
ledikçe hızlanmasına yol açan muhtemel ek etkilerle bağlantılı karmaşıktırıcı etmenler söz konusudur (bkz. 8. Bölüm), fakat evrenin toplam enerjisi de sıfıra çok yakınmış gibi gözüküyor. Aslında tam olarak sıfır da olabilir. Durumun bu olduğu ispatlanırsa, bu durumda Tanrı Yaradılıştaki enerjiyi tedarik ederken biraz cimrilik yapmış gibi gözüküyor.

Evrende çok fazla enerji olduğu yönündeki aldatıcı izlenim bizim enerjinin görünür işaretlerini tek bir formda (madde ve yıldızların parlaklığı olarak) görmemiz, diğer formlarındayken (kütleçekim) göz ardı etmemiz olgusundan kaynaklanıyor. Evrene bu muhteşem dinamizmi kazandıran da zaten toplam enerji değil, enerjideki bu *farklılaşmadır*.

İşin diğer tarafı da var. Enerjinin korunumu adlı hiçbir kural dışı örneği kesinlikle yokmuş gibi görünen bu yasanın da istisnaları var. Kuantum mekaniği bu konudaki özgüvenimizi birkaç biçimde sarsıyor. Kuantum mekaniğinin (7. Bölüm) acayip sonuçlarından biri de enerjiye kesin bir değer atfetmenin sadece bu enerjinin durumu sonsuza dek sürüyorsa mümkün olması. Kuantum mekaniğine göre kısa ömürlü bir varoluşa sahip bir parçacık kesin bir enerjiye sahip değildir ve kısa, anlık zamanlarda evrenin enerjisine kesin bir değer atfedilemez ve bu yüzden enerjisinin korunumlu olması gerekmez. Belki de çok kısa ömürlü devridaim makineleri yapmak mümkündür!

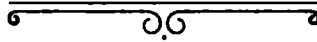
4 ENTROPİ

DEĞİŞİMİN KAYNAĞI



BÜYÜK FİKİR

*Değişim tamamen enerji ve maddenin düzensizliğe amaçsızca
çöküşünün sonucudur*



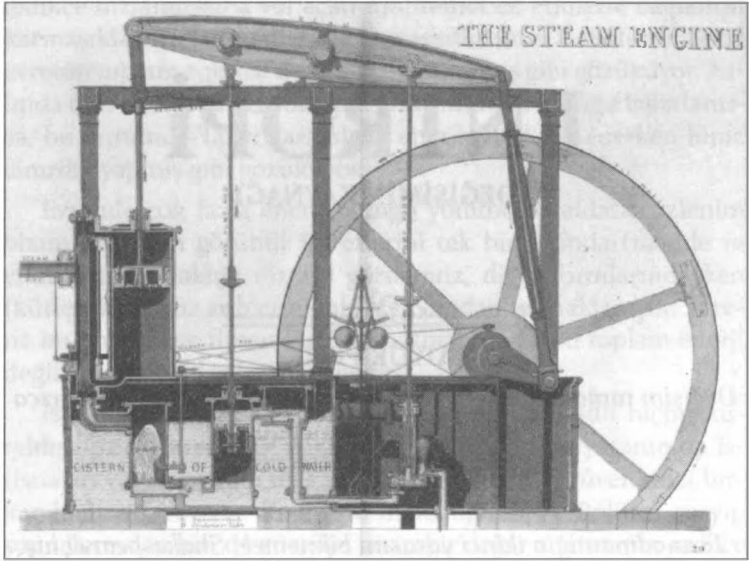
*Termodinamiğin ikinci yasasını bilmemek, Shakespeare'i hiç
okumamış olmaya benzer.'*

C. P. SNOW

Hepimizin sormayı unutabileceği soru, her şeyin neden olduğudur. Yanlış bir biçimde derin soruların sık sık safça sorular olduğu düşünülür; ama naif görünen derin sorular dikkatle araştırıldığında evrenin esas anlamına ışık tutabilir. Bu soru da böyle bir sorudur, çünkü yanıtın peşinde koşarken evrendeki tüm değişimlerin itici gücünü kavrama yolunda ilerlediğimizi göreceğiz. Sıcak kahvenin soğuması gibi gündelik yaşamımızdaki basit olayları anlayacak ve doğum, büyüme, ölüm gibi gündelik yaşamımızdaki en karmaşık olayların açıklamalarını en azından ucundan yakalayacağız.

Değişimin kökeni hakkındaki sorumuzun yanıtı *termodinamik* adı verilen ve enerji dönüşümlerini, özellikle de ısının işe dönüşümünü inceleyen bilimsel alanda yatıyor. Termodinamik

1 *The two cultures* [İki Kültür]



Şekil 4.1 Buhar makinesi hantal bir yaratık gibi gözükebilir ama aslında evrenin işleyişini özetler. Bu bölüm ilerledikçe evrendeki tüm olayların, içimizdeki ve dışımızdakiler dahil hepsinin –uygun bir soyutlukla ifade edildiğinde– buhar makinelerince harekete geçirildiğini göreceğiz.

ciddiyetsizliğiyle meşhur bir alan değil, zira anlaşılmasını çıkış nedeninin yüklediği ciddiyete, buhar makinelerinin verimliliğinin sınanmasına borçluyuz. Buhar makinesi kolayca akla gelebileceği üzere ağaç kesim faaliyetinin özünde yatar ve eğlenceli bir fikrin oluşumunu bir kenara koyun, bir yaprağın tomurcuklanmasının ince zarafetiyle hiçbir ilgisi olmadığı kesindir. Buhar makineleri sanayinin ağırlığını simgeler, biraz genişletirsek de sanayileşmeden doğan eziyeti ve toplumsal sıkıntıları sembolize eder (Şekil 4.1). Sağlığı değil kirliliği, kırı değil kenti ve inceliği değil hantallığı temsil eder. Zangırdayan, hırıldayan, püfleyen, uğuldayan, sızdıran bu devasa canavarların etrafımızı saran, bizi zenginleştiren ve bu harika dünyanın her tarafına yayılan zarif olaylar ağının anlaşılmasıyla ne alakası olabilir?

Bilimin daha büyük soyutlamalara giderek aydınlattığını görmeye başladık. Bu bağlamda da aynısı geçerli. Demirinden so-

yundurup buhar makinesinin *soyutlamasına* ulaştığımızda tüm değişimin kaynağının bir temsilini elde ederiz. Yani buhar makinesinin *özüne*, onun soyut kalbine bakmamız ve gerçekleşme ayrıntılarını (buhar, sızdıran borular, yağ damlaları, zangırdamalar, gümbürdemeler ve perçinler) göz ardı etmemiz şartıyla bütün olayları kapsayabilecek bir kavrama ulaşırız. Bilim böyledir: Bilim gerçeklikten özünü, büyük fikirlerini damıtır, ardından doğada başka bir yerde aynı özü, aynı ruhu bulur. Farklı olaylarda yatan aynı özü tespit etmek, dünyanın bütününe dair ortak bir kavrayış elde etmek anlamına gelir. Bir şairin gözünden bakarsak olayların yüzeyselliklerini görürüz ve bu olayların asla duygusal ya da ruhsal olarak coşku verici olmadığı anlamına gelmez. Fakat bir bilimcinin gözünden bakarsak yüzeyin altına iner ve içerdeki ruhu görürüz. Bu bölümde olayların derisini soyup içerideki buhar makinesi ruhunu bulacağız.

Buhar makinesinin tüm değişimleri özetlediği 19. yüzyılda anlaşılmaya başlandı ve 20. yüzyılın başında anlaşıldı. Termodinamikteki bir başka sorun da budur: Atmosferi acayip Viktoryendir. Tıpkı bu dönem gibi termodinamiğin de geçmişin konularından biri olduğu ve mühendisler haricinde modern dünyamızın anlaşılmasıyla pek fazla ilgisi olmadığı düşünülmüş olabilir. Fakat termodinamiğin kökleri derindir ve dallanıp budaklanarak modern dünyanın yapısına işlemiştir. Modern tarzda yorumlandığında termodinamik en güncel konulardan biridir.

Altyapı oluşturması için 19. yüzyıl tarih havuzunu karıştırıp dört ölü bilim insanının düşündüklerini yüzeye çıkartacağım. Bu dörtlü (Sadi Carnot, William Thomson (Lord Kelvin), Rudolph Clausius ve Ludwig Boltzmann) buhar makinesinin ruhunun damıtılmasına büyük katkılar yaptılar. Bu tartışmanın merkezinde yatan büyük fikir olan “entropi” kavramının ortaya çıkışının izini, daha modern bir perspektiften ele almadan önce ilk olarak onları gözünden süreceğiz.

19. yüzyılın başlarında buhar makinesi servet demekti; daha sonra bunun aslında değişimi özetlediğini göreceğiz, ama şimdi lik servet demekle yetinelim. Bu makineler ülkenin dört bir tara-

finda çalışarak madenlerin işlemesi için su çekiyor, dokuma tezgâhlarını çalıştırıyor ve böylelikle ekonomiyi güçlendiriyor, bir süre sonra tekerleklerin üzerine ve gemilerin içine yerleştirilerek hareketliliği, ticareti ve saldırganlığın güzel adlandırması olan savunmayı kolaylaştırıyordu. İngiltere azimle çalışıyor, buhar makinesi ulusun toplumsal ve ekonomik yapısını bir yüzyıl sonrasında itibaren bilgisayarın yaptığına benzer şekilde sarıyor ve dönüştürüyordu. Fransızlar Kanal'ın öte yanından gelişmeleri kömür kaynaklarının sınırlılığı nedeniyle sonuç alamadıkları için kaygı ve haset dolu gözlerle izliyordu. Mühendislerin acil hedefi buhar makinesinin verimini artırmak, daha az kömürle daha çok iş elde etmektir. En iyi araç su muydu, acaba onun yerine hava kullanılabilir miydi? Yüksek basınç düşük basınçtan daha mı iyiydi? Sıcaklık nasıl olmalıydı? Analitik Fransız pragmatik İngiliz kendi oyununda yenebilmek için akıllı kullanabilecek miydi?

Bu tür soruların yanıtlarını gizleyen sis bulutlarının arasından parlak bir ışık belirdi. Sadi Carnot 1796'da nihayet doğdu. Nihayet diyorum, çünkü kararlı anne-babası Sadi'ler yaratmak için önceki iki denemelerinde de başarısız olmuş ve bu Sadi bebekler küçük yaşta ölmüştü. Üçüncü ve nihayet başarılı Sadi daha uzun yaşadı, otuz altı yaşında koleradan öldü. Hayatı kısa sürse de yaşadığı yıllar ona bilime yapılan önemli katkıların sağlayabildiği ölümsüzlüğü bahşetmeye yetecek kadar uzun oldu.

Carnot'nun buhar makinesi algısı tamamen yanlıştı, ama buhar makinesinin özü konusundaki saptaması o kadar güçlüydü ki temeldeki yanlış algılayışına karşın pırıl pırıl parlıyordu. Carnot 3. Bölümde karşılaştığımız, o sırada hâkim olan ısının bir sıvı (kalorik) olduğu görüşünü savunuyordu (en azından fikirlerini ilk oluştururken, çok sonraları fikrini değiştirdi); bu sıvı sıcak bir depodan soğuk bir çukura akıyor ve bu süreçte (su çarkının suyun akışıyla dönmesine benzer şekilde) makineyi çalıştırıyordu. Yine o zamanki hâkim görüşle uyumlu biçimde, bir sıvı olarak ısının kaynaktan çukura akarken yaratılmadığı ve yok edilmediği düşüncesindeydi. Bu yanlış modele dayanarak ideal (sürtünme, sızma vb. etkilerin göz ardı edildiği) bir buhar makinesinin verimliliğini yalnızca sıcak kaynağın ve soğuk çukur sıcaklıklarının belirlediği ve bunun hem basınçtan hem de çalıştıran maddenin

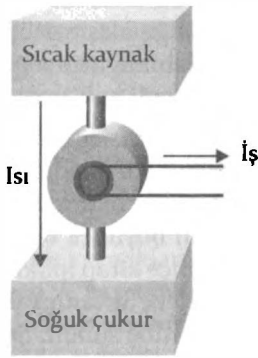
kimliğinden bağımsız olduğu gibi hayret verici bir sonucu kanıtlamayı başardı.² Bu nedenle en yüksek verimliliğe ulaşmak için sıcak depo olabildiğince sıcak ve soğuk çukur olabildiğince soğuk olmalıydı. Diğer değişkenlerin hepsi esasen ilgisizdi.

Sezgilere aykırı bu sonuçlar o dönemki mühendisler tarafından çok saçma bulundu ve Carnot'nun *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824) adlı kitapçığı hemen hiç okunmadan unutulurak çürüdü. Ama tamamen değil. Tarih boyunca birçok önemli fikrin nabzının atmasını sağlamış olan ince kitap iplikleri Carnot'nun kitabını daha sonra Largs Lordu Kelvin unvanını alacak olan William Thomson'ın (1824-1907) dikkatine sundu. Seslenmesi en uygun ismiyle Kelvin 3. Bölümde gördüğümüz üzere o sırada James Joule'le birlikte kalorik kuramın terk edilmesini sağlamış ve ısıyı bir enerji biçimi olarak tanımlamış durumdaydı. Çağdaş dünya bugün enerjinin, ısının değil, korunumlu olduğunu ve ısı ve işin, enerjinin iki görünümü olarak birbirlerine dönüşürülebildiğini kabul ediyor. Kaloriğin bir makineden geçerek akması yaklaşımı başka bir fikrin önünü açtı: Akan enerjyidi ve makinenin kendisi değirmenden çok, bu enerjinin birazının ısıdan işe çevrilmesine yarayan bir cihaz olarak görülmeye başlandı. Aynı fikir bugün ısıyı işe çevirmeye yarayan ve *ısı motoru* adı verilen buhar makineleri, buhar türbinleri, jet motorları ve içten yanmalı motorlar vb. bütün cihazların işleyiş prensibidir.

Carnot'nun *Réflexions*'u Kelvin'i buhar makinelerinin verimliliği konusunda düşünmeye ve Carnot'nun çalışmasını daha niceliksel hale getirmeye yöneltti. Carnot fikirlerini basit aritmetik kullanarak geliştirmiş ve daha modern ve ikna edici bir dille ifade etmek için matematiğin titizliğinden yararlanmamıştı.

Kelvin'in katkısını anlamak için karşımızda tipik bir 19. yüzyıl buhar makinesi olduğunu düşünelim. Makineyi ilk incelediğimizde muhtemelen silindirin içindeki pistonun esas gerekli parça olduğunu düşünürüz, çünkü enerji akışının bağlantısını sağlayan ve bu enerjinin bir miktarını hareket ve dolayısıyla iş olarak boşaltan bu cihazdır (Şekil 4.2). Bir başka alternatif, sıcak deponun esas gerekli bileşen olduğu sonucuna varmaktır, çün-

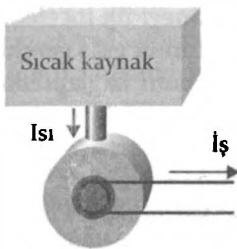
2 Sıcaklıklar termodinamik (mutlak, Kelvin) sıcaklık ölçeğinde olmak üzere, $T_{\text{sıcak}}$ ve $T_{\text{soğuk}}$ sıcaklıkları arasında çalışan mükemmel bir makinenin verimliliği, yapılan işin arz edilen ısıya oranı $1 - T_{\text{soğuk}} / T_{\text{sıcak}}$ 'tır.



Şekil 4.2 Buhar makinesinin, daha genel söylersek ısı motorunun temsili için bu tarz bir çizimden faydalanacağız. Enerjinin yüksek bir sıcaklıkta çekildiği sıcak kaynak, ısıyı işe çeviren bir cihaz (gerçek bir buhar makinesinde bu makine silindirin içindeki pistondur) ve "boşa giden" ısı'nın içine atıldığı bir soğuk çukur var.

kü işe çevrilecek olan enerjinin kaynağı budur. Fakat Kelvin ilk bakışta acayip gelen şu görüşe ulaştı: Bu iki bileşenin de önemi ortada ve çok daha dikkat gerektiren bir tasarım ve yapıya sahip olmalarına karşın, bir buhar makinesindeki *esas gerekli* bileşen soğuk çukurdur, boşa giden ısı'nın içine atıldığı ortamdır. Bu görüşe göre makinenin esas gerekli parçası ortada yok gibiydi ve tasarlanması ya da yapılması gerekmiyor gibi gözüküyordu: Yapılan parçaların etrafıydı. Bilim sık sık böyle gelişir: Sağduyuya aykırı şekilde ileri atılır ve bunu eski bir problemi başka bir açıdan aydınlatarak başarır. Macar biyokimyacı Albert Szent-Györgyi (1893–1986) bilimsel araştırmanın herkesin görmüş olduğunu görmek ama başka kimsenin düşünmediğini düşünmekten oluştuğunu söylerken bilimin bu yönünü çok güzel açıklar.

Kelvin'in kavramsal taklası soğuk çukura verdiği büyük önemi evrensel bir doğa ilkesine yükseltmesine yol açtı: *Çalışan bütün motorların soğuk çukuru olur* (Şekil 4.3). Kelvin ilkesini tam bu



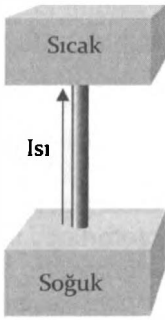
Şekil 4.3 Kelvin'in ikinci yasaya dair açıklaması bu motorun çalışmaya-çağını iddia eder. Çalışan bütün ısı motorlarında ısı'nın bir bölümünün boşa harcadığı bir soğuk çukur vardır.

kelimelerle ifade etmedi³, ama ifadesinin özü budur. Etrafınıza bakıp herhangi bir buhar makinesini incellerseniz, ayrımsız hepsinde bir soğuk çukur olduğunu görürsünüz. Sıcak depoda depolanmış bol bol enerji olsa da, bu depoya bir silindirin içerisinde bağlanan gayet iyi yağlanmış bir piston olsa da, soğuk çukuru çıkartırsanız motor durur. Soğuk çukur olmazsa olmaz. Çıkarırsanız motor durur. Aslında arabalarımızı harekete geçiren içten yanmalı motorlar ve uçaklarımızı kaldıran jet motorları dahil ısıyı işe çeviren bütün motor çeşitlerinde bu ilke geçerlidir. Soğuk çukurun bu karmaşık cihazlarda tespit edilmesi daha zordur ama enerji akışının dikkatli analizi sonucunda var oldukları görülür. Örneğin içten yanmalı bir motorda egzoz valfleri ve borusunu boşa harcanan ısının atıldığı çukur olarak düşünebiliriz. Burada bütün ısı motor türlerinin hepsinin içinde *kavramsal* bir buhar makinesi olduğunu anlamanın ilk ışığı saklıdır, zira esas gerekli bileşen olan soğuk çukur ve esas gerekli eylem olan boşa harcanan ısının atılması hepsinde vardır. İçten yanmalı motorlardan bile daha karmaşık bir yapıya sahip olan canlı organizmaların da aynı soyut ilkelere dayanıyor olması mümkün müdür? Termodinamiğin dev canavarı uyanmaya başladı.

Çalışan bütün motorların soğuk çukuru olur termodinamiğin ikinci yasasının ifadelerinden biridir. Yasa normalde bu kadar özlü ifade edilmez, ama kullanılan kelimeler işin ruhuna uygun. Bu aşamada tipik bir görgül yasa biçiminde ve deneyimin doğru-
dan bir özetinden farksız: Soyutlama yapılması için potansiyele sahip, ama bu biçimiyle yasaı herhangi bir keskin gözlemci de ifade edebilir. Üstelik bu biçimiyle yasanın evrenselliği de biraz sınırlandırılmış gözüküyor. Dünya üzerindeki ısı motorlarının ve eğer ellerinde varsa muhtemelen evrende başka yerlerde yaşayan dünyadışı canlıların yaptıkları ısı motorlarının yapısının bir özeti bu. Fakat yasa hayatı, evreni ve her şeyi kucaklayan o büyük genişliğe sahip değil gibi gözüküyor.

Aynı dönemde, 1850 yılında Alman fizikçi Rudolph Clausius (1822–1888) dönemin sıcak gündem maddesi olan ısı üzerine harıl harıl çalışmaktaydı ve düşüncelerini *Über die bewegende Kraft*

3 Tam anlamıyla şunu söyledi: Sadece ısının bir depodan soğurulması ve işe tam anlamıyla çevrilmesi sonucunu veren hiçbir çevrim mümkün değildir.



Şekil 4.4 Clausius'un ikinci yasayı ifadesinde bunun gibi süreçlerin asla gözlenmediği iddia ediliyordu. Dış müdahale olmaması koşuluyla, enerjinin soğuk bir cisimden sıcak bir cisme ısı olarak aktığı asla gözlemlenmez.

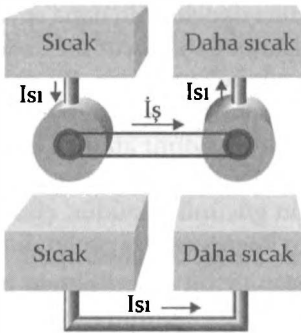
der Wärme (Isının devindirici kuvveti) başlıklı makalede açıkladı. O da doğada bulunan ortak bir özelliği fark etmişti ve sahip olduğu saygı duyulan bilim insanı statüsü, insanların ahmakça bulacağı bir gözlemi yayımlamaktan korkmamasını sağlıyordu: *Isı soğuk bir cisimden sıcak bir cisme akmaz** (Şekil 4.4). Clausius elbette kesinlikle ahmak değildi ve bu ve sonraki makalelerinde bu görüşünü geliştirerek çok güçlü bir niceliksel ilkeye ulaştı. Şimdilik biz yasanın görgül biçimiyle devam edelim ve gerçekten de gündelik deneyime uyduğunu görelim. Böyle yaptığımızda yasanın soğuktan ısıya ısı transferini yasaklamadığına dikkat etmeliyiz: Sonuçta buzdolabında da olan budur, ısı buzdolabının içinden dışarı pompalanır ve etrafındaki sıcak yerlerde toplanır. Mesele şu ki soğutma elde etmek için iş yapmamız gerekir: Buzdolabı, mekanizmasını harekete geçiren bir elektrik kaynağına bağlı olmak zorundadır. Clausius'un dikkat çektiği nokta hiçbir biçimde müdahaleye uğramayan, bizim harekete geçirmemize gerek olmayan bir sürece uygundur. Kısacası Clausius'un vargısı "doğal" ya da "kendiliğinden" değişimlere, dış bir aracı tarafından harekete geçirilmeden gerçekleşen değişimlere dönüktür. Bu nedenle çevrenin sıcaklığının soğuması kendiliğindendir; fakat çevrenin sıcaklığının üzerinde bir ısınma kendiliğinden değildir, bunu harekete geçiren bir şeyler (örneğin elektrik akımını bir cisimle temastaki bir ısıtıcıdan geçmeye zorlamak) var demektir. Bilimde "kendiliğinden" ifadesi hızlı kelimesini çağrıştırmaz:

- 4 Daha önceki gibi yine gerçeği başka sözcüklerle ifade ediyoruz. Clausius'un ifadesi daha çok şöyle bir şeydi: "Sadece soğuk bir cisimden sıcak bir cisme ısı transferi sonucunu veren hiçbir çevrim mümkün değildir."

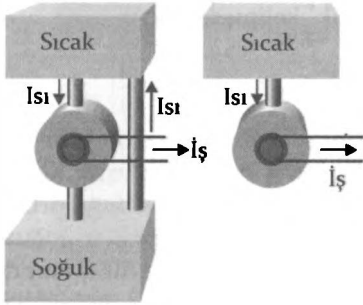
Devrilmiş bir fıçıdan koyu katranın yavaş akışı, aşırı derecede yavaş olsa bile kendiliğindendir. Bilimde kendiliğinden sadece “doğal” kelimesini, çağrıştırır, “çabuk” kelimesini değil.

Termodinamik bir kavram Amazon’udur. Amazon gibi termodinamik de çok sayıda derenin birleşiminden oluşur. Kelvin ve Clausius derelerinin aynı fikir nehrinin kolları olduğu ortaya çıktı. Aslında mantık yönünden de denktirler, çünkü ısı soğuktan sıcaklığa kendiliğinden akabiliyorsa, bu durumda bir motor da soğuk çukur olmadan çalışabilir ve eğer bir motor soğuk çukur olmadan çalışabiliyorsa, o zaman ısı soğuktan sıcaklığa doğru kendiliğinden akabilir.

Kelvin ile Clausius’un vargılarının gerçekten eşdeğer olduklarını görmek için varsayımsal bir çukursuz motor kullanarak bunun başka bir varsayımsal çukursuz motoru çalıştırdığını düşünelim (Şekil 4.5). İki motor arasındaki tek fark enerji kaynaklarının sıcaklıklarının farklı olmasıdır, harekete geçiren makinedeki sıcaklık harekete geçirilenden daha düşüktür. Çizimden de görebileceğimiz üzere düzenlemenin toplam sonucu daha soğuk kaynaktan daha sıcaklığa doğru enerji transferidir ve bu Clausius’un ikinci yasa ifadesine aykırıdır. Bu yüzden eğer Kelvin’in ifadesi yanlışsa, bu durumda Clausius’un ki de öyledir. Şimdi de tersini,



Şekil 4.5 Bu düzenleme (üstteki) eğer Kelvin’in ikinci yasa ifadesi yanlışsa, bu durumda Clausius’un ikinci yasa ifadesinin de yanlış olduğunu göstermektedir. Soldaki motor sağdaki motoru harekete geçirecek ve bu sayede işi “daha sıcak” depoda biriken ısıya dönüştürecek şekilde ayarlanmıştır. Toplam sonuç (alttaki) ısının “sıcak” depodan “daha sıcak” depoya transferidir ve bu Clausius’un ifadesiyle çelişmektedir.



Şekil 4.6 Bu düzenleme eğer Clausius'un ikinci yasa ifadesi yanlışsa, Kelvin'in ikinci yasa ifadesi yanlış olduğunu göstermektedir. Motor (soldaki) iş üretir ve soğuk çukura bir miktar ısı biriktirir. Fakat bu boşa harcanan ısıyı sıcak kaynağın içine aktaran bir başka cihaz daha vardır. Toplam sonuç (sağdaki) soğuk çukur ihtiyacının ortadan kalkmasıdır ve bu Kelvin'in ifadesiyle çelişmektedir.

eğer Clausius'un ifadesi yanlışsa, Kelvin'in ifadesinin de yanlış olduğunu gösterelim. Bu gösterim için çalıştırdığımız motor boşa harcanan atık ısıyı bir çukura boşaltıyor. Ardından bu atık ısı'nın hepsinin yeniden sıcak kaynağa dönüşünü sağlıyoruz ve bu Clausius'un doğal yoldan olabilecekler konusundaki görüşüne aykırı (Şekil 4.6). Düzenlemenin toplam sonucu soğuk çukura herhangi bir ısı atılması olmadan ısı'nın sıcak kaynaktan işe çevrilmesidir, dolayısıyla soğuk çukura gerek yoktur. Bu vargı Kelvin'in ifadesine aykırıdır. İfadelerden birinin yanlışlığı diğerinin de yanlışlığına işaret ettiği için bu iki ifadenin aslında mantık yönünden denk oldukları sonucuna varıyoruz: Bunlar ikinci yasanın eşdeğer ifadeleridir.

İkinci yasanın iki ifadesine sahip olmak pek ekonomik bir tutum gibi gözüküyor. Kelvin ve Claudius ifadelerinin daha soyut tek bir kavramın farklı halleri, aynı yasanın daha soyut bir ifadesinin farklı görünüşleri olduğundan şüphelenmeliyiz. Bu daha soyut saklı ifadenin üzerindeki örtüyü sıyırmak için buhar makinesinin evrenselliğini tanımaya doğru ilk adımı atalım. Daha önce birkaç kez gördüğümüz gibi ve bu bölümde de vurguladığım üzere soyutlamaya gitmek bilimin gücünün özüdür, çünkü bilimin kapsamını genişletir ve olguları kavrayışımızı güçlendirir.

3. Bölümde enerji kavramının fiziğin üstün geçerlilikteki birimi olmaya nasıl başladığını gördük. Orada enerjinin niceliğiyle ilgileniyorduk ve enerjinin korunumu tespit edildikten sonra fi-

zikteki olguların nasıl rasyonelleştiğini gördük. Termodinamiğin birinci yasası evrenin enerjisinin sabit olduğunu söyleyerek bu korunumu tanımaktadır. Bu bölümde bu yasayla herhangi bir çatışmaya girmiyoruz. Fakat tıpkı iki kütüphanenin, biri düzenli diğeri rasgele yığılmış halde aynı sayıda kitabı içerebilmesi ve bu nedenle verdikleri hizmetin kalitesinde farklılaşabilmesi gibi, enerji de faydalılığına etki eden bir niteliksel yöne sahiptir. Depolanan enerjinin niteliği şu ünlü ve tarifi zor özellikle, *entropi* ile ölçülür. Tarifi zor diyorum ama çok geçmeden entropinin enerjiye göre çok daha kolay anlaşılabilen bir kavram olduğunu göreceğiz; bunun nedeni de, enerji gündelik konuşmalarda herkesin dilindeyken entropi ağzını açıp da adını bile zor söylediği için ilkini eski bir dost olarak, ikincisini ise bir ejderha olarak düşünmemizdir. Bu bölümün amaçlarından biri de entropinin üzerine yapışp kalmış bu uygunsuz zorluk algısını ortadan kaldırarak onu gündelik konuşmalarda da hak ettiği yere getirmektir.

Genel hatlarıyla entropi, entropi ne kadar azsa niteliğin o kadar yüksek olması anlamında enerjinin niteliğinin ölçütüdür. Enerjisi özen ve dikkatle düzenlenmiş olan iyi bir kütüphane misali depolanmış bir cisim düşük entropiye sahiptir. Enerjisi rasgele yığılmış kitaplar gibi acemice, kaotik tarzda depolanmış bir cisim yüksek entropiye sahiptir. Entropi kavramı ilk kez 1856 yılında Rudolph Clausius tarafından ikinci yasayı ifade etme süreci içerisinde ortaya atılmış ve niceliksel bir kesinlikle ifade edilmiştir. Clausius bir sisteme enerji ısı olarak transfer edildiğinde gerçekleşen entropi değişimini tanımlayarak kavramı bize hediye etti.⁵ Tam olarak şöyle yazdı:

$$\text{Entropi değişimi} = \frac{\text{Isı olarak sağlanan enerji}}{\text{Transferin gerçekleştiği sıcaklık}}$$

Bu nedenle bir cisme oda sıcaklığında belirli bir enerji ısı olarak sağlanıyorsa bu formülle hesaplayabileceğimiz bir entropi

5 3. Bölümde ısının sıcaklıktaki farktan faydalanan bir enerji transferi yöntemi olduğunu gördük. Isıtma kaotik, rastlantısal bir ısıl hareketin uyarılmasına sebep olur.

artışı olur (paydada kullanılan sıcaklığın mutlak ölçekte olmasına dikkat edin). Siz oturduğunuz yerde bu cümleyi okurken çevrenize yayılan bir ısı üretiyorsunuz, dolayısıyla çevrenizdeki entropiyi çoğaltıyorsunuz.⁶ Aynı miktarda enerji ısı olarak aynı cisme daha düşük bir sıcaklıkta sağlanırsa, bu durumda entropi değişimi daha büyüktür. Enerji bir cisimden ısı olarak ayrılırsa, bu durumda “ısı olarak sağlanan enerji” negatiftir, dolayısıyla entropi değişimi negatiftir. Yani cismin entropisi ısı olarak enerji kaybettiğçe azalır, bir fincan kahvenin soğumasında olduğu gibi. Entropi değişiminin ısı olarak aktarılan enerjiden hesaplandığına, iş olarak transfer edilen herhangi bir enerjiden hesaplanmadığına dikkat edin. İş tek başına entropi üretmez ya da entropiyi azaltmaz.

Perdeleri açıp entropinin gerçekte ne olduğunu size göstermeden önce, kavramın Kelvin ve Clausius’un ortaya attığı yasaları gerçekten de birleştirip birleştirmediğini görelim. Aslında Clausius her iki ifadenin de *entropi asla azalmaz*⁷ ifadesinin altında toplanabileceğini önermişti. Önce Kelvin’in ifadesini düşünelim, bu entropi değişimleri diliyle şu demektir: “Motorunuz ancak biraz enerjii boşa harcarsa çalışacaktır.” Diyelim ki bütün ısıyı kullanan ve soğuk çukura ihtiyaç duymayan bir motor icat ettik. Clausius şöyle derdi:

Isıyı sıcak kaynaktan çıkardınız, dolayısıyla bu deponun entropisi düştü. Bütün bu ısı makine tarafından işe çevrildi, dolayısıyla enerji çevreye iş olarak girdi. Fakat iş entropiyi değiştirmez, dolayısıyla net sonuç sıcak kaynağın entropisinde azalmaz. Benim önermeye göre entropi asla azalmaz. Bu nedenle Kelvin’in de iddia ettiği gibi sizin motorunuz çalışmaz.

Şimdi Clausius’un ısının soğuktan sıcağa akmadığı şeklindeki ifadesini düşünelim. Diyelim ki ısının yanlış yönde aktığını gözlemledik, örneğin sobanın üzerine koyulmuş bir

6 Siz 100 wattlık bir lambayla eşdeğersiniz, dolayısıyla saniyede (yiyecek tüketme yoluyla) yaklaşık 100 joule enerji salıyorsunuz. Etrafınız 20°C ise (bu 293 K demektir), saniyede yaklaşık kelvin başına 0,3 joule hızla entropi doğuruyorsunuz.

7 Daha resmi söylenişle: Yalıtık bir sistemin entropisi kendiliğinden değişimlerle artar.

bardak suda buz oluştuğunu gördük. Bu durumda Clausius şöyle derdi:

Enerji soğuk cisimden (bardaktaki su) ısı olarak ayrıldı, dolayısıyla entropisi düştü. Sıcaklık düşük olduğu için ve sıcaklık benim entropi değişimi hakkındaki ifademde paydada yer aldığı için, entropideki bu azalış büyüktür. Aynı enerji sıcak bölgeye girer (sobanın iç kısmı), böylece bu bölgenin entropisi artar. Fakat sıcaklığı yüksek olduğu için entropideki bu artış küçüktür. Sonuç küçük bir artış ile büyük bir azalışın toplamıdır ve bu genelde bir düşüş anlamına gelir. Benim ifademe göre entropi asla azalmaz, dolayısıyla daha önce de söylediğim gibi ısı kendiliğinden soğuktan sığağa akmaz.

Clausius'un entropi yaklaşımındaki soyutlama düzeyinin dünyanın iki farklı yönüne işaret eder gibi görünen iki görgül yasayı gayet güzel yansıttığını görüyoruz: İkinci yasanın entropi cinsinden ifadesi Kelvin'in ifadesini temsil yönünden kendi etrafında dönerek kare gibi gözüken bir küp ya da Clausius'un ifadesini temsilyönünden altıgen gibi gözüken tek bir küptür. Clausius'un *entropi asla azalmaz* ifadesi deneyimin veciz bir özeti ve ikinci yasanın daha incelikli, daha soyut bir ifadesidir. Clausius'un kendisi de birinci ve ikinci yasaları beraber özetleyen o ünlü ikili önermesiniyle evrenin termodinamik şartını özetlemiştir:

Der Energie der Welt ist konstant; die Entropy der Welt strebt einem Maximum zu.

Yani, dünyanın enerjisi sabittir; entropisi de maksimuma ulaşmaya çalışır.

İkinci yasa ilk kez entropi cinsinden ifade edildiğinde ciddi bir muhalefetle karşılandı, çünkü çağın duyarlılıklarına ters düşüyordu: Evrenin enerjisinin sabit olduğunu kabul etmek kolaysa da (çünkü enerji ilk başta önemsiz insan müdahaleleriyle miktarı ne olursa olsun asla artırıp azaltılamayacak kutsal bir armağan olarak görülüyordu), bir şey nasıl bol bol artabilirdi? Nereden geliyordu, kaynağı neydi? Entropiyi evrene döken ve bu yolla kendiliğinden değişimin tekerlerini yağlayan kimdi ya da neydi? Karşıt örnekler bulunması için büyük çabalar harcanan

ama başarılamayan yasanın herkese yabancı gelen ruhu buydu. İkinci yasanın uygulandığı hiçbir yerde asla kuraldışı bir örnek olmuyordu. Öngörü amaçlı uygulamalar arasında sıcak cisimlerin çevrelerinin sıcaklığına ulaşana dek soğutulması (ve tersinin doğal olmayacağı için elenmesi) ve gazların elde ettikleri hacime kendiliğinden genleşmesi (ve tersinin elenmesi) gibi basit fiziksel süreçlerin kendiliğindenliğinin sınanması vardı. Yasa ayrıca bir cevherin eritilmesinde (demirde kullanıldığı gibi) karbon mu kullanılacağı, yoksa onun yerine (alüminyumda olduğu gibi) elektroliz mi kullanmak gerekir gibi, bir kimyasal tepkimenin hangi yönde ilerleyeceğinin tahmini için de kullanıldı. Yasa bizim hayat dediğimiz karmaşık madde özelliğini oluşturan girift biyokimyasal tepkime ağında da geçerlidir. Dokunmadığı hiçbir şey, başarısız olduğu hiçbir yer yoktur; günümüzde evrensel ve daimi geçerliliğe sahip mutlak bir istikrar abidesi olarak değerlendirilmektedir.

Bu ne anlama gelmektedir? Entropi denen bu şey nedir ve kendisinin azalma beceriksizliği ne anlama gelmektedir? Entropinin fiziksel önemi nedir? Kavramı nasıl içselleştirebilir ve dostumuz olarak görebiliriz? İkinci yasa Kelvin ve Clausius'un ifadelendirmelerinde somutlaşan evrenin işleyişini gayet iyi özetlemekte ve bize bir sürecin kendiliğinden olup olmadığını niceliksel olarak değerlendirmenin bir aracını sağlamaktadır. Fakat nihai bir açıklamadan çok, anlamaya açılan bir kapı gibidir. Kapıyı ittirmemiz, açmamız ve evreni bir yönde değil de diğer yönde hareket ettiren şeyi fiziksel olarak görmek zorundayız. Başka bir deyişle entropinin temelinde ne var ve ikinci yasanın derin yapısı nedir?

Şimdi yükleneceğimiz kapı maddenin moleküler temeline açılıyor. Bu dünyaya girdiğimizde her biri ortalama konumunun civarında salınan kademe kademe atomlar, moleküller ve iyonlardan (yükli atomlar) oluşan katılar görüyoruz. Sadece sıvı akarken değil aynı zamanda bir havuzda hareketsiz ve cansız yatar görünürken de birbiriyle itişip kakışan moleküllerden oluşan sıvılar görüyoruz. Görünüşe göre rasgele biçimde uçan, çarpışan, birbirinden seken ve hızla uzaklara giden moleküllerden oluşan

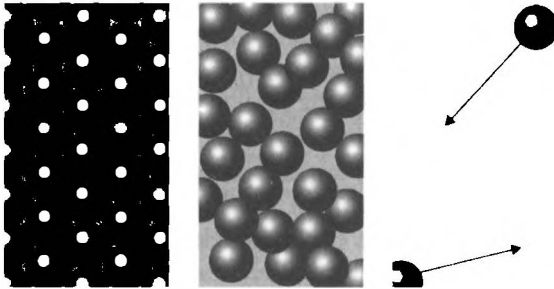
gazları görüyoruz. Entropinin yorumlandığı dünya burası ve entropi arttığında değişimin ona nasıl eşlik ettiğini görselleştirmeye buradan başlayabiliriz.

Miyop Avusturyalı fizikçi Ludwig Boltzmann (1844-1906) maddenin yapısını çağdaşlarının tümünden daha iyi görüyordu ve bu durum fikirlerinin anlaşılmaması ve reddedilmesine tepki olarak kendisini asana dek sürdü. Boltzmann entropinin düzensizliğin ölçüsü olduğunu gösterdi: Düzensizlik ne kadar büyükse, entropi o kadar büyüktür. Düzgün dizilmiş molekül sıralarıyla bir katı, birbirine yakın dizilmiş ama hayli hareketli molekülüleri olan sıvıya oranla daha düzenlidir ve katı içerisine eridiği sıvıdan daha düşük bir entropiye sahiptir. Molekülüleri serbestçe uçan gazlar da sıvılara göre daha düzensizdirler ve gazların entropisi buharlaştıkları sıvılara oranla daha yüksektir.

Entropi değişimleri ısının yanı sıra fiziksel durum değişikliklerini beraberinde getirir. Bu nedenle bir katıyı ısıttığımızda, erimeden önce sıcaklığı arttıkça molekülüleri etrafta daha bir şiddetle salınır ve bu düzensiz ısı hareket artışı için entropisinin de arttığı sonucuna varırız. Aynısı bir sıvıyı ısıttığımızda da geçerlidir, çünkü sıcaklığını arttırdıkça molekülüleri daha aktif hareket eder ve yuvarlanan, oradan oraya giden molekülülerin hepsi daha düzensiz hale gelir. Bir gazı ısıttığımızda molekülüleri daha yayımlı bir hızla hareket eder ve bu nedenle molekülüleri ısı hareketleri içerisinde daha büyük bir düzensizliğe sahip olurlar: Bir kez daha gördüğümüz üzere gazların sıcaklığını artırmak entropide bir artış doğurur. Bir gaz daha geniş bir hacmi kaplamak üzere genleştğinde, sıcaklığını aynı tutsak bile düzensizliği ve bu yüzden entropisi artar, çünkü molekülüleri aynı hız yayılımına sahip olmasına rağmen, bir molekülün kabın belirli bir küçük bölgesinde bulunacak olmasından daha az emin oluruz. Enerji bir sıcak cisimden ısı olarak kaçtığında, çevresindeki molekülülerin ısı hareketi enerji onların üzerine yayılırken artar ve çevrenin entropisi artar. Kısacası atomlarının artan termal hareketiyle bir varlığın ısı hareketi daha enerjik hale geldiğinde entropi artar. Entropi, atomlardaki uygun konumların dizilişi anlamında artıkça da artar.

Nerede artan düzensizlikle karşılaşıyorsak, orada artan entropiyle karşılaşırız (Şekil 4.7). Entropinin bu kadar basit bir kavram olmasının nedeni budur: Aklımızda tutmamız gereken tek şey onun bir düzensizlik ölçütü olduğudur. Basit örneklerin çoğunda bir değişiklik gerçekleştiğinde entropinin artıyor mu azalıyor mu olduğuna bir anlık bir düşünmeyle karar verebiliriz. Dikkat isteyen tek konu (ki termodinamikte hep düşünmemiz gereken kesinlikten kaynaklıdır) Clausius'un entropi hakkındaki vecizesini değişimin kılavuzu olarak uygulamaktır: Toplam entropi değişimi açısından düşünmek durumundayız, yani ilgili nesnenin ve evrenin geri kalanının toplam entropi değişimini düşünmeliyiz. İkincisinin yapılması görüldüğünden daha kolaydır, çünkü evrenin geri kalanının entropisi enerji onun içerisine ısı olarak kaçarsa artar, enerji ondan uzaklaşıp ilgili nesnenin içerisine ısı olarak aktığında azalır. Bir tek bunu aklımızda tutsak yeter.

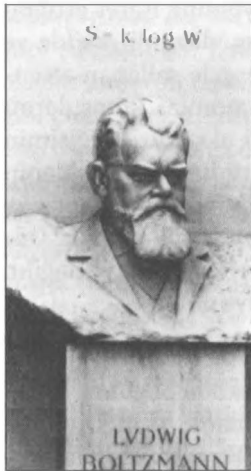
Entropinin evrene eklenmiş olan fiziksel bir şeyle artmadığını da belirtmemiz gerekiyor. Entropide bir artış dünyanın düzensizliğinde bir artışın, onun sabit enerji miktarının kalitesinde bir azalmanın yansımasıdır. Entropinin dışsal kozmik bir *kaynağı* yoktur; entropideki artış önceden sahip olduğumuz enerji



Şekil 4.7 Panolarda görülen üç örnekte entropi soldan sağa doğru ilerledikçe artar. Soldaki panoda bir katıdaki moleküllerin düzenli dizilişi resmedilmektedir: Bu örnekte entropi düşüktür. Ortadaki panoda bir sıvıdaki daha az düzenli molekül düzenlemesi görülmektedir: Bu örnekte daha yüksek bir entropi görülür. Sağdaki panoda bir gazın son derece kaotik yapısı resmedilmiştir (“gaz” ve “kaos” sözcükleri aynı kökenden gelir), moleküller rasgele bir şekilde oradan oraya savrulurlar: Bu örnek en yüksek entropiye sahiptir.

ve maddenin düzensizliğinde bir artıştır sadece. Bu itibarla entropi kavramının anlaşılması enerji kavramının anlaşılmasından çok daha kolaydır. Enerjinin somut bir tanımının yapılması çok zordur. Onun iş yapma kapasitesi olduğu ya da (9. Bölümde görüleceği gibi) bükülü uzayzamanın bir özelliği, hatta bükülmenin kendisi olduğu şeklinde şeyler geveleyebiliriz; fakat dürüst olmak gerekirse bu tanımların hiçbirisi kavramak için yeterince uygun somutlukta değildir. Öte yandan entropi bir meltem gibidir. Tek yapmamız gereken enerji ve madde dağılımındaki düzensizliği düşündürmektir, böylece kavrama niteliksel açıdan tamamen hâkim oluruz. Ne yazık ki Boltzmann, zamanındaki bilimcilerin kendisinin bu son derece basit ama derin kavrayışına ulaşamamaları yüzünden ölüme sürüklenmiştir (Şekil 4.8).

Entropinin bu moleküler yorumu, Clausius'un sağlanan ısı ve sağlandığı sıcaklık açısından ifade edilen entropi tanımından bayağı bir uzakta gibi görünebilir. Fakat bu ikisini hizaya getirip bu sayede Clausius'un tanımının temelinde de düzensizliğin yattığını görebiliriz. Aradaki bağlantıyı göstermek için kalabalık bir caddede hapşırma ile sessiz bir kütüphanede hapşırma benzetmesini yapmayı severim. Hapşırık düzensiz bir enerji girişine benzer, ısı olarak transfer olmuş enerji gibidir. Hapşırık ne kadar büyükse, caddeye ya da kütüphaneye dahil olan düzensizliğin de o kadar büyük olacağını kabul edebiliriz. "Isı olarak sağlanan



Şekil 4.8 Boltzmann'ın mezartaşında termodinamik kavramlarını atom ve moleküllerin hareketine bağlayan en önemli denklemlerden biri yazar. Denklem *entropi = sabit × mümkün atomik düzenlemelerin sayısının algoritması* şeklindedir. Atom düzenlemelerinin sayısı arttıkça (katıdan sıvıya, ardından gaza geçişte olduğu gibi) entropi artar. Bu formül aktardığımız niteliksel fikirlere kesin, sayısal, niceliksel bir biçim verir.

enerji”nin Clausius’un ifadesinde neden payda yer almasının esas nedeni de budur, çünkü ısı olarak arz edilen enerji ne kadar büyükse düzensizlik artışı o kadar büyüktür ve bu yüzden entropideki artış da o kadar büyüktür. Sıcaklığın paydada yer alması da bu benzetmeye uyar; verili bir ısı arzında, sıcaklık düşük olduğunda entropi daha çok, sıcaklık yüksek olduğunda entropi daha az artar. İçinde az ısı hareket olan soğuk bir cisim sessiz bir kütüphaneye karşılık gelir. Ani bir hapsirme büyük bir bozulma doğurur ve entropide büyük bir artışa karşılık gelir. İçinde zaten çok ısı hareket olan sıcak bir cisim de kalabalık bir caddeye benzer. Kütüphanedekiyle aynı büyüklükte bir hapsirik görece daha az etki yaratır ve entropi artışı küçüktür.

Şimdi artık ikinci yasanın ne demek istediğini görmeye başlayabiliriz. Entropinin herhangi bir doğal değişiklikte asla azalmadığını ifade etmek, *moleküler düzenin kendi arzusuyla asla artmadığını* söylemekle aynı şeydir. Rasgele dağılmış moleküller (bir toz bulutunda olduğu gibi) durup dururken kendi kendilerine Özgürlük Anıtı’nı oluşturmaz. Bir gaz kendiliğinden bir kabın köşesinde toplaşmaz. Geniş şekilde dağılmış enerji (sayısız atomun rasgele titreştiği sıcak bir masa üstündeki gibi) kendiliğinden küçük bir bölgeye akamaz: Soğuk bir masada bırakılan yumurta kendiliğinden pişmez.

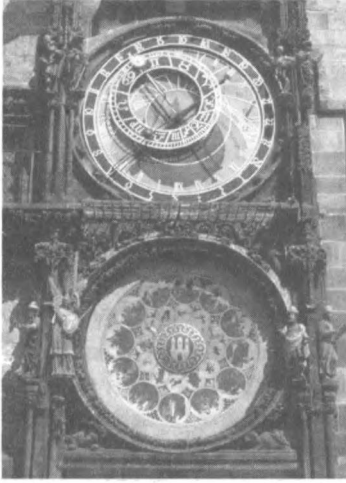
Şimdi de aktarılanlara tersten bakarak, kendiliğinden değişimin yön tabelasının niçin artan entropi yönüne işaret ettiğini görelim. Buradaki ana fikir sınırlandırılmış, düzenli madde ve enerjinin saçılma eğiliminde olmasıdır. Rasgele sallanan atomlar yeni yerlere göç etmeye meylederler; atomlar komşularını dürtükledikçe rasgele titreşimlerin enerjisi aktarılır. Değişimin doğal yönü daha büyük düzensizliğe doğrudur; bu maddenin konumunda düzensizlik ya da enerjinin konumunda düzensizlik olabilir, konumsal düzensizlik ya da ısı düzensizlik olabilir. Düzen doğal olarak düzensizliğe bozunur; enerji çözünür ve dağılır. İster beğenin ister beğenmeyin, dünya kötüye gider.

Dünyanın kötüye gitmesi, amaçsız bir şekilde bozulmaya uğraması, enerjinin kalitesinin bozulması termodinamiğin ikinci yasasında cisimleşen tek çarpıcı mesajdır. Etrafımızda olup bi-

ten bütün değişimlerin bu bozulunun dışavurumları olduğunu bilmek olağanüstü bir öngörüdür. İkinci yasanın ortaya serdiği evrenin kaynağı, enerji ve maddenin düzensizliğe girmesiyle evrenin durdurulamaz şekilde bozulmasıdır.

Bu kasvetli dünya görüşünde bazı problemler olduğunu düşünebilirsiniz. Evrenin yönü bozulmaya doğruysa, nefis yapılar, insanlar, soylu düşünce ve eylemler nasıl ortaya çıkabiliyor? İnsanlığın, özellikle de yeryüzünün üst yarımküresi olarak değerdendirdikleri daha az sıcak bölgelerindeki soluk benizli insan türlerinin sınır tanımaz gözüken gelişimini bir gurur ve motivasyon kaynağı olarak gören Victoria devri insanları arasında bu görüş elbette ciddi bir afallama yarattı. Hem efendiler hem de yönetilenler umutsuz bir bozulmaya acımasızca sürükleniyorsa eğer, erdemli imparatorluklar haklı amaçları uğruna başkalarına zorla uygarlık taşımaya nasıl devam edebileceklerdi? Meselelere hâkimiyetteki artış, Hogarthyen bir çukura çaresizce sürüklenen evrenin geleceğiyle nasıl boy ölçüşebilirdi? Bu yüzden ikinci yasa buhar makinesini öyle veya böyle açıklıyor olmasına rağmen, insanoglunun eylemlerinin özünü anlatıyor olamazdı, hatta hammam böceklerinininkini bile anlatamazdı.

Bu çelişkiyi çözmek için hiçbir değişimin izole bir faaliyet, bir faaliyet adası olmadığını anlamak gerek: Değişim birbirine bağlı olayların ağıdır. Bozulmaya sürükleniş bir yerde gerçekleşebiliyor olsa da, bu sürüklenişin sonucunda başka bir yerdeki yapı sıkılaşılabılır. Örneğin bir ağırlığın düşmesinin ayrıntılı bir olaylar zincirini tetiklediği Prag'daki astronomi saati (Şekil 4.9) gibi Ortaçağ saatlerini hatırlayalım. Ağırlık düşünce ve sürtünme enerjisini çevreye ısı olarak yayınca, toplamda bir enerji dağılması ve entropide artış yaşanır. Fakat ağırlığın aşağı doğru hareketi karmaşık dişli hareketleri yoluyla ayları, güneşleri, yıldızları ve havarileri göstermeye ayarlı olduğu için, düşüşü düzenli ve karmaşık (neredeyse amaçlı) bir sunum hissi yaratır. Saat işleyişini kendi isteğimizle göz ardı edersek düzenli olayların, yani havarilerin eylemlerinin doğal şekilde gerçekleştiği sonucuna varabiliriz. Fakat iç işleyişin bilgisine sahip olan bizler bunun doğal şekilde düşen bir ağırlığın harekete geçirdiği bir saat mekanizması olduğunu biliriz.



Şekil 4.9 Prag'daki mekanik saatten bir detay. Bu saat ikinci yasanın bir alegorisidir, zira sistematik olaylar gerçekleşiyor gibi gözükmesine karşın, bunlar başka bir yerde mekanizmayı çalıştıran ağırlık düşünce daha büyük bir düzensizlik yaratılmasıyla hareket eder. Yiyecekler ağırlık gibi, enzimler dişli çarklar gibi, bizim eylemlerimiz de şekillerin hareketleri gibidir. Bu özgür iradenin olmadığı anlamına gelmez, ama özgür iradeye izin veren argümanın açıklanması da bu nota sığmaz.

Prag'daki saat ikinci yasanın işleyişi için bir alegoridir. Etrafımızdaki dünyada bir yaprağın açılması, bir ağacın büyümesi, bir görüşün oluşması gibi incelikli olaylar gerçekleşebiliyor ve böylece düzensizlik düşüyor gibi gözükse de, bu tür olaylar asla bir şekilde dürtülenmeksizin gerçekleşmez. Bu dürtüleme başka bir yerde daha da büyük bir düzensizlikle sonuçlanır. Toplam sonuç, yapıcı olaydaki düzensizliğin azalmasından doğan entropi değişimi ile dürtükleyici, dağıtıcı olaydaki düzensizliğin artışından doğan entropi artışının toplamı entropide net bir artıştır, sonuçta genel düzensizlik artışının yaşanmasıdır. Bu nedenle nerede bir düzenin ortaya çıktığını görüyorsak, perdeyi kaldırıp başka bir yerde üretilen daha büyük düzensizliği görmek zorundayız. Bizler ve hatta tüm yapılar kaosu yerel indirgenmeleriyiz.

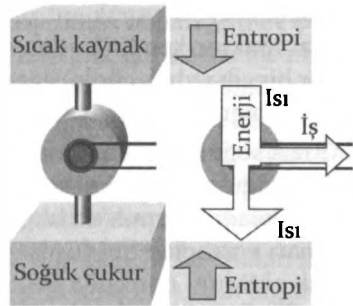
Burada 1. Bölümde ele aldığımız hayatın gelişimi konusuna bir başka bağlantı yakalıyoruz, örneğin erkeklerin göğüs ucuna sahip olması olgusu termodinamiğin ikinci yasasının doğrudan bir sonucudur diyebiliriz. İkinci yasanın belirttiği enerji kalitesindeki sürekli azalma şu anki biyosferin bileşenlerinin hepsinin ortaya çıkmasını dürttüleyen bir kaynaktır. Çok doğrudan anlamıyla söylersek, evrimleşen âlemlerin hepsi inorganik madde-den evrenin daha fazla kaosa batmasıyla yükselmiştir. Değişimin kaynağı amaçsız, hedefsiz bozulmadır; yine de birbirine bağlı

değişimin sonuçları maddenin olağanüstü enfes ve karmaşık şekilde çiçek açmasıyla oluşan ve bizim çim, sümüklü böcek, insan adlarını verdiğimiz şeylerdir. Erkeklerin göğüs uçları da hayvanların ortak kökenden gelmesinin ve ikinci yasanın doğayı ileriye doğru, ulaşılabilenle yetinerek, önceden ne olacağını görmeden, her zaman körce, bazen de uygunsuz bir uzun vadeli etki yaratarak harekete geçirmesi olgusunun sonucudur.

Başka bir yerde, düzenlilikte artışa yol açan daha büyük bir düzensizlik artışının yeri çok yerel ya da çok uzakta olabilir. Hatta içimizde bile olabilir. İçimizdeki saat düzeneği biyokimyasaldır, dişli çarklar demirden değil proteinden oluşur; ama yine de neredeyse tamamen aynı şekilde çalışır. Buhar makinesinin iç işleyişine de çok benzer. Bu yüzden entropi kavramına gözlerimiz açılmış halde şimdi buhar makinesine geri dönelim. Makinenin gerçekte ne olduğunu, onun soyut gövde yapısını ve özellikle de işleyişinde soğuk çukurun neden bu kadar önemli olduğunu göreceğiz.

Buhar makinesini ya da herhangi bir ısı motorunu iki aşamalı olarak düşünebiliriz (Şekil 4.10). Makinenin işleyişinde ilk aşama

Şekil 4.10 Buhar makinesinin (ya da herhangi bir ısı motorunun) işleyişinin termodinamik analizi. Enerji sıcak kaynaktan ısı olarak ayrılır ve bu sırada entropisini düşürür. Bu enerjinin bir miktarı işe çevrilir ve bunun entropi üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Kalan enerji soğuk çukura bırakılır, dolayısıyla epey çok bir entropi yaratır. Soğuk çukurun sıcaklığının sıcak kaynaktan daha düşük olması koşuluyla, ısı olarak atılan enerji sıcak kaynaktan alından daha az olsa bile toplam entropi artar. Alınan ve atılan enerji arasındaki fark, iş olarak elde edilir.



enerjinin sıcak depodan ısı olarak çekilmesidir. Depodan enerjinin kaybı entropisini düşürür, zira atomları şimdi eskisine göre daha az ısıl harekete sahiptir. Çıkardığımız enerji mekanizmadan (gerçek bir buhar makinesindeki piston ve silindir) akarak ısıyı işe çevirir ve soğuk çukura girer. Sıcak kaynaktan çıkardığımız enerjinin hepsi soğuk depoya girerse, o deponun entropisi artar. Fakat çukurun sıcaklığı kaynağından daha düşüktür olduğu için, entropideki artış ilk baştaki azalıştan daha büyüktür (sessiz kütüphane kıssasını hatırlayın). Toplamda cihazın entropisi artacaktır, çünkü kaynağın entropisindeki azalma, çukurun entropisindeki daha büyük entropi artışı tarafından giderilmiş ve aşılmıştır. Isının kaynaktan çukura akışı kendiliğindendir.

Şimdi olmazsa olmaz noktaya geldik. Şu ana kadar makine-miz hiç iş üretmedi ve eğer sıcak kaynağı soğuk çukurla doğrudan temasa sokacak olsaydık da aynı sonucu elde ederdik. Fakat sıcak kaynaktan enerji transferi, onun birazını (hepsini değil) işe dönüştürmüş ve kalanını soğuk çukurda biriktirmiş olsaydık bile yine kendiliğinden olmaya devam ederdi. Sıcak kaynaktan ısı olarak enerji çektiğimizde daha önce nasıl entropide bir azalma elde ediyorsak, yine aynı durumla karşı karşıyayız. Öte yandan da soğuk depoya daha düşük miktarda bir ısı bırakma yoluyla entropide dengeleyici bir artış elde edebiliriz. Örneğin soğuk çukurun sıcaklığı sıcak kaynağının yarısı kadarsa (mutlak sıcaklıklar kullandığımızda), bu durumda çekilen enerjinin sadece yarısının soğuk çukura girmesini sağlayıp diğer yarısını faydalı iş yapmak için kendimize ayırarak entropide dengeleyici bir artış elde edebiliriz. Makine kendiliğinden biçimde çalışır (yani faydalı, yapılabilir bir cihazdır), çünkü enerjinin bir miktarını iş olarak almamıza rağmen entropide genel bir artış vardır.

Artık soğuk çukurun olmazsa olmaz olduğunu görebiliyoruz. Sadece soğuk çukur varsa ve içine biraz enerji bırakılıyorsa entropinin toplamda artma olasılığı vardır. Sıcak kaynaktan enerjinin alınması entropide bir düşüşe karşılık gelir. Enerjinin çevreye iş olarak aktarımı entropiyi değiştirmez, dolayısıyla hikâyenin bu aşamasında entropide toplam bir azalma vardır. Makinenin kendiliğinden biçimde çalışması için (ve kendiliğinden çalışmayan, yani tahrik edilmesi şart olan makinelere de faydasız demek bile

az kalır) entropide toplamda bir artış olmasını güvenceye almak üzere bir yerlerde bir miktar entropi üretilmesi olmazsa olmazdır. Soğuk çukurun rolü de budur: Sessiz kütüphane rolü oynar, içerisine çok az miktarda enerji salınmış olsa bile entropide büyük bir artışın yaşandığı yerdir. Fakat taşıdığı önemi unutmayalım: Motorun çalışabilir olması için bir “israf” ve bu israf için bir kabın olması zorunludur. Soğuk kaynak gerçekten de motorun çalışabilirliğinin kaynağıdır, çünkü o olmadan entropide artış olamaz.⁸

Buhar makinesi herhangi bir süreçten iş elde etmek için (yapıcı bir çaba) bir enerji israfının da olması gerektiği gerçeğine işaret etmektedir. Enerjiyi kaynaktan çekip almak yetmez: Motorun çalışmasını sağlamak için, soğuk çukuru (ki bunun motor ya da makinenin ille de imal edilmiş bir parçası olması gerekmez, bu sadece çevre de olabilir) kışkırtmak amacıyla biraz ısı çarçur etmelisiniz. Nerede bir yapım, nerede yapılmış bir şey görüyorsak, en azından aynı büyüklükte bir yıkımın ona eşlik ettiğini görüyoruz.

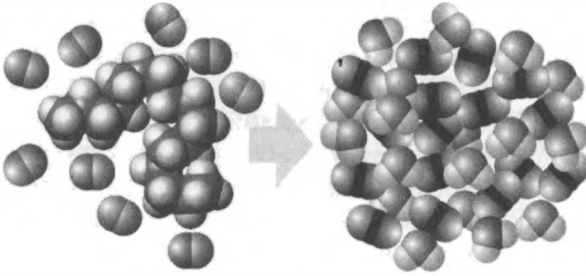
Şimdi de dünyada olup biten değişikliklerin bazılarını bakalım ve yapıcı olmalarına karşın yaşamalarını başka bir yerdeki yıkıma borçlu olduklarını görelim. Önce dış dünya. Bütün inşaat faaliyetlerinde, örneğin duvar inşaatını ele alalım, taşların yerlerine konulması gibi yapılması gereken işler vardır. Bu işin başarılması için bir makinenin kullanılması gerekir (aynısı eğer hayvan bedenleri kullanılıyorsa yiyeceklerden güç alan kas-makineleri için de geçerlidir) ve makinenin çalışabilir olması için de çevreye enerji salınması sonucu entropi üretilmesi gerekir. Bu nedenle bir kaldırma makinesi, yani bir tür ısı motoru çevresine enerji saçarak çalışır. Aynısı kaldırma düzeneği elektrikliyse de geçerlidir, bu sefer enerji yayılımı uzak bir güç santralinde gerçekleşir. Dünyadaki bütün yapay yapılar, devasa piramitlerden en küçük barakalara kadar hepsi enerji dağılmasına dayanarak inşa edilmiştir.

Sıcak kaynağın sıcaklığını yükseltmek için kullanılan kimyasal tepkimeleri düşünme yoluyla enerji dağılmasının başarılısına

8 Motoru çalışabilir kılmak için israf edilmek zorunda olunan enerjinin sıcak ve soğuk depoların sıcaklıklarının oranına bağlı olduğunu ve bu yolla Carnot'nun 2 numaralı dipnotta aktarılan verimlilik ifadesinin çıkarsanabileceğini göstermeyi size bırakıyorum.

daha yakından bakabiliriz. Bu tartışmada geleneksel bir buhar makinesine yoğunlaşacağım, çünkü içten yanmalı motorların çalışma prensibi bu işlem açısından aynı olsa da, teknolojik olarak çok daha karmaşık bir biçimde gerçekleştirilmektedir ve ayrıntılarla dikkatinizi dağıtmak istemiyorum. Buhar makinesi *dıştan* yanmalı bir motordur, ateş suyu pistonun dışında ısıtır, dolayısıyla olayların sırasının takibi daha kolaydır.

Yakıtın benzin, Şekil 4.11'de gösterilen on altı karbon atomu uzunluğundaki zincir gibi bir hidrokarbon (sadece karbon ve hidrojenden oluşan bileşikler) karışımı olduğunu düşünelim. Bu benzin ve dizel yakıtlarda görülen tipik moleküldür; ayrıca ette görülen ve hem kas liflerini kayganlaştıran hem de yalıtım tabakası ve yakıt rezervi işlevi gören yağ moleküllerinin de çok yakın akrabasıdır. Bizlerin, içimizden bazılarının daha çok olmak üzere bu dizel yakıta akraba, ona çok benzeyen yiyecekleri yememiz tesadüf değildir, ama düşüncesi de biraz iç karartıcıdır.



Şekil 4.11 Bir heksadekan molekülü (solda gösterilen molekül kümesinin merkezindedir) yakıtlarda ve yiyeceklerin yağlarında bulunan hidrokarbon moleküllerine örnektir. On altı karbon atomuna (koyu küreler) bağlanmış otuz dört hidrojen atomundan (küçük soluk küreler) oluşan bir zincirdir. Molekülleri kırırdanıp debelenen komşularının yanından yuvarlanırken kırırdanıp debelenir şekilde düşünün. Bu molekül yandığında ona oksijen molekülleri saldırır, karbon atomları kaçışır ve böylece on altı ayrı karbondioksit molekülüyle hidrojen atomları on yedi ayrı su molekülü olarak toplaşır (sağda). Konumsal düzensizlikte büyük bir artış olur. Dahası atomlar arasında ilk baştaki hallerinden daha güçlü bağlar oluştuğunda çevreye de ısı bırakılır. Sonuç olarak yanmaya büyük bir entropi artışı eşlik eder.

Yağ yandığında çizimde görülen moleküllere havadaki oksijen molekülleri saldırır. Bu saldırı sonucunda karbon zinciri kırılır ve hidrojen atomları kopar. Karbon atomları uzağa taşınır ve karbondioksit molekülleri ve hidrojen atomları su molekülleri oluşturarak uzaklaşırlar. Önemli miktarda bir ısı oluşur, çünkü atomlar arasında oluşan yeni bağlar yakıttaki ve oksijendeki eski bağlardan daha güçlüdür, dolayısıyla eski zayıf bağların yerini güçlü bağlar alınca ve atomlar enerjik açıdan daha olumlu düzenlemelere yerleşince enerji salınır. Peki hidrokarbon neden yanar? Yanar, çünkü yanınca düzensizlikte dev bir artış ve dolayısıyla entropide dev bir artış olur. Entropideki bu artışa katkıda bulunan iki ana etmen daha vardır. Biri enerji salınımıdır, çevreye dağılır ve çevrenin entropisini yükseltir. Diğeri madde yayılımıdır, uzun düzenli atom zincirleri parçalanır ve tekil atomlar yanma alanından uzağa küçük gaz şeklinde moleküller olarak saçılırlar. Yanma ikinci yasanın içeriğine uygun bir görünüm sergiler.

Şimdi bir anlığına yanmada serbest kalan enerjinin alevle sınırlı olduğunu düşünelim. Yanan yakıtın sıcak bölgesi ısıtmak istediğimiz suyla metal duvarlar yoluyla temas etmektedir. Alevin içindeki atomların şiddetli itiş kakışı yüksek bir sıcaklığa karşılık gelir. Suyun nazik itiş kakışı düşük bir sıcaklığa karşılık gelir. Isı sıcak bir cisimden soğuk bir cisme aktığında dünyanın entropisinin arttığını daha önce görmüştük, dolayısıyla bizim yanmamızdan suya doğru gerçekleşen enerji akışı entropi arttırıcı, kendiliğinden bir süreçtir.

Şimdi su sıcak ve ilkesel anlamda sıcaklığı alevin kendisi kadar sıcak olacak kadar aratabilir. Fakat suyun sıcaklığı artarken suyun kaynadığı noktayla karşılaşırız. Neden böyle olur? Çünkü sıcaklık suyun “kaynama noktası” dediğimiz belirli bir değere ulaştığında elbette kendiliğinden bir süreç olarak buhar oluşumu gerçekleşir.

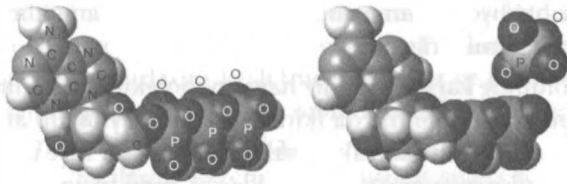
Suyun neden kaynadığını anlamak için gerçekleşen entropi değişimlerini incelememiz gerekir. Burada kaynamada görülen komik bir özelliği, farklı bir termodinamik bakış açısını keşfeceğiz. İlk olarak su buhara dönüştüğünde entropi değişimine birbiriyle çatışan iki ayrı katkının gerçekleştiğini belirtelim. Sıvı gaz haline geldiğinde büyük bir entropi artışı olur. Bu artış suyun

buharlaşmaya her zaman eğilimli olduğu düşüncesini akla getirir. Oysa suyun buharlaşması enerji gerektirir, çünkü bağımsız moleküllerden oluşan bir gazı dönüşebilmek için sıvıyı bir arada tutan su molekülleri arasındaki çekimin alt edilmesi zorunludur. Bu nedenle su buharlaşırken sıvının içine enerji akması şarttır. Bu içe akan enerji çevrenin entropisini düşürür, çünkü bu onlardan dışarıya akan bir enerjiye karşılık gelir. Düşük sıcaklıklarda bu enerji dışı akması sonucu çevredeki entropi azalması çok büyüktür (sessiz kütüphane örneğı yine) ve buharlaşırken suda bir entropi artışı olmasına rağmen toplamda entropide bir azalma gerçekleşir. Bu nedenle düşük sıcaklıklarda buharlaşma kendiliğinden değildir. Fakat çevrenin sıcaklığını artırdığımızda çevrenin entropisinde düşüş daha küçük hale gelir (kalabalık cadde misali) ve yeterince yüksek bir sıcaklıkta suyun ve çevrenin entropisindeki toplam değışim pozitif değıer kazanır. Artık su kendiliğinden buharlaşma eğilimine sahiptir ve kaynar. Karşılaşacağımızı söylediğimiz komik özellik de budur. Sıcaklığı arttırmanın etkisinin, çevrenin entropi değışimini toplam entropi değışiminin pozitif olduğu noktaya dek azaltmak olduğunu görüyoruz. Sanki buharlaşmayı başarmak için çevrenin kısıtlayıcı etkisini, sıcaklığını arttırma yoluyla dindirmek durumunda gibiyiz.

Hikâyemizin bu noktasına dek ikinci yasa üç kez karşımıza çıktı: Yanmayı yönetirken, alevden suya ısı akışını yönetirken ve suyun buharlaşmasında. Şimdi de dördüncü kez sahneye çıkıyor: Enerjinin makinenin içinden akışı ve bir bölümünün işe çevrilmesi. Bu aşamayı daha önce ele almıştık ve tekrar üzerinden geçmemize gerek yok. Öte yandan bu tartışmada vurgulanmak istenen esas nokta, yakıtın yanmasından dış değışim üretmeye dek motorun işleyişinin her bir aşamasına madde ve enerjinin dağılmaya olan doğal eğilimi tarafından yol açılmış olmasıdır. Dünya bu evrensel düzensizliğe düşme eğilimi sayesinde hareket etmektedir. Bizler ve bütün eserlerimiz, bütün başarılarımız nihayetinde bu amaçsız, doğal, artan, büyük düzensizliğe yayılmanın sonuçlarıdır.

Yemek yemek zorunda oluşumuzun nedeni de elbette budur. Çevreye yayabildiğimiz kadar enerji arzını bedenlerimizde gerçekleştiren ayrıntılı metabolik işlemlerden geçirerek sindirmek zorundayız. Bu enerji yayıldıkça, örneğin kendimizi yenilerken ya da bu cümleleri kurarken, dünyanın biraz daha düzensiz olmasına yetecek düzeyde bir düzensizlik yaratır. Yemek yeniden yakıt elde etmekten daha karmaşık bir eylemdir, çünkü arabalarımıza güç veren yakıtlardan farklı olarak bizler onarım ve büyüme için epey bir sindirilmiş madde kullanırız. Fakat yiyecekler enerji kaynağı olmanın yanı sıra içimizdeki buhar makinesinin sıcak deposuna atılan odun gibidir ve sindirilmiş enerjinin birazının boşa harcanarak israfı gereğince bizleri ve eylemlerimizi güdüleyerek harekete geçirir.

İçimizdeki buhar makinesi (ya da en azından onun soyut özü) bütün hücrelerimize dağılmıştır ve on binlerce değişik biçim alır. Biz biyolojik buhar makinesinin sadece bir gerçekleştirimine bakacağız. Çizimden de görebileceğimiz üzere (ATP, Şekil 4.12) bu molekül fosfat gruplarından (fosfor atomlarını çevreleyen oksijen atomları) oluşmuş kısa bir kuyruk ve güçlü kuvvetli bir kısımdan ibarettir. Bizim açımızdan asıl işi yapan kısım fosfat kuyruktur. Bu molekül buhar makinesindeki sıcak depoya benzer. Hücredeki enzimlerin isteğiyle harekete geçtiğinde sondaki fosfat grubundan kurtulur ve bunun sonucunda adenosin difosfat, ADP halini alır. Serbest bırakılan enerji, hücre içerisinde bir



Şekil 4.12 Adenosin trifosfat (ATP, solda) ve adenosin difosfat (ADP, sağda) molekülleri içimizdeki kavramsal buhar makinelerinin sıcak ve soğuk depoları olarak davranırlar. Fosfat grubunun yeniden bağlanmasıyla ADP'den tekrar ATP oluşturmak için motoru (daha fazla entropi üretme anlamında) daha da güçlü bir motorla eşleştirmemiz gerekir. Yani yememiz gerekir. Ve yediğimiz yiyeceklerin yetişmesi için de Güneş'in (kendi nükleer yoluyla) parlaması gerekir.

proteinin inşası ya da bir sinyalin iletimini sağlayan bir nöronun hazırlanması gibi yapıcı olaylara güç sağlamak için kullanılır. Isıl düzensizliği dürtüleyen tepkimenin ileri doğru devinmesi madde israfı (fosfat grubun serbest bırakılması) ve enerji israfından kaynaklanır. Bu nedenle bir proteinin inşasının ya da bir görüşün oluşumunun izi, bu çok küçük buhar makinesini andıran şeye dek sürülebilir.

Hücrenin ve bizlerin yaşamaya devam etmesi için bir fosfat grubunun (aynısı olması şart değil) tekrar ADP'ye bağlanarak ATP'yi yeniden oluşturması gerekir. Bu yeniden inşa, yeniden bağlanmayı etkileyen tepkimenin daha güçlü bir buhar makinesiyle, maddeyi ve enerjiyi daha da yoğun şekilde israf eden başka bir metabolik tepkimeyle birleşmesi yoluyla başarılabilir. Bu yüzden yemek yememiz gerekir. Bizler ADP'den ATP'nin oluşmasına yol açan buhar makinesi için yakıt görevi gören malzemeleri sindiririz ve bu da büyümemizi ve etkinliklerimizi olanaklı kılar.

Bu yemeğin kendisinin de onu daha güçlü kavramsal buhar makineleri, daha da verimli israf yapan makineler haline getiren tepkimelerin birleşmesiyle yapılmış olması gerekir. En üst düzey buhar makinesi Güneş'tir, çünkü Güneş'in çevresine sarf ettiği enerji fotosentezi, karbondioksit ve sudan karbonhidratların oluşumunu sağlayan tepkimeleri sağlar. Dolayısıyla nihayetinde eylem ve etkinliklerimize, çekirdeklerin Güneş'in içerisinde kaynaşmasıyla serbest bırakılan enerji tarafından hareket kazandırılır. Eski uygarlıklar yaşamın kaynağı olarak Güneş'e tapmakta belki de haklıydılar; ama onun evrensel bozulmanın da itici gücü olduğunu bilmiyorlardı.

2. Bölümde karşılaştığımız hayatın moleküler temeline ilişkin aynı tipteki aydınlanma da ikinci yasadan kaynağını alır. Yaşam moleküllerin etrafta sarsak sarsak dolanarak bir nişe uyacak doğru şekli bulmaya uğraştığı ve yüklerini bırakmayı başardığı bir süreçtir. Üremenin moleküler temelinde moleküllerin ve enerjinin bilinçsiz etkinliklerini görürüz. Yaşam bu sarsak dolanma doğal seçim olanakları sunduğu için başladı; moleküllerin bu kör, bilinçsiz, yönlendirmesiz, sarsak dolanışının bizim canlılık dediğimiz müthiş etkinlikler ağını kurma olanağını sunmasıyla mümkün oldu. Yaşam kökünde moleküler bir sarsaklıktır.

Bu noktada akla gelen soru bu madde ve enerji yayılımının sonusuz dek sürmeyi başarıp başaramayacağıdır. Yoksa evren entropinin artık artamayacağı kadar, sonsuz derecede düzensiz hale gelecek ve olaylar sona mı erecektir?

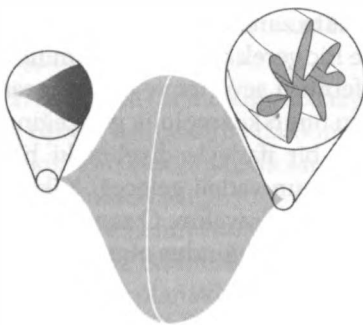
Olayların doğal akışının entropinin zirveye ulaşmasıyla sonlanması şeklindeki spekülatif düşünceye evrenin ısı ölümü denmektedir. Ondan sonra, artık işler daha da kötüye gidemeyeceği için hiçbir şey olmaz. Açıklık getirilmesi gereken bir nokta var: Evren ısı ölümüne yenik düşerse eğer, bu zamanın da sona erdiği anlamına gelmez. Olaylar devam eder (atomlar atomlarla çarpışır) ama net değişiklik olmaz. Bütün buhar makineleri, kavramsal olanları da, gerçekten var olanları da hepsi, artık entropi üretilmiyor olduğu için hareketsiz ve çalışmıyor olacak. Kimileri de biraz daha iyimser bir görüş ileri sürüyor ve eğer evren büzüşmeye başlayacak olursa, enerji ve maddenin alanı daha kısıtlanmış olacağı için entropinin de düşeceğini söylüyor. Bu nedenle olayların tersine döneceğini, anti-Kelvin'lerin ve anti-Clausius'ların hükümdarlığının başlamasıyla buradan sıçranarak entropinin yeniden canlanan bir evrende tekrar artacağını düşünüyorlar.

Biraz bu meseleleri aydınlatmaya çalışalım. İlk olarak 8. Bölümde daha ayrıntılı ele alacağımız şu anki egemen görüşü, evrenin kendi üzerine çökmeyeceğini, büzüşmesi sonucu gerçekleşecek bir Büyük Çöküşün olmayacağı görüşünü kabul edelim. Dolayısıyla evren kendi üzerine çökmeye başladığında doğal olmayanın doğal olmasıyla pratikte zamanın bir şekilde tersine dönmesi olasılığını dert etmeye hiç gerek yok. Fakat bilim insanları düşüncenin sınırlarını keşfetmeyi severler ve bizim evrenin termodinamik geleceği sorusunu onun kozmolojik geleceğinden ayırtılabilmemiz gerekir. Başka bir ifadeyle diyelim ki bizim (yani evrenbilimcilerin) evrenin uzun vadeli geleceği hakkında yanlışlığımızı ve gerçekte çökeceğini varsayalım. O zaman ne olacak? Doğal yerini doğal olmayana, kendiliğinden olmayan kendiliğindene mi bırakacak?

Hayal gücü kuvvetli ve son derece görsel Britanyalı matematikçi Roger Penrose (d. 1931) çöken evreni doğrudan karşısına alıp bakarak entropiye kütleçekimsel bir katkı olabileceğini ile-

ri sürmüştür. Başka bir deyişle düzensizlik sadece uzayzamanın içindeki şeylerin dağınık hallerinden değil de, doğrudan uzayzamanın yapısından kaynaklanıyor olabilir. İlk başlangıç anının, Büyük Patlamanın tekilliğini kabul etmekte, ama son anın, Büyük Çöküşün tekilliğinin çok daha karmaşık bir yapıya sahip bir nokta olduğunu düşünmektedir (Şekil 4.13). Bu nedenle son günlerinde görünür evrendeki bütün madde ve enerjinin yeniden tek bir noktaya sıkışması ve bu sayede son derece düşük bir entropiye sahip olmaları mümkün olsa da, içerisinde yer aldıkları uzayzamanın yapısı o kadar karmaşıktır ki düzensizlik ilk yaratılış anındakinden daha büyük olabilir. Dolayısıyla entropi bundan sonrasında da sonsuza dek, sonsuzluk (ya da en azından birkaç on milyar yıl) geriye baktığında bizi bir tekillikte görüyor olsa bile, artmaya devam edecektir.

Bununla beraber kâinatın daha özelliksiz ve olası geleceği, genişlemesinin sürekli artması ve ölçeğinin sınırsız büyümesidir. Böyle bir senaryoda enerji ve maddenin yayılımı için her zaman daha fazla yer vardır. Maddenin tümü bozunuma uğrayarak ısınıma dönüşse bile, bu ısımanın entropisi kapladığı hacim arttıkça kademeli şekilde artacaktır. Esas problem şu ki eğer maddenin tümü ısınıma bozunacaksa ve tüm bu ısıma uzanarak sonsuz dalgaboylarına dönüşecekse, böylece uzak gelecekte yalnızca evrensel olarak enerjisiz, ölü, düz uzayzaman olacaksa, bu du-



Şekil 4.13 Bir Büyük Çöküşe doğru ilerliyoruz olsak bile, evren büzüşmeye başladığında entropinin tekrar azalmaya başlamasını beklememeliyiz. Son tekilliğin (sağda) ilk tekillikten (solda) çok çok daha karmaşık olması ve böylece evrenin entropisinin kendisi büzüşüyor olsa bile artmaya devam etmesi anlamında entropiye kütleçekimsel bir katkının var olduğu düşünülebilir.

rumda ilk bakışta sanki evrenin entropisi sıfır olacak gibi gözük-mektedir. Fakat kozmolojik uzunluk ve zaman ölçeğinde fizik an itibarıyla kesinleşmemiş bir konudur ve o durumda ulaşılabilen olağanüstü uzay hacmindeki bir enerji yoğunluğu dalgalanması saçılımının bile toplam entropinin aşırı derecede büyük olmasını güvence altına almaya yetmesi mümkün olabilir. Bu henüz yanıt-lanmamış bir sorudur.

Kütleçekim ile entropi arasında çok acayip bir ilişki vardır. İlk bakışta Einstein'ın kütleçekim teorisi (9. Bölümde ele alacağımız) genel görelilik kuramı ile ikinci yasanın işleyişi arasında şu ana dek entropiye kütleçekimsel bir katkı olabileceği dışında pek bir bağlantı olmayacağı düşünülebilir. Fakat uzayzamanın yapı-sını entropi açısından düşünmeye başladığımızda dikkate değer bir olgu göze çarpar. 1995 yılında Ted Jacobson, Clausius'un bir bölgeye ısı girdiğinde yaşanan entropi değişimine ilişkin ifadesi ile bölgeye bağlanan yüzeyin alanıyla entropinin ilişkisi hakkın-daki (aslında bir kara deliği çevreleyen yüzey olduğunda bu iki-si arasında bir orantı vardır) bir savı birleştirirsek, bu durumda uzayzamanın yerel yapısının tam olarak Einstein'ın genel görelilik denklemlerinin öngördüğü şekilde şekil değiştirdiğini ispatla-dı.⁹ Başka bir deyişle, biraz daha rafineleştirilmiş bir matematik-sel anlamda ikinci yasa Einstein'ın genel görelilik denklemlerinin varlığına işaret etmektedir!

Dolayısıyla belki de buhar makinesi sadece içimizde değil, her yerdedir.

9 Makaleye şuradan erişilebilir: <http://xxx.lanl.gov> and the subdirec-tory gr-qc

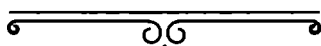
5 ATOMLAR

MADDENİN İNDİRGENMESİ



BÜYÜK FİKİR

Madde atomlardan oluşur



*Doğanın her şeyi yarattığı kaynak olan atomları
açıklayacağım...*

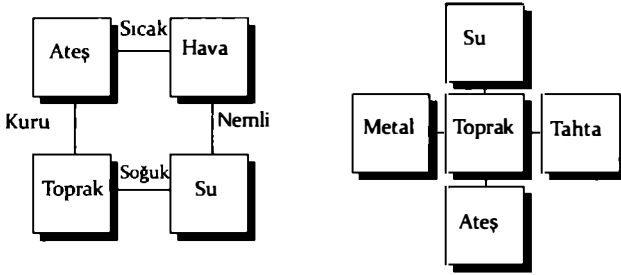
LUCRETIUS

Değişimin dış göstergelerini biyosferin ortaya çıkışında, bu değişimin iç mekanizmalarını da genetiğin moleküler temelinde gördük. Değişmeyen şeyi, enerjiyi gördük; şeylerin neden değiştiğini de entropi yönünden gördük. Şimdi değişimin maddi temelini daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz ve böylece fillerden elementlere geçiş yapacağız.

Bilim maddenin yapısı hakkında, maddi her şeyin yapıldığı şey hakkında ne söylemektedir? Bu çok önemli sorunun cevabını iki aşamada inceleyeceğiz. Bu bölümün konusu olan birincisinde yüzeysel bir düzey olduğu zamanında bilinmeyen ama şimdi ortaya çıkan konuyu inceleyecek ve kimyadaki söylemin temel birimi olan atom kavramının ortaya çıkışını anlatacağız. Farklı

atomların niçin bizim *kimyasal özellikler* dediğimiz farklı kimliklere sahip olduğunu göreceğiz. Bu bölümden kimyayla ilgili olduğu düşüncesiyle soğumayın. Kimya algıladığımız varlıklar dünyası ile tahayyül ettiğimiz atomlar dünyası arasındaki köprüdür ve konuyla ilgili okullarımızdan bizlere yâdigar kalmış ürpertici anılara rağmen, üzerine derin derin düşünmeyip (burada yapıldığı gibi) seçmece okumalar yapıldığında bile son derece büyüleyici ve aydınlatıcı bir alandır. Etrafınızdaki dünyaya gözlerinizi açmanız ve aldığınız hazzın kendiliğinden derinleşmesi için biraz kimya dersi girişi de yapmayı düşünüyorum. Ardından bir sonraki bölümde atomların yüzeyselliğinden ayrılıp madde dediğimiz kavram kuyusunun dibine doğru daha derin dalışlar yapacağım. Ardından maddenin aslında ne olduğunun anlaşılmasına doğru, Yunanları bile memnun edebilecek şekilde ilerleyeceğiz.

Yunanlar madde hakkında bayağı bir düşündüler ve yapısı hakkında o kadar farklı iddialar ortaya attılar ki bunlardan en azından birinin doğru çıkması beklenebilirdi. İddialarının bazıları tamamıyla yanlıştı ama övgüyü hak eden bir araştırma ruhu taşıyordu. Bu nedenle halkın kafasında felsefenin kurucusu olarak kabul gören Miletli Thales (yaklaşık olarak MÖ 500) ölümünden kısa süre önce yüksek dağlarda fosil deniz kabukları



Şekil 5.1 Çok eski iki periyodik elementler tablosu. Soldaki grafik antik Yunanlarca bütün maddelerin temeli olduğu varsayılan dört elementi ve bu elementlerin oluşturdukları malzemelere kattığı özellikleri gösteriyor. Sağdaki grafik bunun Lao Tzu (yaklaşık olarak MÖ 600) tarafından geliştirilmiş olan Taocu bakışla ortaya çıkarılmış bir Çin versiyonu ve buradaki beş element *yang* (erkek, pozitif, sıcak, aydınlık) ile *yin* (dişi, negatif, soğuk, karanlık) arasındaki mücadelenin sonucunda ortaya çıkmış.

bulunca her şeyin sudan yapılmış olduğu sonucuna vardı. Bin yıl sonra bu görüş kendisini Kuran'da buldu:

Her canlı şeyi sudan oluşturduk; hâlâ iman etmeyecekler mi?

Kimilerinin gözünde kaynağının büyüklüğü bu görüşün geçerliliğine bugün bile izin veriyor. Fakat Yunanlar tek bir tözün dünyadaki tüm bu varlık çeşitliliğine sebep olmaya yetmeyeceği düşüncesiyle kavrama çabalarını sürdürdüler. Böylece Efesli Heraklitos (yaklaşık olarak MÖ 540-475) bir değişim etkeninin gerekli olduğu sonucuna vararak Thales'i geliştirdi ve varlıklar kazanına ateşi ekledi. Kısa süre sonra Sicilyalı Empedokles (yaklaşık olarak MÖ 492-432) katılığın yalnızca su, hava ve ateşten yapılmasının zor olduğunu düşünerek eski karışımı bir de toprak ekleyerek geliştirdi ve hava, toprak, ateş ve sudan her şeyin yapılabileceğini ileri sürdü ve muhtemelen buna da inandı (Şekil 5.1). Empodekles'in dünyayı kendi dört elementine indirgemesinin ardından Aristoteles (MÖ 384-322) evinde oturduğu yerden ayın altındaki yeryüzünün, bu değişim ve bozunum tiyatrosunun ebedi göksel küreden oldukça farklı olduğunu ve Empodekles'in öğelerinin ilkinde uygulanabileceğini ama ikincisi için yeterli olmayacağını öne sürüyordu. Zamansız, muhteşem göksel küre için Aristoteles beşinci bir bileşenin, bir *quintessence*'in (beşinci öğenin) gerekli olduğu düşüncesindeydi.

Elbette bunların hepsi, bu maddelerin (varsayımsal olan ve deneysel olarak ulaşılamaz olanı hariç belki) hiçbir element olmadığı için ve de göklerin beşinci elementinin var olmadığını bildiğimiz için tamamen yanlıştı. Fakat karmaşıklığın basitlikten çıktığı kavrayışının oluşturulması ve özenle ayrıntılandırılması kavramsal açıdan son derece önemli bir adımdı ve bu tutum halen daha modern bilimin merkezinde yer almaktadır.

Yanlış elementler olmasına karşın elementlerin ya da öğelerin varlığının kabulü bizi bu bölümün temel sorusuna taşıyor: Madde sürekli midir, ayrık mı? Bir başka deyişle elementler giderek daha küçük parçalara *ad infinitum* bölünebilir mi, yoksa ayrık mıdır, zira ayrıksa kese kese en sonunda kesilemez olana, atoma ulaşabiliriz. Deneysel verilerin yokluğunun getirdiği özgürlükle

1 Kuran, Enbiyâ Suresi 30. Ayet

Yunan düşüncesi zenginleştirdi ve her iki fikir de kendi savunucularını yarattı. Bu görüşlerden birinin, atomcu görüşün haklı çıkması onu savunanları özellikle beğenmemizi şart koşturamaz, çünkü destekleyişleri tuhaf spekülasyonlara ve felsefi zevklere dayanıyordu ve her ikisi de şu anda bilimsel yöntem ve gerçeği arayışın güvenilir bileşeni olarak kabul görmüyor.

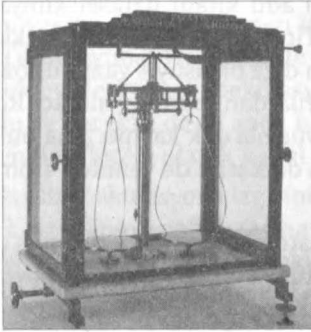
Şanslı spekülasyon çizgisini maddeyi tanecikli olarak, kesicinin kesmesinin sonlanmasına işaret eden atomlardan oluşmuş olarak hayal eden Miletli Leukippos'a dek (olgunluk dönemi MÖ 450-420) geri götürebiliriz. Leukippos'a göre ancak kesilebilirliğin bir sonu olursa madde ebedi olabilirdi, çünkü aksi halde her şey çok öncesinde hiçbir şeye çözülmüş olurdu. Fakat onun atom görüşü bugün geleneksel bulduğumuz görüşten çok uzaktı. Atomları çok çeşitli şekil ve boyutlarda hayal ediyor, neredeyse her bir farklı madde için farklı atomların olduğunu düşünüyordu. Bu görüş onun öğrencisi "gülen felsefeci" Abderalı Demokritos (yaklaşık olarak MÖ 350-322) tarafından ayrıntılandırıldı ve speküle edilen varlıklara kesilemez, bölünemez anlamında *atomos* adı verildi. Demokritos görüşünü süt atomları, kömür atomları, kemik atomları ve su atomları olduğunu belirterek açtı. Hayal gücü deney tarafından dizginlenmeden uçuyordu ve görme atomları, ses atomları ve ruh atomları olduğunu da düşündü. Ruhun atomları özellikle zarıftı, adı üstünde bunlar ruhun atomlarıydı, renkleri beyaz olanlar düz ve yuvarlak, rengin kendisinin bir yorumu gibiydiler.

Bu düşünceler Samoslu Epikuros'un (MÖ 341-270) takipçisi olan Epikürcülerin inanç sisteminin bir parçasıydı ve bu düşünceleri batıl inançlarla savaşmak için kullandılar: Her şey ki tanrılar buna dahildi, atomlardan yapıldığı için, tanrılar bile doğa yasalarına bağımlıydılar. (Epikuros'a göre tanrılar müdahaleyle ilgilenmezlerdi; onlar *bon viveurs*'dü (keyif adamlarıydılar), küçük insani meselelere karışmaları için rahatsız edilemeyecek olan rahatlık ve kibir modelleriydiler.) Hedonizm ile atomculuğun çarpıcı bir bileşkesi olan Epikürcü dünya görüşü, duyumu bilginin kökeni olarak gördü; duyum, duyulan nesnelerin yaydığı ince atom zarlarından yapılmış görüntülerin ruhun üzerinde bıraktığı izlenimdi. Bu atomcu yapı ve duyum yaklaşımı, *De rerum*

natura (Şeylerin Doğası Üzerine) adlı kitabı fiziksel kimyanın ilk ders kitabı sayılabilecek olan Titus Lucretius Carus (yaklaşık olarak MÖ 95-55) tarafından altılı dize ölçüsüyle yazılmış özenli bir didaktik epikle tiranlar ve tanrılardan bıkmış yenilikçi Roma halkına duyuruldu. Bu metin 15. yüzyıla dek kayıptı ama bulunduğunda daha modern insanların dikkatini de yeniden atomculuğa çekti.

Platon ve öğrencisi Aristoteles atomculuğa şiddetle karşı çıkıyordu ve onların güçlü ama kirli dünya görüşü Ortaçağ boyunca egemendi; bu durum Epikürcü yaklaşımdaki güçlü materyalizm ve ateizm esintisinin hiç de lehine değildi. Aristoteles'in görüşüne göre, safi uydurma olduğunu düşündüğü ve bu nedenle (kendi safi uydurmalarının aksine) hor görerek tepeden baktığı atomculuk, gerçek dünyayı karakterize eden duyumsal deneyimin zengin dokusuna bir açıklama getirme gücü taşımıyordu. Ona göre de (atomlar hareket ediyorsa gerekli olan) boşluk olmayacak bir şeydi, çünkü boşluklarda devindiriciler olmadığı ve hareket devindirilmeden var olamayacağı için (bkz. 3. Bölüm) boşlukta hareket sürdürülemez diye düşünüyordu.

Aristoteles'in otoritesi o kadar büyüktü ki bu görüşler pek az değişikliğe uğrayarak iki bin yıl boyunca insan kavrayışını şekillendirdi. Simyacılardan yanlış yola saparak sonuçsuz kalan girişimlerinde sürmekle kalmadı, hareket üzerine görüşleri de fiziği boğdu. Ardından dünya 17. yüzyılda Aristoteles'in oturduğu koltuktan yaptığı fiziğin boşluğundan uyanınca, yavaş yavaş bu koltuktan yapılan kimyanın da boş olduğu insanların kafasında uyanmaya başladı. Fakat onun entelektüel mirasının akış yönünden çok uzaktaki konumumuzdan Aristoteles'e ne kadar dudak büksek bükelim, ilk bakışta gerçeğe daha yakın gibi gözükmelerine karşın Epikürcüleri de övgülere boğmamamız gerekir. Epikürcüler de koltuklarından kalkmıyorlardı ve onların atomculuğu Aristoteles'in atomculuk karşıtlığı ne kadersa o kadar spekülasyondur. Atomlarla ilgili ilk koyutlamaların hepsi varsayımdır: Hepsi spekülatif felsefeydi, hiçbirisi bilim değildi.



Şekil 5.2 Lavoisier'nin maddeye sayılar eklemesini ve bu sayede kimyayı bir doğa bilimine çevirmesini sağlayan araştırmalarında kullandığına benzer bir klasik kimyasal tartı ve onun modern örneği.

Bilimin maddenin yapısına eğilmesi, maddenin hareketine eğilmesinden daha geç oldu. Maddi şeylerin yapısının anlaşılması, maddi şeylerin uzaydaki hareketinin anlaşılmasından daha zordu, çünkü uzay ve zamandaki konumlara sayılar kolaylıkla eklenebilse ve bu sayede dinamik fiziğe bağlanıyor olsa da, sayıların maddeye nasıl eklenmesi gerektiği hiç de açık değildi. Gerçekten de acaba sayıların herkes tarafından kimyasal olarak görülen özelliklerle herhangi bir ilgisi var mıydı? Maddenin yapısı sonsuza dek hep sadece anekdot ve spekülasyonların konusu mu olacaktı?

Çözümün tartı olduğu ortaya çıktı (Şekil 5.2). Modern kimyanın kurucusu ve “muhasibecilik ruhunu dehaya çeviren kişi” olarak görülen Antoine Laurent de Lavoisier'nin (1743-1794) elinde kimyasal tartı, madde gizemini derinden keserek çözebileceğiniz bir neşter halini aldı. Dikkatle ve doğru şekilde kullanıldığında tartı, maddeye sayılar eklemek ve kimyasal tepkimeleri matematik dünyasına taşımak için kullanılabilirdi. Özellikle de birbiriyle tepkimeye giren maddelerin kütlelerinin belirlenmesi için kullanılabilirdi. Sonuç olarak elde edilen verilerden örüntüler belirmeye başladı ve daha önce de gördüğümüz üzere örüntüler bilimin hayat damarları ve kuramların tohumlarıdır.

Birbiriyle birleşen elementlerin kütlelerinin örüntüsü Dalton'un *atom hipotezinin* meşe ağacında büyüyen palamuttu. El

tezgâhında dokumacılık yapan bir babanın asık suratlı, renk körü Quaker oğlu John Dalton (1766–1844) on iki yaşında okul öğretmeni idi, çok titiz bir hava gözlemcisiydi ve her Perşembe gecesi oynadığı çim topu oyunu dışında bir eğlencesi yoktu. Belki de bu topların bilinçaltındaki anısı ilk kez 1803 Aralık'ında Kraliyet Kurumunda yaptığı konuşmada sunduğu ve 1807'de yayımladığı kuramı için esin sağlamıştı. Hipotezi, maddenin yaratılamayan ve yok edilemeyen atomlardan oluştuğu, belirli bir elementin bütün atomlarının özdeş olduğu ve kimyasal tepkimelerde atomların eşlerini değiştirdiği şeklindeydi. En önemli tespiti de, her atomun kendisine özgü bir kütleye sahip olduğu ve kimyasal tartının bu nedenle atomlar eşlerini değiştirdiğinde gerçekleşen kütle değişimlerinin gözlemcisi olduğu biçimindeydi. Bilim felsefecileri mikro ölçekli düzeydeki bir kavramın gözlemlenebilir, makro ölçekli bir özellikle bağlantılandırıldığı bu adıma *dönüştürme* adını vermektedir. Modern fizik ve kimyanın büyük bir bölümü, gözlemlenenlerin hayal edilenler cinsinden yorumlanması, insanların ölçeğinde yapılan belirli ölçümlerin ondan milyarlarca kat küçük varlıklar cinsinden yorumlanması biçiminde dönüştürmenin açıklanmasıyla uğraşır.

Danton aslında bugün hoş karşılamayacağımız sulara da adım atmıştır. Farklı elementlerin atomlarının farklı miktarlarda kalorikle çevrili olduğunu düşünmüştür; kaloriği hatırlarsınız, ısı olarak deneyimlediğimiz (çürüğe çıktığı için) varsayımsal ölçülemez sıvıdır (3. Bölüm). Gaz halindeki elementlerin atomlarının en kalın kalorik kabuğuna sahip olduğunu ileri sürdü; bu onların serbestçe dolaşmalarını sağlıyordu. Katı elementlerin atomları en kalın kabuklara sahiptiler, bu onların yerlerinde kalması anlamına geliyordu. Atom hipotezinin ana fikrinden bu hafif utanç verici uzaklaşma sessizce unutuldu gitti.²

Dalton tartı kullanarak, 1 olarak aldığı en hafif element hidrojen atomunun kütlesiyle oranlayarak bir atom kütleleri liste-

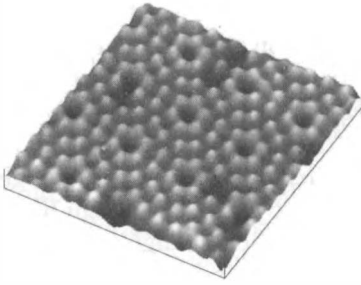
2 Komik olan, Dalton'un atom hipotezinin çoğu bileşeninin –en azından detaycıların gözünde– yanlış olmasıdır. Kalorik yoktur. Atomları yaratabilir ve yok edebiliriz (ama kimyasal tepkimelerde değil). Bir elementin bütün atomları tam anlamıyla aynı kütleye sahip değildir (izotopların kütlesi hafif farklıdır). Fakat hipotezinin ruhu doğrudur ve saygıyı hak etmektedir.

si derlemeyi başardı. Bu görelî atom kütlelerini *atom ağırlıkları* olarak adlandırdı ve bu isim halen kullanımdadır. Deneyleri kabaydı, deney yorumları bir elementin bir başkasıyla kaç atomunun birleştiği hakkında varsayımlara bağlıydı ve bu açıdan tahminleri de çoğu kez yanlıştı (Şekil 5.3). Dolayısıyla kendisine basitliği rehber edinerek suyun bir oksijen atomu ve bir hidrojen atomundan oluştuğunu varsaydı ve oksijenin atom ağırlığının 7 olduğu sonucuna vardı (aslında onun akıl yürütmesi kullanılarak doğru veriler elde edilse sonuç 8 olurdu); suyun aslında iki hidrojen atomu ve bir oksijen atomundan oluştuğunu biliyoruz, dolayısıyla oksijenin gerçek atom ağırlığı 16'dır, yani bir oksijen atomu bir hidrojen atomundan on altı kat daha ağırdır. Her şeye rağmen görülemeyenlerin özelliklerinin laboratuvarda yapılan gözlemler yoluyla ortaya çıkarılması açısından dönüştürmenin ilk versiyonu tüm görkemiyle karşımızdadır.

Yunanların maddenin atomik yapısı üzerine spekülasyonlarının aksine Dalton'un ki bilimsel bir kuramdı. Atıl biçimde, hatta enerjik biçimde derin düşüncelere dalmak değildi bu, rasyonalizasyonla ittifak kurmuş deneye dayalı gözlemdi. Yine de herkes bunu gerçekliğin bir özelliği olarak kabul etmedi. Yıllarca atomlar bilimciler tarafından bir hesap kitap uydurması, kütlelerle ilgili

ELEMENTS					
	Hydrogen	1		Strontian	^{wt} 46
	Azote	5		Barytes	68
	Carbon	5		Iron	50
	Oxygen	7		Zinc	56
	Phosphorus	9		Copper	56
	Sulphur	13		Lead	90
	Magnesia	20		Silver	190
	Lime	24		Gold	190
	Soda	28		Platina	190
	Potash	42		Mercury	167

Şekil 5.3 Dalton'un atom hipotezi 19. yüzyılın ilk yıllarında ortaya çıktı ve Dalton konu hakkında birçok vesileyle dersler verdi. Yandaki resim 19 Ekim 1835 tarihinde Manchester Mekanik Kurumu üyelerine verdiği ders için hazırladığı destek materyalinin bir kopyasıdır. Elementlere verilen tipografik açıdan garip semboller, sonrasında Dalton'u kızdırma pahasına daha basit yazılışlarla değiştirildi.



Şekil 5.4 Dalton atomların varlığını birbiriyle birleşen elementlerin kütlelerindeki düzenlilikten çıkarsadı. Bugün onları “görebiliyoruz” ve varlıklarından kuşkumuz yok. Bir parça silikonun yüzeyindeki silikon atomlarının görüntüsünü elde etmek için kullanılan cihaza tarama tünelleme mikroskopu denmektedir. Yüzeyde yolunu neredeyse kelimenin gerçek anlamıyla hissetmektedir ve bilgisayarlar sonda tarafından yollanan sinyalleri atomik ölçekte çözünürlüğe sahip bir görüntüye çevirmektedir.

hesaplamalar yapmaya yarayan simgeler olarak görüldü ve hiçbir biçimde gerçek olarak kabul edilmedi. Her şeye karşın 1858 yılında İtalyan kimyacı ve devrimci Stanislao Cannizzaro (1826–1910) bilinen elementlerin atom ağırlıklarının çok daha doğru bir listesini yayımladığında muhaliflerin çoğu ölmüştü artık, ama 19. yüzyılın sonunda bile kimi takıntılı tutucular herkesin içinde atomcu olduğunu söylemekten imtina ediyordu.

Modern gözlem teknikleri Dalton ve onun ilk izleyicilerinin uğraşmak zorunda kaldığı savları kökten çürüterek tartışmayı bitirdi. Bugün atomları tek madde damlaları olarak görebiliyoruz (Şekil 5.4) ve var olduklarına ilişkin hiçbir kuşku kalmadı. Elbette kimi bilim sosyologları hiper kötümser yapısalcı bayraklarını sallayabilir ve bu görüntüleri elde etmek için kullanılan teçhizatın sosyal yapı ürünü ve mevcut paradigmayı ifade etmek için tasarlanmış olduğunu söyleyebilir; fakat bilim insanları işin doğrusunu bilmektedir.

Peki, atomlar nedir? Görünümleri nasıldır? Neyden oluşurlar? Dalton da Yunanlar gibi atomların en son parça olduğunu varsaydı; hiçbir atom daha küçük bir parçaya kesilemezdi, atomların daha küçük bileşenleri yoktu. Fakat durum gerçekten böyleyse, bu durumda elementlerin zengin özelliklerinin nasıl açıklanacağı belirsizdi, çünkü özelliklerin birçoğu bileşimin zenginliğinden kaynaklanıyordu. Atomların bir iç yapısının olduğu ilk kez 1897 yılında atomlardan elektronların saçılabilmesini gösteren J. J. Thomson (1856–1940) tarafından kanıtlandı. Keşfini 20 Nisan 1897’de Kraliyet Kurumunda açıkladı. Elektronlar tespit edilen ilk *atomaltı parçacıklar*, atomlardan daha küçük parçacıklardı ve Thomson’un Cambridge’deki Cavendish Laboratuvarında yaptığı çalışma elektronların bütün maddelerde bulunan evrensel bir bileşen olduğunu ve bu nedenle atomların gerçekte bir iç yapısının da var olduğunu gösterdi.

O dönemde (19. yüzyılın tam da son yıllarında) elektronların nasıl düzenlenmiş olduğu konusunda büyük bir kafa bulanıklığı vardı. Kimileri tek bir atomda binlerce elektron olduğunu düşünüyordu. Elektronların eksi yükünü dengeleyecek artı yüklü parçacıkların var olduğu yönünde elde hiçbir bilgi olmaması da durumu zorlaştırıyordu. Sorunu sona erdiren 1910 yılında Manchester’da olduğu sırada *çekirdeğin* varlığına rastlayan Yeni Zelandalı Ernest Rutherford’un (Nelson Lordu Rutherford, 1871–1937) çalışması oldu. Çekirdek, atomun merkezinde yer alan artı yüklü çok küçük bir madde zerresiydi ve atomdan çok daha küçük olmasına rağmen atomun kütesinin neredeyse hepsinden sorumluydu.³

Şu ana kadar karşımıza çıkan çeşitli varlıkların boyut ve kütleleri hakkında bir izlenim edinmemizde fayda var. Tipik bir atomun çapı yaklaşık olarak metrenin 3 milyarda biridir (3×10^{-9} m, 3 nanometre, 3 nm). Dolayısıyla bu atomların bir milyon adeti yan yana dizildiğinde 3 mm eder, şu çizginin uzunluğu kadar —. Buradan atomların boyutlarını kafanızda canlandırabilirsiniz. Aynı çizgi işaretinin 3 kilometre uzunluğa ulaşınca dek büyüttüğünü düşünürsek, bu durumda bir atomun çapı yaklaşık 3 milimetre olur, yani balık yumurtası kadar.

3 Rutherford “çekirdek” terimini ilk kez 1912’de kullandı.

Sizin de anladığınızı sandığım kadarıyla atomlar epey büyüktür; içlerine bu kadar çok şey sokuşturulmuş olduğuna göre öyle de olmaları gerekir. Çoğu insan atomların çok küçük olduğunu düşünür, ama bunun nedeni yalnızca bizim çok büyük olmamızdır: İçimize bu kadar çok şey sokuşturulmuş olduğuna göre öyle de olmamız gerekir. Atomları büyük olarak düşünmeye başlarsanız, gözünüz çok daha az korkmaya başlar. Hayalimizde atomu bir metre büyüklüğe kavuşana dek büyütmeğe bize yardımcı olacaktır.

Bir atomun çekirdeği de büyüktür, çünkü onun içine de çok şey sokuşturulmuştur. Çoğu insan onu çok çok küçük olarak düşünür, ama bu hiç faydalı değildir, çünkü bu tür düşünceler zihnin onun nasıl görüldüğünü hayal etme becerisini engeller. Kimi bilimciler engellenmenin çok iyi bir şey olduğunu düşünür, çünkü makro ölçüdeki fikirlerin bırakın çekirdekleri, atomlar kadar küçük varlıklara ithal edilmesi tehlikelerle doludur, zira bildiğimiz kavramlar bu kadar küçük cisimlere (7. Bölümde aktarılan kuantum kuramında bol bol göreceğimiz üzere) uygulanamaz. Öyle de olsa, gelin en azından bir çekirdeğin çapını kafamızda canlandırmaya çalışalım. Deneyler bir çekirdeğin çapının atomun çapının yaklaşık on binde biri olduğunu gösteriyor. Öyleyse bir atomu çapı bir metrelik bir top olarak düşünürsek, onun çekirdeğinin çapı yalnızca bir milimetrenin onda biri kadar bir zerre olacaktır. Dolayısıyla biz hantal varlıklara oranla çekirdekler gerçekten de çok küçüktür; algılara sahip atom boyutlarında bir varlığa bile oldukça küçük gözükecek, ama fark edilebilir büyüklükte olacaklardır. Çekirdeklerin yapısı üzerine düşünme ihtiyacı duyan bir nükleer fizikçi içinse çekirdek hayli büyüktür.

Dediğimiz gibi, çekirdekler içlerine bu kadar çok şey sokuşturulmuş olduğu için büyüktür. Burada atomun çevresini saran elektronların eksi yükünü karşılayan katkı olan atomun artı yükü yer alıyor. Yine burada atomun neredeyse bütün kütlesi yer alıyor, çünkü elektronların sahip olduğu kütle bütün kütlenin ancak yüzde 0,1'i kadar. Ağır bir cismi kaldırdığınızda, aslında çekirdekleri havaya kaldırılıyorsunuz. Vücudunuzdaki bütün atomlar çekirdeklerinden arındırılrsa, tartıda ancak 20 gram çekersiniz. Çekirdeğin az bilinen bir başka özelliği birçoğunun eksenleri

etrafında döndüğü, ama bazılarının dönmediğidir. Hidrojen ve azotun çekirdekleri döner; karbon ve oksijeninkiler dönmez. Çekirdeğin dönmesi (spini) değiştirilemez, bu içkin bir özelliktir, elektrik yük gibi, dolayısıyla bütün hidrojen çekirdekleri sonsuza dek aynı değişmeyen hızla dönmeye mahkûmdur.

20. yüzyılın başında elektronun ilk keşfedilen atomaltı parçacık olmadığı anlaşıldı. İlk parçacık bir yüzyılı aşkındır biliniyordu ama ne olduğu anlaşılmamıştı. Bütün atomların en basiti, hidrojen atomunun çekirdeği *proton* adı verilen tek bir atomaltı parçacık içerir. Bu parçacık asitlerin özelliklerinden sorumlu varlıktır ve limonatanın keskinliği ağzınıza geldiğinde aslında diliniz protonlar tarafından gıcıklanmaktadır. Üzülsek de bu konuyu burada daha fazla açımlayarak dilin en azından bir temel parçacık türü için niçin iyi bir saptayıcı olduğunu göremeyeceğiz. Proton, elektronun yüküne eşit ve onun zıttı bir artı yüke sahip ağır bir parçacıktır: Kütlesi elektronun kütlesinin yaklaşık iki bin katıdır.

Hidrojen atomu tek bir proton ve ona eşlik eden bir elektrondan oluşur: Çekirdeğin artı yükü elektronun eksi yükü tarafından karşılanır. En basit bir sonraki element olan helyum iki protondan oluşan bir çekirdeğe sahiptir, dolayısıyla iki de eşlik eden elektronu vardır.⁴ Bir atom çekirdeğindeki proton sayısına elementin *atom numarası* denir, dolayısıyla hidrojenin atom numarası 1, helyumunki 2, vs dir. Atomun elektriksel olarak yüksüz (nötr) olabilmesi için, ki bütün atomlar böyledir, var olan elektron sayısının atom numarasına eşit olması şarttır, çünkü bu sayede çekirdeğin toplam artı yükü, eşlik eden elektronların toplam eksi yükü tarafından karşılanır.

Bir elementin çekirdeğine sayı verilebildiğinin ve bu sayının çekirdeğin bileşimi yönünden yorumlanabileceğinin anlaşılması, nihayet elementlere yoklama yapılabileceği anlamına geliyordu. Artık kendisine özgü atom numarasına sahip bir elementin bulunup bulunmadığına bakarak kayıp bir element tespit edilebiliyor ve bir elementin iki başka element arasındaki varlığı hakkındaki tartışmalar atom numaraları bitişikse hükümsüz kılınabiliyordu.

4 Hidrojeninki dışında bütün çekirdekler başka bir atomaltı parçacığa daha sahiptir: Bu nötrondur, protonun yakın akrabasıdır ama artı yükü yoktur. Protonlar ve nötronlar, çekirdeklerin kütlesinden, dolayısıyla da maddenin kütlesinin çoğundan beraberce sorumludur.

Atom numaraları Henry Moseley (1887-1915) tarafından, askere çağrılmadan ve Gelibolu'da bir keskin nişancının silahından çıkan kurşunla can vermeden kısa bir süre önce geliştirilen bir teknikle deneysel olarak saptanmaya açık hale gelmişti. Aynı savaşın sonuna doğru kendi kurşunuyla karşılaşmadan önce Wilfred Owen'ın yazdığı gibi:

Cesaret bendeyken gizem vardı elimde,

Bilgelik bendeyken ustalık vardı elimde.

Gerçekten de gizemi dağıtan bilgelige dayalı ustalıktı, çünkü artık elementlerin yoklama listesini, çekirdeğin varlığını ve her atomda bulunan elektron sayısını biliyorduk.

Çekirdeğin etrafındaki elektronların kesin düzeni hâlâ daha bilinmiyordu. Bu aşamada kavranılması gereken nokta, bir atomun neredeyse tamamen boş alandan oluştuğudur. Gördüğümüz üzere bütün kütlesi merkezdeki çok küçük çekirdekten gelmektedir ve onu çevreleyen alan yaklaşık olarak çekirdeğin çapının 10 bin katıdır ve burada bir avuç elektron bulunur; örneğin karbon örneğinde bu sayı altıdır. Bedeniniz bu neredeyse-boş alandan oluşur, yine de şu veya bu şekilde maddi olarak sağlam gözükyörsünüz. Alaycı anlamda değil, gerçek anlamda boşluksunuz; neredeyse boş bir beyinle düşünüyorsunuz, boşlukla giydirilmişsiniz, boşluk yiyorsunuz, boşluğa oturtulmuşsunuz, boşlukla desteklenmişsiniz. Atomun bu boşluğunu kafanızda canlandırmak için kendinizi Dünya boyutlarında bir çekirdeğin üzerinde oturmuş ve açık havada yıldızlı gökyüzüne bakar halde düşünün. Etrafınızda gördüğünüz uzayın boşluğu ile içinizdeki bir atomun boşluğunu birbirine benzetebilirsiniz.

Fakat çekirdeğin etrafındaki bu boşlukta bir elementin karakteri oturmaktadır. Bir kontrol merkezi olarak çekirdek sadece kendi etrafındaki elektron tamamlayıcılarına komuta etmekten sorumlu pasif bir seyirciyken, neredeyse-boşlukta yer alan bu bir avuç elektronsa kimyasal tepkimelerin katılımcılarıdır.

Bilim insanları elektronları gezegenlere, çekirdeği yıldız ya da Ay ile Dünya'ya benzetme dürtülerini pek gemleyemezler ve bu imge hâlâ o kadar güçlüdür ki hiç bahsini açmamış olsaydım sanırım daha iyi olurdu. Atomun "satürnyen" modeli Japon fizikçi Hantaro Nagaoka (1865-1950) tarafından 1904'te ortaya atıldı ve birkaç yıl sonra Rutherford'un çekirdeği keşfinin ardından doğal model olarak kabul görmeye başladı. Bugün Nagao-ka'nın Satürn'ün etrafındaki halkaları gibi değil de, merkezdeki bir yıldızın yörüngesinde dolanan gezegenler olarak düşünülen gezegen modeli, Niels Bohr'un kuantum kuramının ilk versiyonlarından birini oluşturduğu 1912'de bir hidrojen atomundaki tek elektronun hareketini betimlediği ve atomun tayfını başarıyla niceliksel olarak hesapladığı kuramıyla beraber yaygınlaştı. Hesaplaması gözlemle neredeyse tamamen uyuşan sonuçlar ürettiğinde Bohr'un duyduğu hazzın derinliği hakkında spekülasyon yaparak buna olsa olsa gıpta edebiliriz.

Yine de gezegen modeli ve Bohr'un zekice ve destekleyiciliği apaçık olan hesaplaması yanılttı. Burada bilim ve genel olarak yaşam hakkında çıkarılacak iki ders var. Birincisi aşına olduğumuz makro ölçekten henüz bilmiyor olduğumuz mikro ölçeğe gerekli ihtiyatı göstermeden sağlıklı izdüşümler yapamayız. Gerçekliğin aşağıdaki dünyasında ejderhalar dolaşır. İkincisi niceliksel uyuşmanın bile gerçeğe hakemliği özel koşullarda yozlaşmış olabilir. Bu örnekte hakemliği yozlaştıran özel koşullar da, çekirdeğin elektron üzerindeki elektriksel çekmesinin özelliklerinin güzelliğiydi (bu güzelliğin anlamını bir sonraki bölümde göreceğiz, şimdilik ilginç ve gizemli bir kullanım olarak kalsın).

Merkezdeki bir çekirdeğin etrafında dönen gezegenler imgesini bilinçli zihninizden, hatta daha iyisi bilinçaltınızdan silmeniz gerekir: Bu imge basbayağı yanıltıcıdır. Yanlış bir atom modelidir; bilimkurgudur, ölü, ıskartaya çıkmış bir modeldir. Yanlışlığı elektronların bildiğimiz anlamda parçacık olmadığını, dalga benzeri bir özgün karaktere sahip olduğunun anlaşılmasıyla ortaya çıktı. Kuantum kuramının en önemli özelliklerinden biri olan ve 7. Bölümde karşımıza çıkacak olan bu ikili karakter yörünge kavramını, bu örnekte merkezdeki yıldız benzer çekirdeğin etrafında yörüngesel yol izleyen gezegene benzer elektron

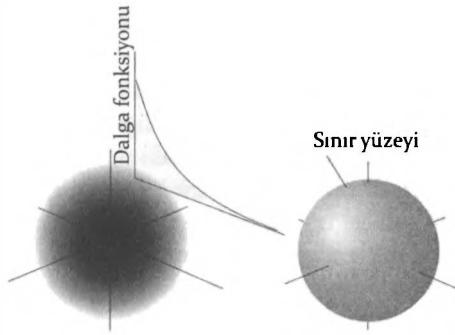
önermesini geçersiz kılar ve elektronun yörüngedeki bir parçacık olarak resmedilmesinin tümüyle uygunsuz olduğuna işaret eder.

7. Bölümde Erwin Schrödinger'in (1887-1961) elektronların davranışını gösteren denklemi nasıl geliştirdiğini göreceğiz. Bu aşamada denklemin atomlar hakkında bize gösterdiği birkaç şeyi bilmemiz yeterli olacaktır. Şu an hidrojen atomunun (diğer atomlara sonra geleceğiz) mantiken doğru kabul edilen yapısı, Schrödinger'in denkleminin uygulanmasının ilk sonuçlarından biriydi.⁵ 1926 yılında yayımlanan ve metresiyle tatil deyken kendisinin ifadesiyle "gecikmiş bir erotik patlama" sonucu yazılmış meşhur dört makalesinde (ilki üç parçaydı) Schrödinger denklemini bir hidrojen atomundaki elektron için çözdü ve Bohr'un yıllar önce bulmuş olduğu elektron enerjisiyle aynı sonucu çok farklı öncüllerden giderek buldu.

Schrödinger'in hesaplamasının sonuçlarını anlamak için denkleminin çözümlerinin, klasik fizikteki gibi elektronun herhangi bir anda bulunacağı kesin konumu değil, elektronun uzayın herhangi bir noktasında bulunma *olasılığını* öngördüğünü bilmeliyiz. Çözümlere *atom yörüngeselleri* adı verildi, verilen isimle yörünge izleyen gezegene benzer bir elektron anıltırmasının akla getirilmesi ama bu uygulanamaz nitelikteki klasik kavramın katılığından da kurtulunması hedefleniyordu.

Şekil 5.5 bir hidrojen atomundaki en düşük enerjinin atom yörüngeselinin, atomda normalde bulunacak olan elektron yörüngeselinin şeklini gösteriyor. Çizim elektronun bir bölgede bulunma olasılığını gölgeleme yoğunluğuyla görselleştiriyor. Gördüğünüz gibi bulut çekirdeğin yakınında en yoğun halde olduğu için elektron, reçel kabındaki arı gibi, çekirdeğin yakınında kümelenmiş olarak düşünülebilir ve konumunun çekirdeğin içerisinde olması da en büyük olasılıktır. Atomun içinde çeşitli yerlerde konumlanan oyuk bir bilye gibi düşünürseniz, bilye çekirdekte yer aldığı anda büyük olasılıkla elektronu topun içinde bulursunuz. Olasılık bulutu küresel olarak simetriktir (tercih edilen bir yön yoktur), dolayısıyla yörüngeseli bulutun çoğunu kapsayan küresel bir yüzeyle de gösterebiliriz. Fakat yörüngese-

5 Erwin'in büyükannesi Emily Bauer'in yarı İngiliz ve ailenin bu tarafının Leamington Spa'dan geliyor olması soysal açıdan tesadüfi ve konuyla ilgisiz bir husustur.



Şekil 5.5 Bir hidrojen atomunda en düşük enerji s-yörüngesel için yapılan temsili çizimleri görüyorsunuz. Soldaki çizim bir elektronun belirli bir noktada bulunma olasılığını gölgeleme yoğunluğuyla gösteriyor. Eşlik eden grafik, çekirdekten uzaklık arttıkça olasılığın üssel olarak nasıl azaldığını gösteriyor. Sağdaki çizim elektronun bulunma olasılığının yaklaşık yüzde 90'ına sahip yüzey olan "sınır yüzeyini" gösteriyor.

li keskin kenarı var gibi düşünmemelisiniz: Çizimdeki grafiğin gösterdiği üzere elektronu belirli bir noktada bulma olasılığı sıfıra doğru düzgün şekilde azalır ve biz atomdan sonsuz bir uzaklığa kadar gitmedikçe (en azından ilkesel anlamda) sıfıra ulaşmaz. Bu yorumda bütün atomlar sonsuz büyüklüktedir ve bu atomların çok küçük olduğu görüşüyle keskin bir çelişme içerisinde. Elbette pratikte bir elektronun çekirdekten uzakta (bir metrenin birkaç yüz trilyonda birinden uzakta) bulunma olasılığı göz ardı edilebilecek kadar küçüktür. Bir hidrojen atomunun sahip olduğu elektronu çekirdeğe çok yakın bir bölgeye (yarıçapı bir metrenin yaklaşık 100 trilyonda biri, 100 pikometre, 100 pm olan bir bölgeye) hapsedilmiş olarak düşünmek uygun olur. Bu en düşük enerjili küre şeklindeki yörüngesele denir. Burada s'nin *spherical* kelimesinden⁶ geldiğini düşünmek hoş ve hafızaya yardımcı olurdu; ama aslında atomik hidrojen tayfındaki çizgilerin sivriliğiyle bağlantılı teknik nedenlerle koyulmuştur.

Kuantum kuramı hakkında daha çok şey aktardığımızda açıklık kazanacak olsa da şimdiden bilmemiz gereken bir başka özellik de, çizimdeki yörüngeselin küresel olarak simetrik olmasının, betimlediği elektronun çekirdek etrafında sıfır açılal momentu-

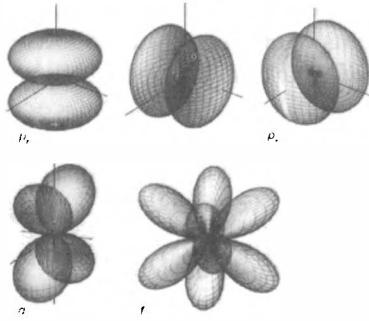
⁶ Türkçesi "küresel" -çn.

ma sahip olmasına işaret ettiği gerçeğidir. Açısal momentumla 3. Bölümde karşılaşmış ve onun doğrusal momentum gibi olduğunu ama harekete düz bir çizgi boyunca değil de daire biçiminde uygulandığını görmüştük. Bu aşamada sadece çekirdeğin etrafında dolaştıkça gölgelenmenin yoğunluğunun ne hızla değiştiğini gösteren atom yörüngeselinin dalgalılığının bize açısal momentumu verdiğini bilmemiz yeterli olacaktır. Bir s-yörüngesinde gölgelenme çekirdek merkezdeyken izlenen bütün dairesel yollarda sabit yoğunluğa sahiptir, böylelikle elektronun çekirdek etrafında sıfır açısal momentuma sahip olduğu sonucuna varırız. Bu minik teknik husus sadece bu anlama geliyor gibi gözükabilir, ama kısa süre sonra onun dünyanın ihtişamının temelinde yattığını göreceğiz.

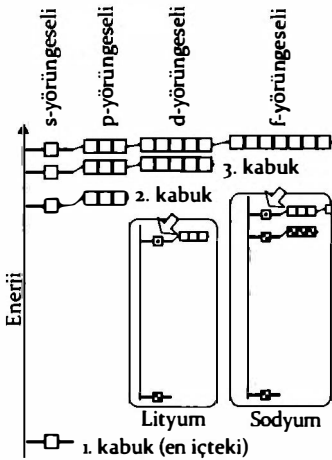
Schrödinger denklemini hidrojen atomu için çözdüğünde, her biri taban durumundakinden daha yüksek bir enerjiye karşılık gelen birçok atom yörüngeselinin varlığını keşfetti. Bunu bir kürenin temel frekansının, armonik sesleri daha yüksek enerji durumlarına karşılık gelen titreşmesine benzetebiliriz. Bir elektron eğer elektrik boşalması sonucu parlama ya da ışık parıltı dediğimiz bir foton darbesinden enerji soğurulması gibi bir olayla yeterince enerji elde ederse bu yörüngesellerden birine yükseltilebilir.

Bu daha yüksek enerji yörüngesellerinin bilmemiz gereken birkaç özelliği var. Birincisi burada hepsi küresel olan ama çekirdekten uzaklıkları yönünden farklılaşan bir s-yörüngeselleri dizisi var: En merkezde çekirdek olmak üzere matruşka bebekler gibi bir dizi merkezdeş kabuk oluşturuyorlar. Bu s-yörüngesellerinin herhangi birinin içinde olan bir elektronun açısal momentumu yok, dolayısıyla çekirdeğin içinde bulunabilir. Bunu fazla ince, akademik bir ayrıntı olarak düşünme hatasına düşmemeniz gerektiğini tekrar hatırlatalım: Kentler ve büyük sanayi bunun gibi küçük ayrıntıların üzerinde yükselir.

Küresel açıdan simetrik olmayan çözümler de vardır, bunlarda elektron olasılığı bulutları çekirdek etrafında düzenli dağılım göstermek yerine etraftaki farklı bölge havuzlarında toplanmıştır. Şekil 5.6'da gösterilen üç farklı yörüngesel türünden haberdar olmalıyız. Olasılığın iki havuzda toplandığı yörüngesellere p-yö-



Şekil 5.6 Elektron yoğunluğunun (bir sınır yüzeyiyle çizilen) iki loblu dağılımı p-yörüngeselinin ayırt edici özelliğidir, dört loblu dağılım d-yörüngeselinin, altı loblu dağılım da f-yörüngeselinin karakteristikiğidir. Yörüngeseller artan oranda kırıksık olduğu için (yani bir kürenin etrafına sarılmış daha kısa dalgaboyu dalgalarına karşılık geldikleri için) elektronun artan açisal momentumuna karşılık gelirler. Bu yörüngesellerin hiçbirinde elektronun çekirdeğin içerisinde bulunma olasılığı yoktur: Açisal momentum arttıkça çekirdekten uzağa artan oranda savrulurlar.



Şekil 5.7 Tipik atomların enerji düzeyleri. Tek elektronlu hidrojende belirli bir kabuğun bütün yörüngeselleri tam olarak aynı enerjiye sahiptir. Hidrojen dışındaki atomlarda (burada çizildiği gibi) her kabuk artan oranda daha yüksek enerjili yörüngeseller içerir. Her durumda p-yörüngeselleri ilk önce ikinci kabukta ulaşılabilir olurlar, d-yörüngeselleri üçüncü kabukta ve f-yörüngeselleri de dördüncü kabukta ulaşılabilir olur. Enerjisi gösterdiklerimizden daha yüksek olan kabuklar da vardır. Her kutu en fazla iki elektron tarafından tutulabilecek bir yörüngeseli temsil etmektedir. İki küçük resim lityumun (dış tarafta bir elektron) ve sodyumun (dış tarafta bir elektron) elektron yapılarını göstermektedir.

rüngeselleri, dört havuzda toplandığı yörüngesellere d-yörüngeselleri ve altı havuzda toplandığı yörüngesellere f-yörüngeselleri denir.⁷ Bir elektronu bir yerde bulma olasılığını resmeden gölgeleme yoğunluğunun biz çekirdek etrafında yuvarlak çizdikçe değişmesi nedeniyle, hareket ederken ölçtüğümüzde p-, d- ve f-yörüngeselleri betimledikleri elektronun sıfır olmayan açısal momentum durumlarına karşılık gelirler ve bir d-yörüngeseli bir p-yörüngeselinin daha yüksek bir açısal momentuma karşılık gelirken, daha da kırışık f-yörüngeseli ondan da yüksek bir açısal momentuma karşılık gelir. Bu açısal momentum, elektronu çekirdekten uzağa savuran bir merkezkaç kuvvetine sebep olur. Kısa süre sonra çok büyük bir öneme sahip olacak yeni bir küçük teknik ayrıntı daha verelim: Bu merkezkaç etkisi nedeniyle bu yörüngesellerden herhangi birinde yer alan bir elektron asla çekirdeğin içerisinde bulunamayacaktır.

Şimdi Schrödinger'in denklemi için bulduğu çözümlerin iki özelliğini daha bilmemiz gerekiyor (Peşrevin uzunluğundan dolayı özür dilerim, çok yakında her şey yerli yerine oturacak, merak etmeyin.) Birincisi enerji örüntüleri Şekil 5.7'de gösteriliyor. Enerji artınca daha fazla yörüngesel grubuna ulaşılabilirdiğini görüyoruz, durum bir küreye giderek daha sert vuruldukça kürenin daha da kıvrımlı biçimlerde ve daha yüksek frekanslarda titreşebilmesine benziyor. En düşük enerjide yalnızca bir yörüngesel, Şekil 5.5'teki s-yörüngeseline ulaşılabilir. Bir sonraki aşamada bir s-yörüngeseline ve üç p-yörüngeseline ulaşılabilir. Daha yüksek bir sonraki aşamada bir s-yörüngeseli, üç p-yörüngeseli ve beş d-yörüngeseli var, vs. Bu örüntüde sihirli bir yan yok, bu sadece Schrödinger denkleminin hidrojen atomu için verdiği sonuçların oluşturduğu örüntü. Enerji düzeyi gruplarına *kabuk* adı veriliyor, çünkü onlara ait yörüngeseller bir soğandaki katmanlar gibi elektron olasılığının az çok merkezdeş dağılımlarını oluşturuyorlar. Son bir (evet!) önemli nokta da, belirli bir kabuğun bütün yörüngesellerinin tam olarak aynı enerjiye sahip olmasıdır. Bu çok garip bir özelliktir ve Bohr'un hesaplamasının kavramsal

7 İsimler tayfın çok uzun zaman önce unutulmuş ve şimdi bize ilgisiz görünen teknik özelliklerinden gelir; buna göre bu yörüngesellerdeki elektron çizgileri asıl çizgilerdir ya da yaygın olabilecek bir görünüme sahiptirler veyahut da muğlak (ama bilinen) nedenlerden temel şekilde sınıflandırılmıştır.

olarak hatalı ama niceliksel olarak doğru olmasıyla sonuçlanan elektron ve çekirdek arasındaki elektriksel etkileşimin aynı “güzel” karakterine dek izinin sürülmesi mümkündür.

Şimdi hidrojen atomundan diğer elementlere karşılık gelen atom dizilerine doğru ilerleyeceğiz. Atom numaralarını bildiğimiz, bu sayede her durumda olması gereken elektron sayısını bildiğimiz için, bu elementleri hangi sırayla ele almamız gerektiğini de biliyoruz. Örneğin elementin atom numarası 15’se (fosforda olduğu gibi), çekirdeği on beş artı yüke sahiptir ve elektriksel yüksüzlüğe ulaşmak için her atom on beş elektrona sahip olmak zorundadır. Temel fikir, birazdan aktaracağımız birkaç küçük düzeltmeyle birlikte, bu atomların elektronlarının Schrödinger’in hidrojen için bulduklarını andıran yörüngeseller ve enerjiler tarafından betimleneceğidir. Fakat bu atom inşası sırasında çok garip şeylerle de karşılaşacağız.

Atom numarası 2 olan element helyumdur; çift yüklü çekirdeği ve iki elektronu vardır.⁸ En düşük enerji düzenlemesi her iki elektronun hidrojenin taban durumundakiyle aynı s-yörüngeseli tarafından tanımlanmasıdır. Buna iki elektron aynı s-yörüngeselinde *yer alıyor* deriz. Çekirdek yükü hidrojendekinden daha büyük olduğu için iki elektron çekirdeğin daha yakınına çekilecektir; ama elektronlar birbirini ittiği için (aynı işaretli yükler birbirini iter) içeri çekilmeye karşı bir direnç de vardır. Sonuç olarak atom hidrojenden biraz daha derli toplu olacak ama pek fazla küçük de olmayacaktır.

Sıradaki element atom numarası 3 olan lityumdur. Lityumun çekirdeği üç kez yüklenmiştir ve etrafı üç elektronla çevrilidir. Şimdi müthiş bir şey geliyor. Bu üç elektronun hepsi en düşük enerjili s-yörüngeselinde yer alamazlar, mümkün değildir bu. Şu ana kadar bütün aktarımımızda eksik olan ama şimdi belirtme-

8 Helyum çekirdeği iki proton ve iki nötron içerir, atom ağırlığı 4 eder. Helyum çekirdeklerinin küçük bir bölümü sadece bir nötronludur ve bu yüzden atom ağırlığı da 3’tür. Aynı atom numarasına ama farklı nötron sayılarına sahip atomlar o elementin izotoplarıdır.

miz gereken bir özellik, bir elektronun üç kalıcı, içkin, ayırt edici özelliğe sahip olduğudur: Kütle, yük ve *spin*. Daha önce gördüğümüz gibi nasıl bütün çekirdeklerin spini varsa, evrendeki bütün elektronlar da bu özelliğe sahiptir. Amaçlarımız açısından spini klasik bir dönme hareketi olarak düşünebiliriz, bir gezegenin kendi eksenini etrafında dönmesi gibi. Fakat bu bağlamda spinin tamamen kuantum mekanik bir özellik olduğunu ve aslında klasik şekilde düşünölmeyeceğini de bilmeliyiz. Örneğin bir elektron başlangıç durumuna dönmek için kendi etrafında iki kez dönmek zorundadır! Spinin ikinci kuantum özelliği (şu anki tartışmamızla daha yakından ilgili olanı) bir elektronun (yine klasik dili kullanırsak) sabit bir spin hızına sahip olması ama bu hızda saat yönünde ya da saat yönünün tersine doğru dönebilmesidir. Ara hızlara ve dönüşün oryantasyonuna izin verilmez.⁹

Spinin üçüncü kuantum özelliği (ki bunun klasik yorumu da yoktur) Avusturyalı fizikçi Wolfgang Pauli'nin (1900-1958) 1924 yılında ortaya attığı *dışarlama ilkesi*'dir:

Bir yörüngeselde iki elektrondan fazlası yer alamaz ve eğer iki elektron aynı yörüngeselde bulunuyorsa spinlerinin de eşli olması şarttır.

“Eşli” derken, eğer bir elektron saat yönünde spine sahipse, diğerinin saat yönünün tersi spine sahip olmak zorunda olmasını kastediyoruz. Bu ilke kimyanın anlaşılmasında anahtar nitelik taşır. Cisimlerin çoğunlukla boşluktan oluşmalarına karşın katı oluşlarının anlaşılmasının da anahtarıdır, çünkü bir atomun elektronları başka bir atomun elektronlarının bölgesinde bulunamazlar. Dolayısıyla elektronlar bizim “atom” olarak baktığımız bölgede çok seyreltik şekilde yayılmış olsalar da, başka bir atom bu bölgeye giremez. Bu nedenle cüssemizin ve etrafımızdaki tüm diğer cisimlerden ayırt edilebilirliğimizin nedeni nihayetinde elektron spinidir. Elektron spini sona ersin, bütün madde (dünyada yer alan her şey, bütün dağlar, okyanuslar, ormanlar,

9 Eğer hepsi aynı yönde döndürölseydi, vücudunuzdaki bütün elektronların toplam açısal momentumu yaklaşık olarak dakikada bir dönüş tamamlayan bir pinpon topuyla aynı olurdu. Aslında elektronların yarısı saat yönünde, yarısı da ters yönde döner, dolayısıyla içkin net açısal momentum elde edemezsiniz.

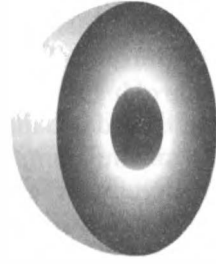
var olan her şey) çökerek özelliksiz bir yapışkanın özdeş bir damlasına dönüşür. Varlığımızın kaynağı spindir.

Artık lityum anlatımımızı tamamlayabiliriz. Sırayla üç elektron eklediğimizi ve bunları dışarlama ilkesini gereken şekilde gözönüne alarak en düşük genel enerjiyle sonuçlanan yörüngesellere yerleştirdiğimizi hayal edelim. İlk iki elektron birinci s-yörüngeseline yerleşir. Bu yörüngesel şimdi iki elektron içermektedir, dolayısıyla doludur. Üçüncü elektron bu nedenle bir sonraki kabuğun s- ya da p-yörüngesellerinden birine yerleşmeye zorlanır. Fakat dört yörüngeselin dördü de aynı enerjiye sahipken hangi yörüngesele yerleşecektir?

Aynı enerjiye sahip oldukları doğru değildir. Buna hidrojende dikkat çekmiş, çekirdek ile elektron arasındaki elektriksel etkileşimin gizemli “güzel” özelliğine dek gitmiştik. Bir atomun içinde birden fazla elektron var olduğunda bu güzellik (bununla özel bir simetri türünü kastediyoruz) kaybolur ve s- ve p-yörüngeselleri artık aynı enerjiye sahip olmazlar. Belirli bir kabuktaki p-yörüngesellerinin aynı kabuğun s-yörüngesellerinden azıcık daha fazla enerjiye sahip olduğu görülür. Bu farkın nedeni, s-yörüngeselindeki bir elektron tam çekirdekte bulunabilirken, p-yörüngeselindeki bir elektronun orada bulunamamasından kaynaklanır. Kısacası ikinci s-yörüngeselindeki bir elektron birinci s-yörüngeselindeki iki elektronun yerleştiği bölgeye girebilir ve üç kez yüklenmiş lityum çekirdeğinin çekme gücünün tam deneyimini yaşayabilir. Açısal momentumunun merkezkaç etkisi dolayısıyla p-yörüngeselindeki bir elektron çekirdeğin yanına girerek yaklaşamaz ve bu yüzden onun tam çekme gücünü deneyimleyemez. Sonuç olarak daha yüksek bir enerjide yer alır (Şekil 5.7’de gösterildiği gibi).

Bu enerji farkını aklımızda tutarak artık bir lityum atomunun ilk kabuğun s-yörüngeselindeki iki elektron ve onun etrafında bir sonraki daha yüksek enerjili s-yörüngeseline yerleşmiş bir elektrondan oluştuğu sonucuna varabiliriz. Elektronları biri çekirdeğe yakın küresel bir yuvarlak oluşturmak üzere kümelenmiş, diğeri onun etrafını bir ceviz kabuğu gibi sarmış halde iki fiziksel, merkezdeş kabuk oluşturmuş gibi düşünebiliriz (Şekil 5.8).

Şekil 5.8 Lityum atomunun temsili yapısı. Yoğun merkezin içinde iki elektron, onu saran dış kabuğun içinde bir elektron daha vardır.



Sonraki element (atom numarası 4) çekirdeğinin etrafında dört elektronuyla berilyumdur. Lityumdan bir fazla elektron vardır ve bu elektron lityumun ikinci s-yörüngesinde en dıştaki elektronuna katılabilir. Beşinci element borun atom numarası 5, elektron sayısı beştir. İkinci s-yörüngeseli doludur, dolayısıyla beşinci elektron üç p-yörüngeselinin birine girmek zorundadır. Aynı olay sonraki beş element için de geçerlidir, çünkü üç p-yörüngeseli vardır ve bu yörüngeseller altı elektrona ev sahipliği yapabilir. Bu nedenle karbon (altı elektron) helyuma benzer iki elektronluk bir iç göbeğe, etrafını saran bir s-yörüngesinde iki elektrona daha ve nihayet p-yörüngesellerinde iki elektrona daha sahiptir. Bununla beraber bu iki elektron kabuğun farklı p-yörüngesellerine yerleşmeyi tercih ederler, zira bu durumda birbirlerinden daha uzak olur ve birbirlerini daha az iterler. Azot (yedi elektron) bir p-yörüngesindeki bir elektrona daha sahiptir, oksijen (sekiz elektron), flor (dokuz elektron) ve neon (on elektron) benzer şekilde devam eder.

Bu noktada kabuğun altı p-yörüngeselinin hepsi dolmuştur ve sonraki elektron (atom numarası 11 olan sodyumdaki) bir sonraki en yüksek atom yörüngesine yerleşmek zorundadır ve bu başka bir s-yörüngeseli. Sodyum atomunun yapısı, içerde tam bir göbek ve merkezde bir dış kabuk oluşturan tek bir s-elektronuyla lityum atomuna benzer.

Şu an gireceğimiz alana daha önce sessizce bir giriş yapmış olsam da, yolculuğumuzda çok sıra dışı bir ana tanıklık etmek üzereyiz. Bir helyum atomunun yapısının tamamlanmış bir kabuktan oluştuğunu gördük; helyumun reaktif olmayan tek atomlu

bir gaz olduğunu da bilmemiz gerekir (yani, gaz serbest hareket eden tekil atomlardan oluşmaktadır). Sekiz element ileride neon-a geliyoruz, o da her atomun tamamlanmış bir elektron kabuğuna sahip olduğu bir başka tek atomlu soy gazdır. Neondan hemen sonra lityumdan bahsettik; son derece reaktif bir metaldir, atom yapısı tamamlanmış bir göbeğin dışındaki tekil bir elektronu içerir. Lityumdan sekiz element ilerleyince, sodyum da bir başka son derece reaktif metal olarak karşımıza çıkar. Sodyum atomunun yapısı tam da lityum atomunun yapısı gibidir, tamamlanmış bir kabuğun dışında tek bir elektron vardır. Böylece elementlerin *periyodikliğiyle* karşılaşmış oluyoruz; maddenin ayırık parçaların rastlantısal bir toplanışı olmadığını, benzer kimyasal özellikleri ve *benzer elektron yapıları* olan üyelere sahip *ailelerden* oluştuğunu görüyoruz.

Bu keşfin etkisini anlamak ve taşıdığı tarihsel ve kültürel bağlamı görmek için 19. yüzyıla dönmemiz ve 19. yüzyılın daha miyop ve görgül gözleriyle atomların yapılarını inceleyerek elementlere dışarıdan bakmamız gerekiyor.

19. yüzyılın ortalarında yaklaşık altmış elementin varlığı biliniyordu. Bunlardan bazıları tarih öncesi çağlardan beri bilinirdi, ama element oldukları bilinmezdi. Dolayısıyla demir, karbon, bakır ve sülfür antik dönemde de bilinirdi. Bunlar Yunanların farazi anlamıyla değil, modern anlamda gerçek elementlerdir. Robert Boyle'un (1627-1691) *The sceptical chymist*'teki [Şüpheci Kimyacı, 1661] sözleriyle elementler şöyleydi:

Başka cisimlerden ya da birbirlerinden oluşmamış olan ilkel, basit ya da tam karışmamış bazı cisimler, tam olarak karışmış denen cisimlerin bileşenleridirler ve nihayet bunlara çözünecek olan bu cisimlerin terkebini sağlarlar.

Antoine Lavoisier'nin daha az yorucu, daha işlevsel tanımına göreyse şöyleydiler:

Henüz herhangi bir yolla parçalayamamış olduğumuz maddeler.

Lavoisier'nin tanımı daha üstün gayretlerin parçalanmayı sağlaması ve bu sayede bu varlığın element olma tablosundan kaldırılması olasılığına kapıyı açık bırakıyordu. Lavoisier kendi tanımı uyarınca otuz üç elementlik bir liste oluşturdu. Bunlardan sekizi gerçekten de daha etkili işlemlerin uygulanmasıyla geçersiz oldu, ikisi ise (ışık ve kalorik) tümünden yanılttı. Modern tanım bu kimyasal yoldan el yordamıyla ilerlemeden uzak durur ve elementi net biçimde şöyle bir tanımlar:

Aynı atom numaralı atomlardan oluşan bir madde.

Elementlerin modern çağı esasen Hamburglu Hennig Brand (doruk dönemi 1669) yüzyıldan beri ilk yeni element olan fosforu keşfettiğinde başladı. Yaptığı işlem komşularına çekici gelen ya da ilginç şeyler arayanları cesaretlendirici bir nitelik taşımıyordu. Elli kova insan idrarı topladı, bunları buharlaşmaya bırakarak saflaştırdı, geriye macun kıvamında bir tortu kalana kadar kaynattı, bunu mayalanmaya bıraktı ve siyah tortuyu kumla ısıtarak buharı bir imbikte topladı.¹⁰ Sihirli bir görünüme sahip bu madde havada parlıyordu ve bu yüzden hastalıkla savaşmak ya da en azından kâr elde etmek için bir vasıta olduğu düşünülürdü. Brand'ın uyguladığı işlemde de görüldüğü gibi bileşikler bileşenlerine ayırmada kullanılan en eski yöntem ısıydı; bazen ısıyla beraber filizinden demir çıkarmak için karbon kullanılması gibi başka maddeler kullanılıyor, bazen de cıvanın bir oksitine ısı etkimesi yoluyla kazara oksijenin keşfinde olduğu gibi yalnızca ısı kullanılıyordu.

Sanayi devriminden önce yüksek ısılara ulaşılması zordu, ama Prometheusçu bir işlemle güçlü bir lens kullanarak Güneş'ten kapabilirdiniz. Galvanik pilin icadı ve elektrik akımının elde edilmesiyle madde karıştırıcılarının eline yeni bir alet düştü. Böylece Humphry Davy (1778–1829) Kraliyet Kurumunun etrafında bulunan her yere elektrotlar yerleştirdi ve 1807 yılının Ekim ayı içerisinde bir haftada önce erimiş potası (potasyum nitrat) elektroliz etme yoluyla potasyumu, ardından erimiş sodayı (sodyum karbonat) elektroliz etme yoluyla sodyumu keşfetti. Humphry'nin

10 İdrar ve kum, her ikisinin de altın sarısı olduğunu belirtmeden geçmeyelim, dolayısıyla Brand'ın yaklaşımı altın niteliği taşıdığını düşündüğü bunların renklenme ilkesini simyasal olarak araştırmaktan ibaretti.

kardeşi John Davy, keşfinin ardından Humphry'nin "etrafta dans ettiğini ve sevinçten delirdiğini" söyledi. Toplamda Davy altı yeni element keşfetti (sodyum, potasyum, kalsiyum, magnezyum, stronsiyum ve baryum). Elektroliz uygulanması nedeniyle yaşanan keşiflerdeki artışla element sayısı 1818 yılında kırk dokuza ulaştı. İsveçli kimyacı Jöns Berzelius (1779-1848) bizzat üç element keşfetti (seryum, selenyum ve toryum) bugün kullandığımız (örneğin seryum için Ce, selenyum için Se, Toryum için Th) çok daha pratik notasyonu önererek elementlerin sembolleştirilmesini Dalton'un hafif simyasal ve tipografik açıdan da acayip tarzından kurtardı. Dalton kendi alanına yapılan bu yabancı müdahaleye epey gücendi ve bir meslektaşıyla kendi sembollerini tartıştığı esnada hayatında yaşadığı iki inmeden ilkinin geçirdi.

Yapboz oyunlarında örüntülerin saptanması elde yeterince parça olmadıkça zordur. Parçaların yarısının kutudan çıkmış olduğu 1820'lerde maddenin özelliklerindeki ilk örüntü ortaya çıkmaya başlamıştı. Bu yapbozun iki yönü vardı; biri elementlerin niteliksel özellikleri, onların kimyasal benzerlik ve farklıları, diğeri de elementlerin atomlarının niceliksel ölçümünün, atom ağırlıklarının ortaya çıkmaya başlamasıydı. Faytoncu bir babanın eğitim almamış ama gözlemci oğluyken sonradan üniversitede profesör olmayı başarmış olan Jena'dan Johann Döbereiner (1780-1849) bulmacanın bu iki boyutunu uyumlu hale getirecek biraz garip bir şeyi fark etti. Kimyasal olarak benzer bazı element üçlülerinde elementlerden birinin atom ağırlığının diğer ikisinin atom ağırlıklarının ortalamasına yakın olduğu dikkatini çekti. Örneğin klor, brom ve iyot kimyasal açıdan benzerdir ve atom ağırlıkları sırasıyla 35, 80, ve 127'dir (35 ile 127'nin ortalaması da 81'dir). Döbereiner böyle üç üçlü buldu ve bu nedenle elementler arasında hangi nedenle bilinmez ama bir desen olduğu fikri doğdu.

Artık düzen kovalama avı başlamıştı. Uğraşın kendisinden çok sonuçlarla ilgilendiğim için avın tarihiyle ilgili ayrıntılı aktarımlar yapmak ve ilgili kişileri tek tek anmak gibi bir niyetim yok, ama iki kişi sahneye davet edilmeyi hak ediyor. John Newlands (1837-1898) Anglo-İtalyan kökenliydi ve Cannizzaro gibi o da milliyetçi duyguların coşkunluğuyla yirmi üç yaşında Garibal-

di'nin Kırmızı G mleklileriyle beraber savaşmak için Sicilya'ya gitti. Gençlik ateşi durulunca İngiltere'ye döndü ve örüntünün yeni bir bileşenini tespit etti. Döbereiner sadece aralardaki     lerin farkına varmıştı ama daha sistematik bir örüntü vardı, en azından daha hafif elementlerde. Böylece hafif elementlerin atom ağırlıklarının artış sırasıyla düzenlenmiş olduğunu ve özellik benzerliklerinin aradan sekiz element geçtikten sonra yeniden tekrarlandığını buldu (o dönemde gaz durumundaki elementler helyum, neon ve argon biliniyordu). Bugün bakıldığında pek akıllıca bir seçim olmasa da, bu tekrarlılık ile müzik notaları arasında bir benzetme kurarak buna "oktav yasası" adını verdi. Bu hayalperest benzetme ona pahalıya patladı, çünkü bu kadar acayip ve muhtelemelen tesadüfi bir şey ileri sürdüğü için kendisiyle dalga geçildiği gibi, elementleri alfabetik sıraya sokmaya ya da başka bir g l n   l  t le düzenlemeye kalktığını düşünenler oldu.

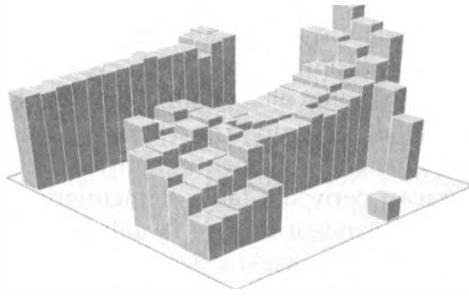
Yine de haklıydı. İlk elementlerin özellikleri aynen bir müzik gamındaki notalar gibi tekrarlanır, ama bu müziksel nedenlerden değildir. Daha önce belirttiğimiz gibi elementlerin atom yapıları i  kabuklar tamamlandıkça gerçekten periyodik şekilde tekrarlanır ve yörüngesel yerleşim örüntüsü sıfırdan başlar. Ama henüz atomların kavramsal olarak emekleme dönemlerinde olduğu, elektronunsa hiç bilinmediği 19. yüzyılın başlarında çok uzak gelecekte kullanılacak bu tür kuramsal kabullerden faydalanılamıyordu.

İkinci kişiliğimiz elbette Dimitri Ivanovich Mendeleev'di (1834-1907). Bir kaynağa göre on bir, on dört ya da on yedi kardeşin en küçüğü (en azından bir Döbereiner sayı   lemesi!), at alım satımıyla uğraşan (*mjenu djelatj* = "değiş tokuş yapmak") bir babayla zeki, büyümüş de küçülmüş küçük oğlunu kahramanca sahiplen en bir annenin oğluydu. Mendeleev'in genel kimyaya giriş metni *Osnovy khimii*'yi (Kimyanın İlkeleri) yazmaya başladığı sırada bilinen element sayısı altmış bire yükselmişti. Sunacağı malzemeyi okurlarına mantıksal, tutarlı bir biçimde nasıl iletceğini düşünüyordu. Katı gerçeklerden biraz sapıyor gibi g z ksek de mutlu bir anekdot aktarmamızın zamanı geldi.

lemek için atom ağırlıklarını kullandı ve sekiz ve on sekizinci elementin ardından sekizlik aralarla tekrarlanan benzerlikler bulundu. Tabloyu arada bir küçük hilelerle eğip bükme zorunda kaldı (bu normalde kimya alanındaki sezgilerine atfedilir, ama bu daha çok Procrustes'in yatağında fazla uzun kalan kurbanlarına uyguladığı yöntem benziyor). Atom ağırlığına dayalı element sıralaması kimyasal benzerlik örüntüsüyle her yerde uyuşmuyordu, bu yüzden Mendeleev sıralamayı göz ardı etti ve kendi düzenini seçti. Bugün bu işlemin geçerli olduğunu biliyoruz, çünkü atom ağırlığı elementlerin düzenlenmesi için en iyi ölçüt değildir: Elementler en iyi atom numaralarına göre düzenlenir ve şu an tam olarak anlıyor olduğumuz nedenlerle atom ağırlığı atom numarasının sıralamasına her yerde tam olarak uymaz. Ayrıca utanç verici boşluklar da vardı. Fakat bu örnekte utanç vericilik faydalı bir işlev gördü, zira Mendeleev tablosunun formülasyonundan o kadar emindi ki bilinen birbirine komşu elementlerin özellikleri arasındaki ara değerlere bakarak henüz keşfedilmemiş elementlerin özelliklerini tahmin etmeyi başardı. Bu sayede eka-aluminyum ve eka-silikon adını verdiği (*eka* Sanskrit'te bir anlamına gelir) elementlerin varlığını ve özelliklerini öngördü ve bunlar daha sonra sırasıyla Fransızlar tarafından galyum ve Almanlar tarafından germanyum adlarıyla keşfedildiler.¹³ Hatalar da yaptı ve gerçekte var olmayan elementler öngördü, ama sonraki minnettar nesillerin iyiniyetiyle bu hatalar neredeyse tümünden unutuldu.

Şu an bildiğimiz yaklaşık 110 element var ve tablonun bütününde boşluk kalmadı. Bunu atom numaraları 1'den 110'a hiç eksiksiz düzgün şekilde ilerlediği için biliyoruz. Arada bir elementlerin 114'e dek keşfedildiği gibi haberler çıkıyor, ama 113 hâlâ eksik. Bu, periyodik tablonun faydasız "akademik" sonu aslında, dolayısıyla kenarda saçaklanmış olması pratik açıdan fazla bir şey fark ettirmiyor.

¹³ Elementlerin adlandırılışında itidalli davranılmasında ısrarcı olan uluslararası komiteler icat olmadan önce bu konuda (gizli gizli anlatılan) şakalar da olurdu. Galyumun Fransız kâşifi François Lecoq de Boisbaudran tarafından kendi yurttaşlarının göğüslerini gururla şişirmeleri için seçilmiş bir isim olması muhtemelse de *gallus gallus* tavuğun Latincesidir, dolayısıyla pek şişinmeye uygun olmayabilir.



Şekil 5.11 Elementlerin özelliklerindeki periyodiklik, atomların çaplarını veren bu çizelgede gösterilmektedir. En küçük atomlar sağ üstteki köşeye yakındır. En büyük atomlar sol alt taraftaki köşeye yakındır. Dağılımın ayrıntıları iyi bilinmektedir. Bir atomunun büyüklüğü bir elementin fiziksel özelliklerinin (yoğunluk gibi) ve kimyasal özelliklerinin (bir atomun oluşturabileceği bağların sayısı gibi) belirlenmesi için iyi bir ölçüttür.

alan yirmi sekiz elementlik çok ince kısım, iç geçiş metallerinden oluşur. Bu ince şeridin aslında ana tabloya eklenmesi gerekirdi, ama bu tabloyu çok uzun yapar ve çıktı alındığında uygunsuz şekilde aşağı uzatırdı. İç geçiş metallerinin hepsinin kimyasal özellikleri birbirine çok benzerdir ve ayrıştırılarak tespit edilen en son elementler arasındadırlar. Aslında çizginin en alt sırası, uranyumdan (U) sonrası yapay olarak elde edilen elementlerdir.

Periyodik tablo hâlâ genişlemektedir. Bilimciler parçacık hızlandırıcıları yardımıyla bir elementin çekirdeklerini başka elementlerin çekirdeklerinin üzerine savurarak bu iki çekirdeğin birleşmelerini ve henüz bilinmeyen bir elementin çekirdeğini oluşturmalarını umut etmektedir. 112. element (henüz bir ad verilmedi) böyle oluşturuldu. Fakat çekirdekler çok kararsızdır ve oluşturulmuş olan az sayıda atomun varoluşu da çok kısa sürdü.

Umarım kimyacıların periyodik tabloyu en temel kavramları olarak kabul etmelerinin nedenini anlamaya başlamışsınızdır. Tablo elementlerin özelliklerini özetlemektedir: Fiziksel özelliklerindeki, örneğin yoğunluklarındaki değişmeyi, atomların özelliklerindeki, örneğin çaplarındaki değişmeyi, kimyasal özelliklerindeki, örneğin başka atomlara oluşturdıkları bağların

türü ve sayısındaki değişmeyi bize aktarmaktadır (Şekil 5.11). Tek bir bakışta bir elementin bir metale özgü (demir), bir ametale özgü (sülfür) ya da ikisinin arasında bir şeye özgü (silikon) yapısal özelliklere sahip olup olmadığını görebiliriz. Komşularının özelliklerine bakarak ve o grup ya da o periyot boyunca beklenen yönsemeleri düşünerek bir elementin kimyasal özelliklerini öngörebiliriz. Kısacası periyodik tablo elementlerin özelliklerinin özetlenmesinde olağanüstü özlü ve faydalı bir araçtır ve sahip olduğu öngörü gücü çok yüksektir. Basit bir kare şeklinde düzenlenen toprak, hava, ateş ve sudan oluşmuş ilk periyodik tablodan buraya ne çok yol kat ettik!

Mendeleev tablosunu görgül olarak derledi. Atomların yapıları hakkında hiçbir şey bilmiyordu ve tablonun altında yatan temeli bilmesi de mümkün değildi. Biz bu kavrayışa sahibiz. Bizim bildiğimiz haliyle periyodik tablo Şekil 5.7’de gösterildiği üzere atomların enerji düzeylerinin doldurulma ritimlerini betimlemektedir.

Bölümde daha önce bir yanda helyum ile neon, öte yanda litium ile sodyum arasındaki benzerlikleri fark edip atomlarının elektron yapılarının benzeşik olduklarını anladığımızda periyodikliğin kökenleri hakkında bir ipucu edinmiştik: Helyum ve neon tamamlanmış kabuklu atomlara sahiptir, lityum ve sodyum tamamlanmış bir kabuğun dışındaki bir s-yörüngesinde yerleşmiş tek bir elektrona sahiptirler. Bu ipucu bütün tablonun özüdür. Bu nedenle bir atomdan başka bir atoma artan atom numarası yolunu izleyerek adım adım ilerlersek, her adımda atom numarası sayısı ve dolayısıyla yer bulunması gereken elektron sayısı bir fazlalır. Eklenen her yeni elektron sıradaki atom yörüngesine Pauli dışarlama ilkesinin gereklilikleri uyarınca girer ve bir yörüngeselde iki elektrondan fazlası yer alamaz.

Bu dizilim periyodik tablonun görünümüyle uyumludur. Bu nedenle 1. ve 2. gruptaki (örneğin sodyum ve magnezyumu içeren gruplar) elementlerin atomları bir s-yörüngesine yerleşenlerdir. Bir s-yörüngesine ancak iki elektron yerleşebilir ve bu, tablonun bu kısmında iki grup olmasıyla uyumludur: 1. Grup-

ta yörüngeselde bir elektron vardır, 2. grupta iki elektron vardır. Tablonun sağında altı grupluk bir blok vardır: Bu elementlerde elektronlar, atomun uygun kabuğunun üç p-yörüngeselinin doldurma sürecindedir; bu yörüngesellere yerleşen elektron sayısı altıya kadar çıkabilir: 13. Gruptaki elementler (örneğin bor, B) bu tip bir elektrona sahiptir, 14. gruptakiler (örneğin karbon, C) iki elektrona sahiptir; bu böyle devam ederek 18. grupta bütün yörüngeseller dolana dek sürer ve hemen hemen hiç hareket edemeyecek durumda olan bu elementlere de *soy gazlar* denir. Tablonun ortasındaki dar blok, geçiş metalleri ilgili kabuğun beş d-yörüngeselinin doldurulmuş olduğu elementlerden oluşur: Beş d-yörüngeseli on elektrona dek ev sahipliği yapabilir ve bu gruplar bloğunun her bir sırasındaki on elementin durumu böyledir. İç geçiş elementleri f-yörüngesellerinin doldurulmuş olduğu elementlerdir. Her kabukta yedi f-yörüngeseli vardır ve bu bloğun her sırasındaki on dört üyeye karşılık gelir.

Çemberi tamamladık. 19. yüzyılın kimyacıları elementler arasındaki aile bağlarını fark ettiler. Yüzyılın sonuna doğru ilişkilerin hepsi (tespit edilen elementler kadarıyla) Mendeleev tarafından saptanmıştı. Yine de bu düzenleme görgüldü ve bir elementin *niçin* diğerinin kuzeni olduğunun anlaşılması olanaklı değildi. Bir madde türü nasıl bir diğeriyile ilişkili olabilirdi? 20. yüzyılın başlarında atomların yapısı anlaşıncaya bu soruya ışık tutulmuş oldu. 1920'lerde çekirdek bulunup elektronları düzenleyen yasalar saptanınca, *periyodik tablonun Schrödinger'in denklemlerinin çözümlerinin bir betimlemesi* olduğu hemen açığa çıktı. Tablonun malzemesi matematiktendi. İki basit fikirle (elektronların mümkün olan en düşük enerjiye göre düzenlendikleri ve belirli bir yörüngeseli ikiden fazla elektronun işgal edemeyeceği) maddenin örüntüsü anlaşılır oldu. Kimya maddenin anlaşılmasının temelinde yatar ve kimyanın temelinde de onun söylemindeki temel birim olan atomlar yatar.

6

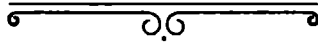
SİMETRİ

GÜZELLİĞİN NİCELİKSELLEŞMESİ



BÜYÜK FİKİR

Simetri sınırlar, yol gösterir ve yönlendirir



*Hrisippos güzelliğin unsurlarda değil, parçaların simetrisinde
yattığını savunur.¹*

GALEN

Bu güzel dünyayı anlamanın anahtarı güzellik olmasın? MÖ 450–420 yılları arasında olgunluk dönemini yaşamış Yunan heykeltıraş Argoslu Polykleitos kendi estetik rehberi olan *Canon*’unda “güzellik azar azar, ama çok sayıdanın dolayımıyla oluşur” derken şu anki temel parçacıklar kavrayışımızın temelini ortaya koydu. Polykleitos *symmetria* sözcüğüyle, insan vücudunun gevşemiş ve gerilmiş kısımlarının karşılıklı dinamik dengesini ve bu kısımların ahenkli bir bütünü sağlayan göreceli uyumunu anlatıyordu. İki buçuk bin yıl sonra maddenin oyuklarındaki temel varlıkların ve bu varlıkları bir arada tutan karşılıklı

¹ Pergamonlu (Bergamalı) Galen (MS. 129–199), Polykleitos üzerine yazısından.

dinamik dengenin anlaşılması için simetrinin matematiksel görünümlerine (ve matematiğin simetrik görünümlerine) başvuruyoruz.

Güzellik derken simetriyi ve simetrinin kontrollü kaybını, Mondrian'ın Monet haline gelmesini kastediyorsak, o halde güzellik gerçekten de dünyanın temelinde yatıyordur. Bu güzelliğin bir kısmı hemen anlaşılmaya uygundur, hoşumuza giden bir tasarıma baktığımızda olduğu gibi. Fakat bazıları da derinde saklıdır ve eğitimsiz gözlere görünmez. Polykleitos'tan bugüne binlerce yılda bu saklı güzellik, güzellik değerlendirmesinin matematiksel biçime taşınması ve ardından bu matematiksel araçların gerçekliğin görünümünün daha derinine inilmesi için kullanılması yoluyla aranıp durdu. Daha önce vurguladığım üzere bilim ilerledikçe, kavramlarının soyutlamasını arttırarak, derinliğini ve erişimini arttırdı. Bu geçiş en net biçimde simetrinin keşfi ve anlamının bir aracı olarak kullanımında görülür.

Şimdi dolaysız olandan hayal edilene uzanan bu yolda sizlere mümkün olan en dikkatli biçimde rehberlik edecek ve simetrinin bize armağan ettiği gücü göstereceğim. Yol bizi hayal edilemez olanın tam eşğine dek götürecektir.

Bir cisim eğer üzerinde uygulanan bir eylem (buna *simetri işlemi* diyoruz) onu görünüm yönünden değiştirmiyorsa, simetrik demektir. Başka bir ifadeyle, bir anlığına gözlerinizi kapattınız, sonra tekrar açtınız diyelim, bir eylem gerçekleştirip gerçekleştirmediğimi söyleyecek durumda olmazsınız. Süssüz basit bir top düşünün, gözlerinizi bir saniye kapatın, açın: Topu döndürdüm mü? Aklımıza gelen eylemler bir eksen etrafında döndürme ya da ayna yansıması olabilir, ama değerlendirmemiz gereken birçok başka simetri operasyonu vardır, ilk bahsedilen eylemlerin karmaşık bileşimleri de buna dahildir, uzayda ilerleyen bir hareketin (buna *çeviri* denir) ardından gelen bir ayna yansıması da olabilir. Yansıma müzikte de görülür. Bunun rahatça görülebileceği bir örnek olarak "Mozart"ın iki kısımdan oluşan muhtelemelen sahne kompozisyonunu verelim. Şöyle başlar:



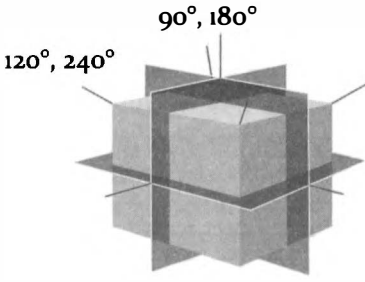
Ve ikinci kısım ilk kısmın yansıması şeklinde şöyle sonlanır:²



Bazı cisimler diğerlerinden daha simetriktir. Küre son derece simetriktir, normalde karşılaştığımız en simetrik cisimlerden biridir. Benim bir küreyi sizin gözleriniz kapalıyken, tekrar açtığınızda saptayamayacağınız kaç farklı şekilde değiştirebileceğimi düşünün. Merkez eksenini etrafında sonsuz sayıda çevirebilirim ve dönme açısı 0 ile 360° arasında herhangi bir yerde yer alabilir. Hepsi bu da değil. Kürenin merkezinden geçen bir ayna düşünebilirim, bu sonsuz sayıda yönelimden herhangi birinde olabilir ve sizin bir yarıkürenin diğerine yansımasını saptayabilmeniz mümkün değildir. Zihnimde gerçekleştirebileceğim bir başka eylem daha var: Topun her bir atomunu kürenin merkezine doğru düz bir çizgiye taşıdığımı ve ardından atomu diğer tarafa doğru eşit mesafede hareket ettirdiğimi düşünebilirim. Bu yolla topu *ters çevirme* adı verilen eylemle yeniden inşa ediyorum. Bunu yaptığımı söyleyemezsiniz, çünkü top ters çevrildikten sonra ilk baştakiyle tamamen aynı gözükür.

Küp küreye oranla çok daha az simetriktir. Gerçekleştirdiğimi bilmeyeceğiniz eylemlere birkaç örnek vereyim. Bir kübün yüzünün karşısındaki yüzle beraber oluşturduğu ikiliyi düşünün. Bu üç adet ikiliden herhangi birini merkez eksenini etrafında saat yönünde veya zıt yönde 90° ya da 180° döndürebilirim (Şekil 6.1). Zıt kenarlardan geçen dört eksenin herhangi biri etrafında saat yönünde ya da tersi yönde 120° döndürebilirim. Aynayı kübün ortadan kesecek şekilde koyabildiğim üç düzlemden herhangi birinden yansıma yapabilirim. Merkezinden ters çevirme yoluyla

² Bu kompozisyona Köchel dizininde 609 sayısını vermek uygun düşecektir. Fakat diğer A. Einstein, Alfred bu parçayı kuşkuyla parçalar *Anhang*'i içerisinde göstermektedir (Anh. 284dd).



Şekil 6.1 Küpte yapılabilecek simetri işlemlerinden bazıları. Bir kübün herhangi bir yüzüne dik eksen etrafında 90° ya da 180° ve zıt köşelerden geçen bir eksen etrafında 120° ya da 240° döndürdüğümüzde, küp değişmemiş gibi gözükür. Gösterilen düzlemlerin herhangi birinin ayna görüntüsünde de görünüm değişmez. İki simetri işlemi daha yapılabilir: Kübün merkezinden yansıtma ve özdeşlik (hiçbir şey yapmama).

kübü yeniden kurabilirim. Hatta kübe hiç dokunmayabilirim: Bilemezsiniz. Dolayısıyla, bir cismin simetrisini ele aldığımızda eklemem gereken bir işlem de bir şey yapmamaktır (buna *özdeşlik işlemi* deniyor). Benim yapabileceğim, fakat sizin saptayamayacağınız birçok işlem saydım; demek ki küp son derece simetrik, ama şüphesiz saptanamayan eylem sayısı sonsuz olan küre kadar da simetrik değil.

Aslında rafine anlamıyla her şey simetriktir. Bunun nedeni düşünmemiz gereken simetri işlemlerine özdeşliği de dahil etmiş olmamızdır, öte yandan görebileceğimiz en simetrik olmayan nesne bile (buruşturulup parçalanmış gazete kâğıdı), ona başka bir şey yapmadığımızda gözlerimizi açtığımızda aynı görünür. Burada bir hile var gibi gözükebilir ki var da zaten. Fakat özdeşliğin de dahil edilmesi bir matematik kuramı olarak simetrinin kapsamına bütün nesneleri sokuyor ve böylece simetri argümanlarını sadece “simetrik” olduğunu düşündüğümüz nesneleri değil, her şeyi tartışmak için kullanabiliyoruz. Matematik böyledir: Teoremlerinin erişimini mümkün olduğunca artırmak için tanımları genelleştirir. Elbette her şey (bu hileli anlamda) simetrikse de, bazı şeyler diğerlerinden daha simetriktir. “Daha simetrik” demek basit ifadesiyle, gözlerimizi açtığımızda bir eylemin gerçekleşip gerçekleşmediğini söyleyemeyeceğimiz şekilde değişmiş olmanın daha fazla yoluna sahip olmak demektir. Bir küre bir küpten daha simetriktir, bir küp de bir palmye ağacından daha simetriktir. Gördüğünüz üzere artık nesneleri simetri

derecelerine göre sıralayabiliyoruz: Simetri duygusu sayısal hale geliyor.

Bu duygunun kesin tanımlara dökülüp netleşerek formel bir yapı kazandığı matematiksel simetri kuramına *öbek kuramı* (*grup teorisi*) denmektedir. Kuram ismini, bahsettiğimiz simetri işlemlerinin matematikte *öbek* dediğimiz şeyi oluşturması olgusundan alıyor. Genel anlamıyla öbek, bir şeyler kümesi ile bir birleşim kuralından oluşur ve bu şeylerin herhangi bir çiftinin bileşiminin de kümenin üyesi olması gerekir. Tekrar kübe dönerek simetri işlemlerinin niçin öbek oluşturduklarını görebiliriz. Arka arkaya iki eylem yaptığımızı varsayalım; kübün bir dik eksenini etrafında 90° döndürdüm, ardından da ortaya çıkan kübün köşegen bir eksen etrafında 120° döndürdüm. Kübün diğer köşegen eksenlerden birinin etrafında 120° döndürmüş olsaydım da, sonuç aynı olurdu, dolayısıyla art arda gerçekleştirilen iki eylem tek bir simetri işlemine denktir. Bir kübün bütün simetri işlemlerinde aynısı geçerlidir, dolayısıyla bu eylemler bir öbek oluşturur. Farklı biçimlerdeki simetri işlemleri öbeklerine farklı isimler verilir. Örneğin bir kürenin devasa simetri grubuna $SO(3)$ denir. $SU(2)$ ve $SU(3)$ gibi isimleri olan başka öbeklerle de karşılaşacağız.³

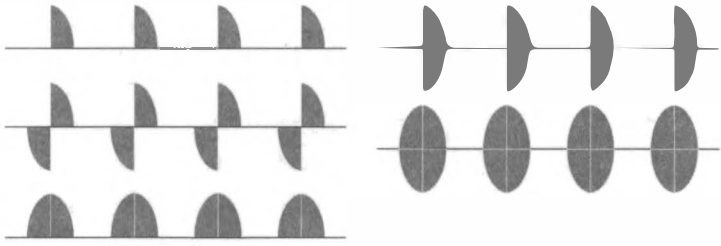
Öbek (grup) kavramı elbette simetri işlemlerinin çok ötesine uzanıyor ve sadece onunla sınırlı değil, bu yüzden de öbek kuramı matematiğin güçlü ve önemli bir parçası. Örneğin bütün pozitif ve negatif tamsayıları $\dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$ bir “şeyler” kümesi olarak alalım ve bileşim kuralı da toplama olsun. Bu durumda iki tamsayının toplamı da tamsayı olduğu için, tamsayılar toplama alanında bir öbek oluştururlar. Dolayısıyla aritmetik öbek teorisinin bir parçasıdır ve gerçek nesnelerin simetrikleri hakkında konuşmak için kullandığımız fikirler aritmetikteki fikirlerin tartışılması için de kullanılabilir; tersi de geçerlidir. Bu bölümde bu yönde ilerlemeyeceğiz, ama bu 10. Bölümde karşımıza çıkacak. Şimdilik kitabımızın bütününe de sinmiş olan şu

3 Verilen isimler öbeklerin şimdi burada girmemizin uygun olmayacağı bazı teknik özelliklerini yansıtıyor; sadece şunu söyleyelim: O “ortogonal” (dikey), U “üniter” anlamına, S bu öbeklerin bir “spesiyal” (özel) versiyonuna karşılık geliyor.

fikir aklınızda bulunsun yeter: Basit bir fikir neredeyse sınırsız genellikte bir uygulamaya sahip olabilir.

Tekrar simetrisinin kendisini ele almaya dönelim. Bir cismin bir noktasını değişmeden bırakan simetri işlemleri öbeklerini uzayda hareketi içeren öbeklerden ayırt etmemiz gerekir. Birincilere *nokta grupları*, ikincilere *uzay grupları* denir. Bir küredeki bütün simetri işlemleri ve de bir küptekiler, merkezindeki noktayı ilk başlangıçtakiyle aynı yerde yerde bırakır. Eğer bir eylem bir tekil cismin merkez noktasını hareket ettirseydi, örneğin bir küre merkezinden geçmeyen bir düzleme yansıtıldığında olduğu gibi, bir şeyin yapılmış olduğunu söyleyebilirdik ve eylem bir simetri operasyonu olmazdı. Tekil cisimlerin tüm simetri işlemleri en az bir noktayı değişmeden bırakır, dolayısıyla tekil cisimlerin simetrileri nokta gruplarınca tanımlanır.

Uzayda devam eden örüntüler uzay gruplarınca tanımlanır. Burada da biraz hile yapmamız gerek: Örüntüyü herhangi bir yönde sonsuza dek devam ediyor gibi düşünün ya da kendimizi örüntülerin uçlarında neler olduğunu göremeyecek kadar dar görüşlü olarak kabul edelim. Bir boyutta etkin şekilde sonsuza dek devam eden örüntülere frizlerde görülen tipik simetri özelliklerini gösterdikleri için *friz örüntüleri* denir. Klasik mimariden bildiğimiz friz tanımı, sütun baştabanı ile pervaz arasında yer alan ve yapının kolonlarla desteklenen parçası olan sütun pervazının merkez kısmını oluşturan yatay şerittir. Daha az resmi bir ifadeyle friz, uzunluğu boyunca düzenli şekilde tekrarlanan bir motife sahip yatay süslenmiş şerittir. Burada grup teorisinin uyuyan devi tek gözünü açar ve sahip olduğu olağanüstü bilgilerden ilkinizi bizimle paylaşır: *Mümkün olan yalnızca beş friz çeşidi vardır*. Daha önce yapılmış ve ileride yapılabilecek olan bütün frizler bu beş farklı çeşitten birine dahildir (Şekil 6.2). Motifler farklı olabilir elbette (yaylar, elmaslar, keçiler, dalgalar), ama örüntü periyodik şekilde tekrar edildiği müddetçe (frize benzeyen ama tekrarlı olmayan Elgin Mermerleri, diğer adıyla Parthenon Mermerleri bu noktada dışarda kalır) uzaydaki düzenlenişleri bu beş farklı çeşitle sınırlıdır.

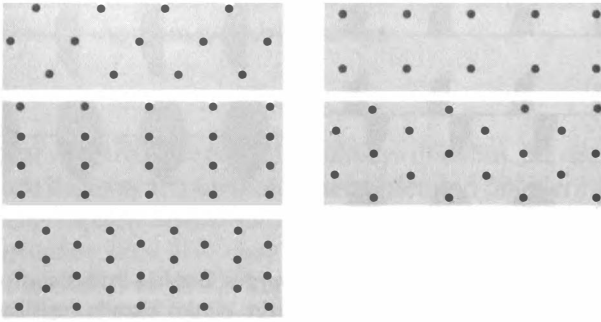


Şekil 6.2 Bu şekiller bir boyutta izin verilen beş friz örüntüsünü simgeliyor. Farklı çok sayıda tasarım vardır, çünkü burada çeşitli yönlendirmelerde gösterilen bölgenin yerini herhangi bir başka özellik alabilir, fakat bu beş örüntü bize mümkün olan bütün düzenli frizlerin yapı iskelesini verir.

Grup teorisinin ulaşabildiği baş döndürücü derinlik hakkında ilk kez bir fikir edinmiş oluyoruz. Devasa bir entelektüel sıçrama yapacak olursak (bu bölüm ilerledikçe atacağımız küçük adımlarla buraya ulaşmaya çalışacağız, ama nereye gittiğimizi bilmekte fayda olabilir), simetri nasıl uzayda mümkün olan örüntü sayısını sınırlıyorsa, aynı şekilde uzayzamanın simetrisinin de (artık her ne demekse) var olabilen temel parçacık türlerinin sayısını sınırladığını belki de kabul etmeye başlarız. Simetri sınırlar.

Mimari Yunan tapınaklarından bungalovlara doğru ilerlerken tahmin edilebileceği gibi sütun pervazları giderek azaldı ve friz yerini duvar kâğıdına bıraktı. Duvar kâğıtlarındaki örüntüler iki boyutta süresiz şekilde devam eder ve iç dekoratörlerin ve duvar kâğıdı üreticilerinin numune katalogları bu örüntülerin farklı motifli çeşitleri (şeritler, güller, tavuskuşları) ve renkleriyle dolar. Fakat grup teorisi yine bize inanılmaz bir gerçeği açıklar: *Yalnızca on yedi çeşit duvar kâğıdı örüntüsü vardır.*

Biraz daha kesin konuşalım. Ağ kelimesiyle kastettiğimiz şey, tavuskuşunun ya da zevkinize uygun seçtiğiniz motif neyse onun yerini temsil eden noktalar dizisidir. Duvar kâğıdı örüntüsü motif ile ağın bileşimidir. Dolayısıyla ağda farklı noktalar tavuskuşlarının hepsini dikteltebilir ya da hepsini dikteltmekle kalmayıp tehlikeli şekilde baş aşağı çevirebilir. Bu ayrımı aklımızda tutarak belirtelim, grup teorisi *yalnızca beş ağ türü ve ağ ile motifin on*

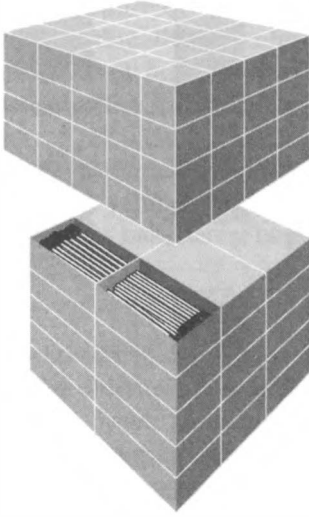


Şekil 6.3 Bu örüntüler iki boyutlu bir duvar kâğıdında olanaklı olan beş ağı göstermektedir. Her bir noktaya imgeler eklenerek gerçek tasarıma ulaşılabilir, ama bu durumda bile yalnızca on yedi sonucun mümkün olduğu ortaya çıkar.

yedi bileşimi olduğunu gösterir (Şekil 6.3). Ziyaret ettiğiniz odalardaki duvar kâğıtlarını, karşılaştığınız sokak kaldırımlarını, çatılardaki kiremitleri, hatta kravatınızın (periyodik giyiyorsanız) tasarımını kontrol ederek, ağı (bu normalde kolaydır) ve genel örüntüyü (bazı motifler çok ayrıntılı olduğu için daha zor olabilir) tanıma becerinizi sınamanız sizin için ilginç bir alıştırmaya olabilir. Grup teorisinin duvar kâğıdı tasarımlarının toplam evreni olarak tanımladığı on yediden birisine ait olmayan bir tekrarlı örüntüyü asla bulamayacaksınız.

Şimdi de bütün uzayı dolduran üç boyutlu paketleme örüntülerini ele alalım. Gündelik örneklerden biri en basit örüntülerden birine sahiptir: Küp şekerlerin hepsi bir kutuda paketlenir ya da (yerleştirilen cisimler kübik olmadığı için simetrisi biraz daha düşük olan) kibritler bir kutuya istiflenir (Şekil 6.4). Burada ele aldığımız ayrıntıya göre farklı simetriler yükleyebileceğimizi görebiliyoruz, çünkü özelliksiz kibrit kutuları bir simetri oluşturacak şekilde istiflenir, ama kutunun tasarımını ve belki de kutunun içerisindeki kibritlerin yönlendirilmesini göz önüne aldığımızda, bu bizim paketlemeye biraz daha düşük simetri atfetmemiz sonucunu verir.

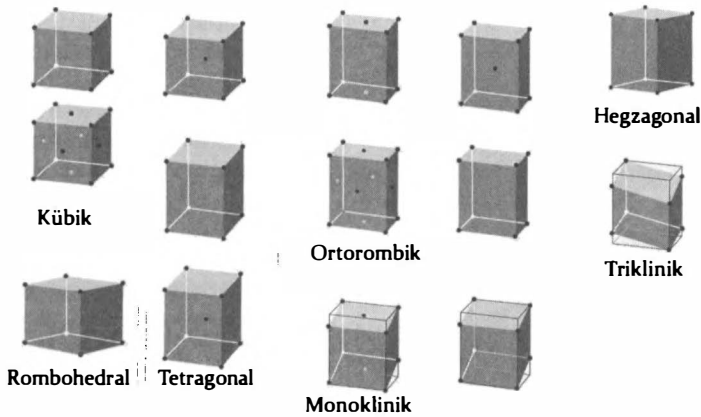
Kaç adet üç boyutlu örüntü vardır? Farklı sorular sorarak farklı simetrilerin farkına varabiliriz. Dalton'un atom hipoteziyle



Şekil 6.4 Üç boyutlu uzaydaki iki istif düzenlemesi. Üstteki çizim kübik birim hücrelerin (“küp şekerler”) beraber istiflenişini gösteriyor. Altındaki çizimse dikdörtgen biçimli birim hücreleri gösteriyor (“kibrit kutuları”). Birim hücrelerin bu şekilde periyodik bir yapı oluşturacak tarzda istiflenebilmesi için alabileceği yedi genel şekil var. Hücreler de genel simetriyi etkileyen varlıklar içerebilir: Farklı yönlere bakan kibritler içeren kutular olabileceğini sergilemek için iki kibrit kutusunun iç yapısını gösterdik.

bağlantılı olarak bahsettiğimiz dönüştürme tekniğinin ilk örneklerinden birinde Fransız maden bilimci ve rahip René-Just Haüy (1743–1822) 1784 yılında *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux* adlı makalesinde kristallerin dış formunun daha küçük birimlerin düzenlenişini yansıttığını ileri sürdü. Bu fikre çok saf bir kalsit kristalini (kristalleşmiş saydam bir kalsiyum karbonat) yere düşürdüğünde ve ilk baştakine benzer küçük parçalara böldüğünü gördüğünde ulaştı. Yıkıcı bir kaza nadiren böyle iyi bir sonuca yol açar. Bugün dönmelere başvurmaksızın beraber istiflendiğinde bütün yeri dolduran küçük bir bloğa *birim hücre* diyoruz. Birim hücreler kübik (küp şekerler gibi), bir boyutu diğer ikisinden farklı şekilde dikdörtgen, üç boyutunun hepsi farklı olacak şekilde dikdörtgen (kibrit kutusundaki gibi) ya da karşıdaki yüzleri paralel olmasına rağmen (birim hücrenin bütün uzayı dolduracak şekilde dolması için olması gerekir) yanındaki yüzleri dik olmayacak şekilde eğik olabilirler. Sonuç olarak bu birim hücreler yalnızca *yedi* şekilde olabilir.

Nasıl duvar kâğıdında ileride motiflerin yer alacağı noktaların yerine bakarak beş ağ tespit ettiysek, aynısını birim hücreler için de yapabiliriz. Ortaya çıkan üç boyutta mümkün nok-



Şekil 6.5 Üç boyutlu duvar kâğıdı benzeşimlerine *Bravais kafesleri* denmektedir. Üç boyutta on dört Bravais kafesi vardır. Bir varlık her noktayla çeşitli biçimlerde bağlantılanabilir, ama 20’den fazla düzenleme mümkün değildir.

ta düzenlemelerine *Bravais kafesleri* denir ve ismini bunları ilk kez listeleyen Fransız dağcı, maceracı ve fizikçi Auguste Bravais’ten (1811–1863) almaktadır. Sayılarının yalnızca on dört olduğu ortaya çıkmıştır (Şekil 6.5).⁴ Bütün uzayı düzenli tarzda (kutulardaki teneke konserveler, kaplarındaki yumurtalar, teşhir reyonlarındaki meyveler gibi) dolduracak şekilde istiflenmiş cisimlerle karşılaştığınızda, bilin ki bunların hepsi bu on dört düzenlemeden birisine uymaktadır.

Nasıl bir motifi bir noktalar ağına farklı biçimlerde yükleme yoluyla (dik duran tavuskuşları, farklı tavuskuşları vs) on yedi temel duvar kâğıdı çeşidi elde ediyorsak, aynı şekilde bir motifi (bir kibrit kutusunun kapağındaki tasarım ya da kibritlerin düzenlenme biçimi gibi) Bravais kafesindeki her bir noktayla ilişkilendirebiliriz. Ortaya çıkan örüntülerin dikkatle incelenmesi gösteriyor ki *mümkün olan yalnızca 230 düzenleme vardır*. Burada “yalnızca” sözcüğünün kullanımının uygunsuz gözükebilece-

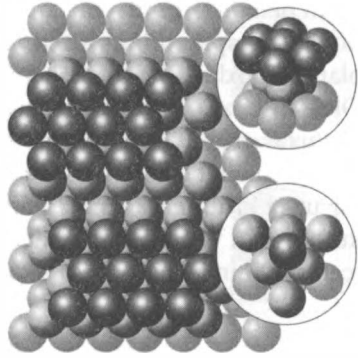
4 Farklı bakış açılarından görmek için birim hücrelerini döndürebileceğiniz bir site: <http://www.minweb.co.uk/bravais/bravais.html>.

ğinin ben de farkındayım, ama asıl mesele sayının sonlu ve kesin biçimde tespit edilmiş olmasıdır: Sayı 228 ya da 229 değil, tam olarak 230'dur. Bu düzenlemelere *uzay grupları* denmektedir. Olası bütün üç boyutlu, uzayı dolduran, periyodik tasarımlar bu 230 uzay grubu içerisinde yer alır. Hepsi aynı yöne bakan kibritler içeren tek biçimli, süslenmemiş kibrit kutularının paketlenişi bir uzay grubuna karşılık gelir; aynı düzenlenişteki aynı kibrit kutularının yanındaki kutulara göre farklı yöne bakan kibritler içerenlerinin paketlenişi başka bir uzay grubuna karşılık gelir.

Portakallarını sergi amaçlı düzenleyen bir manav, doğanın kristaller oluşturacak şekilde atomları istifleme biçimini bilinçsiz olarak örnek almaktadır ve bu noktada esinlendiği simetri ve uzay gruplarının önemli bir araştırma ve sınıflandırma aracı haline gelmesi yaşanır. Manavın sergisinde kürelerin tek biçimli istiflenmesinden neredeyse düz düzlemler ortaya çıkabildiğini görürüz. Örneğin çinko ya da bakır gibi metalik bir elementin tek bir kristalinin düz yüzeyi bu yüzeylerden birisidir. Atomların ve moleküllerin simetrisinin izin verdiği 230 olası düzenlemeden birini oluşturmak için nasıl istiflendiklerinin ayrıntılarına girmek için burası uygun değil, ama biraz girelim.

Atomların bilyeler gibi sert küreler olduklarını düşünersek, her bir katman altı komşuyla çevrili olmak üzere (özdeş kürelerde mümkün olan en büyük sayı) bir arada bulunan bu atomlardan oluşan bir katman düşünebiliriz. İlk katmandaki her boşluğa bir atom ekleyerek yeni bir katman oluşturulabilir (Şekil 6.6). Üçüncü bir katman iki biçimde oluşturulabilir. Birincisinde atomları ilk katmanın atomlarının konumlarının üstünde yer alan boşluklara yerleştiririz; ikincisinde ilk katmanın boşluklarının üzerindeki aralara yerleştiririz. Katmanları A, B, C,... şeklinde adlandıırırsak, bu durumda ilk düzenlememiz ABABAB... ikinci düzenlememiz ABCABC... olur. İlk küre düzenlemesine dikkatle bakarsanız hegzagonal bir düzenleme, hegzagonal bir birim hücre tespit edersiniz. İkinci düzenlemede ise kübik bir düzenleme olduğunu görebilirsiniz (küp düzlemlerin üzerinde eğik olduğu için bunun fark edilmesi biraz daha zordur). Dola-

Şekil 6.6 Katı kürelerin (atomları temsil eden) mümkün olduğu kadar yakın istiflenmesi yoluyla düzgün iki yapı oluşturulabilir. En alt düzeyde (açık gri) her küre altı komşuyla temastadır. Buna A düzeyi diyelim. Ortadaki düzeyde (orta grilikte) küreler ilk katmanın ara boşluklarında yer alır. Buna B düzeyi diyelim. Bir sonraki katmanın küreleri (koyu gri), ilk katmandaki kürelerin hemen üstündeki ikinci katmanın ara boşluklarında yer alırsa, hegzagonal bir yapı elde ederiz (üstteki kısım). Eğer küreler A katmanındaki kürelerin tam üzerinde olmayan çukurlarda yer alırsa, kübik simetriye sahip bir ABC düzenlemesi elde ederiz.



yısıyla atom istiflemesinde izlenen bu iki yol farklı simetrik kristallere yol açar. Kobalt, magnezyum ve çinko hegzagonal birim hücreler oluşturan metaller arasında bulunur. Gümüş, bakır ve demirse kübik birim hücreler oluşturan metallere dendir.

Birim hücrenin simetrisi katıların mekanik, optik ve elektriksel özelliklerine etki eder. Örneğin bir metalin sertliği *kayma düzlemlerinin* varlığına bağlıdır; bunlar çekiç darbesi gibi bir nedenle baskıya maruz kaldığında sınırı aşarak birbirine kayabilecek atom düzlemleridir. Şekil 6.6'daki atom tabakaları ya da birim hücreler dikkatle incelendiğinde hegzagonal biçimin sadece bir kayma düzlemleri kümesine sahip olduğu görülür (çizimde gösterilen düzlemlere paraleldirler), öte yandan kübik biçimde farklı yönlerde sekiz kayma düzlemleri kümesi vardır. Bu nedenle hegzagonal yapıya sahip metaller (örneğin çinko) kırılanken, kübik yapıya sahip metaller (örneğin bakır ve demir) dövülgendir, görece daha rahat biçimde bükülebilir, düzleştirilebilir, işlenebilir ve farklı şekillere sokulabilirler. Elektrik sanayi bakırın uzatılabilmesine bağlıdır, ulaşım ve inşaat sektörleri de demirin dövülgeliğine dayanır.

Başka bağlamlarda da gördüğümüz gibi düşünüşümüzü daha yüksek boyutlara doğru genişletmek her zaman eğlencelidir, sık sık da işe yarar. Bu genişletme uzayzamanın dört boyutunu düşündüğümüzde olduğu gibi bazen de büyük önem kazanır. Bu durumda daha yüksek boyutlu uzaylarda bulunabilecek örüntülerin sayısı sorusu karşımıza çıkar. Matematikçiler bu soruyu araştırmıştır. Dört uzay boyutunda “yalnızca” 4783 uzay grubu vardır, dolayısıyla beş boyutlu varlıklar (hiperkübik odalarını dekore etmek için dört boyutlu duvar kâğıtlarına gereksinim duyan varlıklar) biz üç boyutlularla karşılaştırıldıklarında duvar kâğıdı hipermarketlerinde çok daha geniş bir örüntü çeşitliliğine şahit olacaklardır.

Bütün simetriler kolayca görülmez, bu noktada daha yüksek soyutlamanın güzelliğini takdir etmeye başlamamızı sağlamaya çalışacağım. Şu andan itibaren anlatımın daha soyut ve kavramların görselleştirilmesinin daha zor olması kaçınılmaz; ama bu zorlukları ağır ağır ve dikkatle çözerek ilerleyeceğiz ve anlayabildiğinizi keşfetmek de size keyif verecek. Burada simetrinin artık yalnızca betimleyici olmadığını, yasaların kaynağı olduğu için belli bir güç kazandığını göreceğiz. Simetri rehberlik eder.

Simetrinin sahip olduğu bu yol gösterme ve kontrol etme gücünün bir örneğini daha önce de gördük. 3. Bölümde enerjinin korunumunun zamanın düzgünlüğünün bir sonucu olduğunu gördük. Zamanın pürüzsüz olması, topaklara (ya da yumrulara) sahip olmaması (daha formel ifadesiyle zamanın dönüştürülebilirlik yönünden değişmez olması) enerjinin korunduğuna işaret eder. Doğrusal momentumun korunmasının uzayın pürüzsüzlüğünün (uzayın kuvvetlerin yokluğunda dönüştürülebilirlik yönünden değişmez olmasının) sonucu olduğunu ve açısal momentumun korunmasının da uzayın yönbağımsızlığının (uzayın torkların yokluğunda dönme yönünden değişmez olmasının) sonucu olduğunu gördük. Uzay ve zamanın topaklı (ya da yumrulu) olmaması simetrilerinin bir ifadesidir, dolayısıyla bu güçlü korunum yasalarının simetriden kaynaklandığını görüyoruz. Emmy (1882–1935), dünyanın şimdiye kadar ürettiği en önemli ve etkili

kadın matematikçi, bugün Noether teoremi adıyla anılan o olağanüstü önemli sonucu tespit etti: Bir yerde simetri varsa, orada her zaman buna karşılık gelen bir korunum yasası vardır.

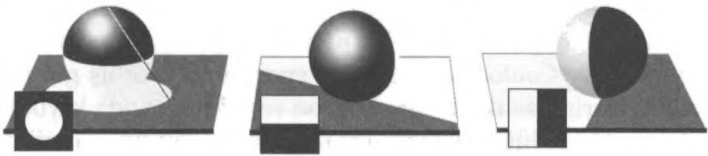
Bazı simetriler doğrudan gözlemlerle tespit edilemez, ama yine de sonuçları olur. Bu noktada sizden sadece tesadüflerin farkına varmanızı ve bunların simetrisinin bir sonucu olup olmadığını merak etmenizi istiyorum. Görünümler yüzeyinin altında simetrisinin puslu kurmuş şekilde yattığının bir göstergesi, farklı parçacık düzenlemelerinin tam olarak aynı enerjiye sahip olmasıdır: İki düzenleme bir simetri işlemi yoluyla birbiriyle bağlantılıysa, o halde bu iki düzenlemenin enerjisi aynıdır. Bunun güzel bir örneğiyle 5. Bölümde karşılaşmış, hidrojen atomunda bir elektronun bir s-yörüngesine yerleştiğindeki enerjisi ile aynı kabuktaki üç p-yörüngeselinin birine yerleştiğinde sahip olduğu enerjinin tamamen aynı olduğunu görmüştük. Bir s-yörüngeseli küre biçimindedir ve p-yörüngeseli iki lobludur, dolayısıyla bir p-yörüngeselinin bir başka p-yörüngesine döndürülebileceğini görmek kolayken, bir p-yörüngeselinin bir s-yörüngesine döndürülebildiğini apaçık görmek çok zordur. Bu bağlamda potansiyel enerjinin (Coulomb potansiyel enerjisi denen, çekirdeğin elektrik alanındaki elektronun yerinden kaynaklanan enerji) kendisine özgü bir güzelliğe sahip olduğundan bahsetmiştim, şimdi bunun ne anlama geldiğini açıklayabilirim.

Coulomb potansiyel enerjisi küresel açıdan simetriktir. Bu şu anlama gelir: Elektronu çekirdekten hangi uzaklığa koyarsak koyalım (ister Kuzey ya da Güney kutbu, ister Ekvator, isterse de arada bir yer olsun) potansiyel enerjisi tamamen aynıdır. Potansiyel enerji çekirdekten uzaklığa göre değişiklik gösterir, fakat verili bir uzaklıkta açıdan bağımsızdır. Bu küresel simetri bize atomun simetri dönüşümlerinin tıpkı bir kürenin simetri işlemlerinde olduğu gibi herhangi bir eksen çevresindeki herhangi bir açıda dönmeleri de içerdiğini söyler. Bu çerçevede üç p-yörüngeseli kürenin bir simetri işlemi tarafından birbirine döndürülebilir, dolayısıyla enerjileri aynıdır. Fakat yine de bir s-yörüngeselinin bir p-yörüngesine döndüremeyiz gibi gözükür.

İşte burada sıra dışı bir olguyla karşı karşıyayız: Coulomb potansiyel enerjisi yalnızca (gördüğümüz gibi) üç boyutta değil,

dört boyutta dönme simetrisine sahip olması anlamında hari-kadır. Bu daha yüksek simetri, üç boyutlu bir s-yörüngeseli üç boyutlu bir p-yörüngeseline dönüştüren bir dört boyutlu dönme olabileceği anlamına gelir. Eğer böyleyse ve farklı yörüngesel çeşitlerini birbirine döndürebiliyorsak, bu durumda aynı enerjiye sahip olacaklardır.

Sizlerden dört boyutta düşünmenizi istemenin (en azından 9. Bölüme dek) fazla şey istemek olduğunun farkındayım ve böyle bir talebim olmayacak. Onun yerine basit bir benzetme kullanacağım. Bir düzlemde duran bir küre hayal edin. Düzlem bizim üç boyutlu dünyamızı, küre sadece izdüşümünü gördüğümüz dört boyutlu bir dünyayı temsil etsin. Kürenin kuzey yarısını siyaha, güney yarısını beyaza boyadığımızı farz edin. Kuzey kutbundan bir çizgi çekebilir ve bunu kürenin yüzeyinden geçirerek düzleme yansıtabiliriz. Örüntülü kürenin bu izdüşümü bir çember gibi gözükür (Şekil 6.7). Şimdi küreyi 90° döndürerek çizimin ikinci kısmında gösterilen yere getirin. Yeni izdüşüm, düzlemi biri siyah, diğeri beyaz olmak üzere iki parçaya böler. Kürenin başka bir yönlenmesi çizimin üçüncü kısmında gösterilmektedir ve benzer ama 90° döndürülmüş bir izdüşüme sahiptir. Biz Düzülkeliler ikinci ve üçüncü izdüşümlerin bir dönmeye birbiriyle ilişkilendirilebileceğini akla çok yatkın buluruz, dolayısıyla “p-yörüngesellerinin” aynı enerjiye sahip olmasına şaşırmayız. Fakat birinci, çembersel şekle dönüştürülebilmelerini ise çok kafa karıştırıcı buluruz, dolayısıyla bir “s-yörüngeselinin” iki p-yörün-



Şekil 6.7 Boyut sayısını bir arttırarak s- ve p-yörüngesellerini birbirine döndürmenin nasıl mümkün olduğunun temsili gösterimi. Yörüngeseller iki boyutlu uzaydaki örüntülerce temsil edilmektedir. Bu örüntülerin üç boyutlu uzaydaki bir kürenin iki boyutlu uzaya izdüşümleri olduğunu kabul edersek, bu durumda kürenin döndürülmesinin iki boyuttaki örüntülerin yerlerini değiştirdiğini görebiliriz. Coulomb potansiyeli dört boyutlu simetriye sahiptir ve bu tür bir dönmenin yapılmasına izin verir.

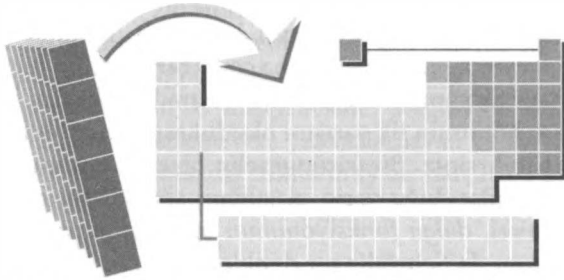
geseliyle aynı enerjiye sahip olduğunu göremeyiz. Üç boyuttaki gözlemci böyle bir zorlukla karşılaşmaz: O gözlemci bizim Düzülke örüntülerimizin hepsini bir kürenin basit dönmeleriyle bağlantılı izdüşümleri olarak görür. Tamamen aynı düşünüş bir hidrojen atomunun yörüngeselleri için de geçerlidir ve görünüm itibarıyla bağlantısız yörüngesellerin enerjilerinin eşitliğinin orada dördüncü bir boyutta gizlenmiş bir simetrisinin olmasının bir sonucu olduğunu görürüz.

Birazdan faydasını göreceğimiz çok güçlü bir başka düşünceyi daha aktaralım. Bir s-yörüngesindeki elektronun enerjisi ile bir p-yörüngesindeki elektronun enerjisi *tam olarak* aynı değildir. Bilim insanları bunun nedenini bilir: Elektronun yörüngesel hareketi ile spini arasında çok zayıf manyetik etkileşimler vardır ve bunlar enerjileri hafifçe etkiler. Bu *simetri kırınımı* denen ve arka planda bir simetri bağıntısı olsa da, yaramazlık yapan başka zayıf etkileşimlerin farklı durumların enerjilerinin birbirlerinden farklılaşmasına sebep olduğu sürecin bir örneğidir. Simetri kırınımı etkisine bakmanın bir diğer yolu, Einstein'ın özel görelilik kuramına göre enerji ve kütle denkleminin aynı olduğunu hatırlamaktır ($E = mc^2$, 9. Bölüm), dolayısıyla s- ve p-yörüngesellerindeki elektronların enerjilerindeki farkı kütlede bir fark olarak ifade edebiliriz. Başka bir deyişle, *kütle farkları simetri kırınımını etkileşimlerden kaynaklanır*. Bu örnekteki enerji farkı çok küçüktür, dolayısıyla simetri kırınımından doğan kütle farkı son derece küçüktür: 1×10^{-37} gr; ama yine de bu tamamen göz ardı edilebilir fark gerçekten önemli bir noktaya yol açacaktır.

Hayal edilebilecek en harika potansiyel enerji türü olan merkezi simetrik Coulomb potansiyel enerjisinin müthiş güzelliği atomun içerisinde ikinci bir elektron var olduğu anda kaybolur. 5. Bölümde gördüğümüz gibi bir hidrojen atomunun enerji düzeyleri diğer bütün atomların enerji düzeyleri için iyi bir ilk yaklaşımdır. Ardından elektronlar arasındaki elektrik etkilerden doğan enerji değişikliklerine izin vermemiz şartıyla (ki bu örneğin s-yörüngesellerindeki elektronların p-yörüngesellerindeki elektronlardan birazcık daha düşük enerjiye sahip olmalarına neden olur) periyodik tablonun yapısı otomatik olarak ortaya çıkar. Fa-

kat periyodik tablonun öneminin anlaşılmasının simetriye dayalı başka bir, daha karmaşık yolu vardır.

Bir ilk yaklaşım olarak bütün elementlerin atom yapılarını tam olarak hidrojeninkine benzer atom yörüngesellerinin bulunması cinsinden ifade edebiliriz. Hangi kabukta olursa olsun yörüngesellerin enerjileri aynı olduğu için bu yaklaşım kömik bir periyodik tabloyla sonuçlanır, çünkü bir kabuğun s- ve p-yörüngesellerinin (keza d- ve f-yörüngesellerinin) hepsi aynı enerjiye sahip olur; dolayısıyla tablonun yapısını kaybederiz ve elementlerin farklı kimyasal kişilikleri olmasına gerek kalmaz. İsterseniz tablonun gruplarını (dikey sütunlar) farklılaşmamış ve birbirinin üstüne yığılmış olarak düşünebilirsiniz. Fakat gerçekte elektronlar birbirleriyle etkileşime geçtiği ve Coulomb potansiyelinin dört boyutlu simetrisini kırdığı için, belirli bir kabuğun s- ve p-yörüngeselleri aynı enerjiye sahip değildir. Bu simetri kırınımına izin verdiğimizdeyse periyodik tablo bildiğimiz biçimiyle kristalize olur (Şekil 6.8). Periyodik tablonun sergilediği kimya bu yüzden her bir atomun içinde var olan bütün elektronlar arasındaki etkileşimlerce kırılan, altta yatan Coulomb potansiyel enerjisinin dört boyutlu simetrisinin kendini göstermesidir. Bu yaklaşımla kimya esasında simetrinin ve kırınımının, kimyasal elementlere kişiliklerini bahşeden mükemmel simetrinin kaybının bir ifade-



Şekil 6.8 Periyodik tablonun yapısının hayali bir betimlemesi. Elektronlar arasındaki etkileşimleri göz ardı edersek, her elektron çekirdeğin yüksek derecede simetrik Coulomb potansiyelini deneyimler ve periyodik tablo yapıya sahip olmaz (periyotlara dokunulmamıştır); bu durum çizimin solundaki gruplar yığınıyla gösterilmiştir. Simetri kırınımına izin verdiğimizde (yani elektron-elektron etkilerini hesaba kattığımızda) gruplar periyodik tablonun bildiğimiz yapısına yerleşirler.

sidir. Mendeleev simetri konusunda pek az şey bilir, gizli simetri konusunda hiçbir şey bilmez, simetri kırınımindansa tümünden habersizdi. Kendi tablosunun simetrisi kırılmış Coulomb potansiyel enerjisinin sonuçlarının ifadesi olduğu düşüncesinin onu büyüleyeceğini düşünüyorum.

Dahası da var. 5. Bölümde ayrıca elektronların Pauli dışarlama ilkesi tarafından aynı yörüngesele doluşmalarının engellendiğini, bunun herhangi bir yörüngesele ikiden fazla elektronun girmesini yasakladığını ve eğer iki elektron bir yörüngeselde yer alıyorsa, spinlerinin eşleşmiş (bir spin saat yönünde, diğeri zıt yönde) olmak zorunda olduğunu görmüştük. Bu ilkenin kökünde simetri yatar, dolayısıyla periyodik tablonun biçimi, atomların cüsse sahibi olmaları ve bizim çevremizden ayırık olmamız şeklindeki gözlem, hepsinin kökünde simetri yatar. Şimdi göreceğimiz üzere simetrinin Pauli ilkesinin altında yatışı, kavranması zor olmayan ama hemen de göze çarpmayan bir biçimdedir.

Kuantum kuramına göre elektronların izledikleri yolları takip edemediğimiz için evrendeki herhangi bir elektron bir diğerinden kesinlikle ayırt edilemez haldedir.⁵ Bu ayırt edilemezlik, eğer bir atomun içindeki iki elektronu birbiriyle değiştirecek olsaydık, atomun özelliklerinin tümünün aynı kalması gerektiği anlamına gelir. Başka bir deyişle elektronların *permütasyon simetrisi* göstermesi gerekir.

Bu noktada benim yörüngesel kavramını biraz genelleştirmemle beraber 7. Bölümdeki daha geniş tartışmanın bir ya da iki yönüne hazırlık yapmamız gerekiyor; buradaki dil size sorun yaratıyorsa, o bölümün ilk yarısını okuduktan sonra buraya tekrar dönüş yapabilirsiniz. Bir yörüngeselin bize bir atomun içindeki elektronun bulunduğu yerin olasılığını söylediğini görmüştük. Bir yörüngesel, *dalga fonksiyonunun* özel bir durumudur; dalga fonksiyonu da Schrödinger denkleminin sadece atomlardaki

5 Bir keresinde Richard Feynman John Wheeler'la bir telefon konuşmasında (ya da *vice versa*) yarı şaka yarı ciddi bütün elektronların aynı gözükmesinin sebebinin evrende sadece bir elektron olması ve bizim çok sayıda elektron olarak düşündüğümüz şeyin aslında zamanda ileri-geri vızıldayan bir elektronun yolundan alınan bir dilim olduğu fikrini ortaya atmış. Bunun çok daha ekonomik bir evren olacağı kesindir.

elektronlar için değil, herhangi bir çevredeki herhangi bir parçacık için çözümdür. Şu andan itibaren bu daha genel tanımı kullanacağız. Bilmemiz gereken ikinci nokta, bir parçacığı herhangi bir noktada bulma olasılığının (şu ana kadar bunu gölgelemenin yoğunluğuyla ifade ettik) o noktadaki dalga fonksiyonunun *karesi* olduğudur.⁶ Bu yorumun işaret ettiği bir sonuç, bir dalga fonksiyonu ile onun negatifinin aynı fiziksel öneme sahip olduğudur (çünkü kareleri aynıdır). Bu iki elektron yer değiştirmiş olduğunda dalga fonksiyonunun işaret değiştirmesi olasılığını mümkün kılar: Biz farkına varmayız. Gerçekten de durum budur. Pauli atomların yaydığı ışınının bazı ayrıntılarını, ancak eğer herhangi iki elektron yer değiştirdiğinde atomun dalga fonksiyonu işaret değiştiriyorsa açıklayabildiğini buldu. Buna elektron takası koşullarında dalga fonksiyonu *antisimetrik (ters simetrik)* olmak (yani işaret değiştirmek) zorunda diyoruz. Pauli dışarlama ilkesi, herhangi bir atom yörüngesinde ikiden fazla elektron olamayacağı gerçeği, bu daha derin gereklilikten doğmaktadır, dolayısıyla atomların yapısının, cüssesinin, bizim kendi cüssemizin kökü simetriye dayanmaktadır. Simetri şişirir.

Şimdi artık yeni bir soyutlama yapmak için hazırız ve umuyorum şu anda zihniniz buna hazır hale gelmiştir. Şimdiye dek bahsettiğimiz hemen hemen her şey uzayda gerçekleşen simetri işlemleriyle ilgiliydi. Ama uzay dışında da hayat var. Bu noktada parçacıkların iç simetrilerine, sergilenen bir kelebek gibi uzayda hareket edemeyen, yansıtılamayan ya da ters çevrilemeyen, bir uzay noktasına mihlanmış bir parçacığa gerçekleştirebileceğimiz eylemlere karşılık gelen simetrilere dikkatimizi yöneltmek durumundayız.

Bu simetrilere bazılarının (bunların simetriye yakın, kırık simetriler olduğunu göreceğiz) kafada canlandırılması görece kolaydır. 5. Bölümde karşılaştığımız iki çekirdek bileşeniyle başlayacağız, proton ve nötron ya da ikisinin beraber ismiyle *nükleonlar*. Bu iki parçacık şüpheli bir benzerlik taşıyor: Benzer kütlelere

6 Dalga fonksiyonlarının ve olasılıkların yorumlanma problemleri 7. Bölümde uzun uzadıya ele alınıyor.

sahiptirler (nötron çok az daha ağırdır, yani çok az daha yüksek bir enerjiye sahiptir) ve her ikisi de spin dediğimiz özelliğe sahiptir. Aralarındaki ana fark protonun yüklü, nötronun yüksüz olmasıdır. Şu an için kütle farklılığını göz ardı edersek, iki parçacık ikizdir. Yani aralarında bir simetri vardır. Parçacık fizikçileri bu simetriyi *izospin* (*eşspin*) denen (zira özellikleri spinin kendisine benzer) bir özellik cinsinden düşünürler. Saat yönünde izospin “açık” elektrik yüküne (proton) karşılık gelir; saat yönüne ters izospin “kapalı” elektrik yüküne (nötron) karşılık gelir. İki parçacık gerçekten aynıdır: Biri (proton) saat yönünde izospine sahip bir nükleondur, diğeri (nötron) saat yönüne ters izospine sahip bir nükleondur. Bir protonu bir nötrona dönüştürmek için tek yapmamız gereken izospinini ters yöne çevirmektir.

Bir ilk yaklaşım olarak, bir nükleonun özellikleri izospinin yönünden bağımsızdır. Fakat saat yönünde izospin ile saat yönüne ters izospin arasındaki simetri mükemmel değildir ve nükleonun elektromanyetik alanlarla etkileşimi gibi başka etkileşimlerce zayıfça kırılır. Bir elektromanyetik alanın etkileşim enerjisi saat yönünde izospin ile saat yönüne ters izospinde farklı farklıdır. Bu yüzden nükleonun iki durumunun kütleleri hafifçe farklıdır, bir nükleonun saat yönüne ters izospin durumunun (bir nötron) saat yönünde izospin durumundan (proton) çok az daha kütleli olduğu bilinmektedir.

İzospinin tespiti (Heisenberg tarafından) ondan iki yüzyıl önce Döbereiner’in bağlantılı üçlü elementler keşfine benzenmektedir (5. Bölüm). Döbereiner genel bir örüntünün parçalarını tespit etmiş, daha sonra bu örüntü Mendeleev tarafından saptanmış ve daha zayıf etkileşimlerce kırılmış altta yatan simetrisinin ifadesi olarak görülmüştür. Acaba bütün temel parçacıklar simetri yoluyla bağlantılı ve sahip oldukları farklı kütleler simetri kırılımının bir sonucu olabilir mi? Temel parçacıkların bir periyodik tablosu var mıdır ve bu tablonun kökü simetriye ve onun kısmi kaybına dayanıyor mudur?

Bir adım geriden bakmamız gerek. Mendeleev periyodik tablosunu derlemeyi başardı, çünkü elementlerin çok büyük bir oranı hakkında bilgiye erişim sahibiydi. Benzer şekilde bizim de içerde neler olduğunu görmek için parçacık dünyasına girmemiz

gerek. Döbereiner elindeki az miktarda veriyle üçlülerin ötesine geçen bir ilerleme kaydedememişti; biz de ancak daha geniş bir örüntü sergilemeye yetecek miktarda veriye sahip olduktan sonra ilerleme gösterebiliriz.

Parçacık fizikçileri vandal insanlardır. Uygarlığı ilerletme adına bir parça maddeyi alır, bunu hiddetle bir başkasına savurur ve çarpışmada ortaya çıkan paramparça kalıntıları karıştırırlar. Tahmin edeceğiniz gibi çarpışmanın şiddeti ne kadar büyükse, kırık parçalar o kadar küçük (ve tahminen daha temel) olur. Parçacığı parçacığa kırdırmak için kullanılan parçacık hızlandırıcıları antik Yunanların rüyalarının gerçekleşmesidir, çünkü bunlarla kesme işlemini maddenin en sonuna dek sürdürebiliriz.

Çıkabilecek bir soruna karşı uyaralım. Maddenin hangi parçalarının ufalanacağı çarpışmanın gücüne bağlıdır. Belki de kesme işleminin en sonuna ulaştığımıza asla emin olmayacağız, zira daha büyük bir hızlandırıcı yapılarak daha fazla kesim yapılabilir (bu işte büyüklük gerçekten önemlidir, çünkü güç büyüklükle gelir). Bu bölümün sonuna doğru aşağıdaki dünyanın en ucunun anlaşılmasını test etmek için, görünen o ki belki de evreni kaplayan ve maliyet ve kaynakları her yerdeki ekonomilerin çıktılarının toplamından daha fazla emen bir hızlandırıcı inşa etmemiz gerekeceğini göreceğiz.

Bunu göz önüne aldığımızda Dalton'un iki yüzyıl önce atomlara ulaşmak için yeterli enerjiyi (cılız, kimyasal enerji) toplayıp iç işleyişlerinden bağımsız olarak kişiliklerine dayalı kuramlar oluşturabildiğinde ulaştığı aşamaya henüz ulaşmış olabiliriz. Ters bir Everest'e tırmanan dağcılar gibi, bilim de derinliklere doğru ilerleyen yolculuğunun çeşitli iniş aşamalarında mola vermekten ve aceleyle bilinmeyene fazla derin dalmamaktan memnun olur. Atomlar Victoria dönemi insanları için de yeterince temeldi; bizim temel parçacıklarımız bizim için de yeterince temel kabul edilecektir. Başka bir deyişle şu an için (ama bölümün sonunda bu farklılaşacak) parçacıkların şu anki hayvanat bahçesinin gerçek hayvanat bahçesi ya da en azından yeterince temel bir hayvanat bahçesi olduğunu kabul edelim ve bizim avcı-vandalla-

rımızın atomların ilk kez parçalandığı 1897'den ve çekirdeklerin saldırılar karşısında teslim olduğu 1919'dan bu yana esir ettikleri hayvanlarla tanışalım.

Parçacıkları düşündüğümüzde, onları oluşturan parçaları ve bu parçaları bir arada tutan kuvvetleri, tutkalı düşünürüz. Bilimciler bir kuvvetin bütün etkileşimlerden sorumlu olduğunu buldu. Bu biraz abartı oldu: Daha kesin ifade edersek, evrende yalnızca bir kuvvetin etkimekte olduğuna, bunun gayet ekonomik bir kuvvet olmakla beraber kendisini beş farklı biçimde gösterdiğine inanıyorlar. Bu gösterimlerin üçüne (elektrik, manyetik ve kütleçekim) gündelik yaşamımızdan aşınayız. Diğer iki gösterime (zayıf ve yeğin kuvvetler) tamamen yabancıyız.

19. yüzyıl biliminin en büyük başarılarından biri İskoçyalı bilimci James Clerk Maxwell'in (1831-1879)⁷ *A dynamical theory of the electric field* (Elektriksel alanın dinamik kuramı, 1864) makalesinde elektrik ve manyetik kuvvetlerin düşünülmesinin en iyi yolunun tek bir *elektromanyetik kuvvetin* iki yüzü olarak düşünülmesi olduğunu ispatlamasıdır. Maxwell'in kuramsal çalışmasını dayandırdığı sonuçlar, daha önce *alan* kavramını bir kuvvetin etki ettiği bölge anlamında fiziğe armağan etmiş, deneysel açıdan bir dâhi olan ama matematiksel açıdan derdini anlatamayan Michael Faraday'e (1791-1867) aitti. Geniş anlamıyla ifade edersek, elektriksel kuvvet bütün yüklü parçacıklar arasında etkimekte, ama manyetik kuvvet yakın telgraf bobinlerindeki elektron akımları gibi hareket halindeki yüklü parçacıklar arasında etkimektedir. Daha önce ayrı olan bu iki kuvvetin birleşmesinin sağladığı en önemli meyvelerden biri Maxwell'in o ana dek akıl karıştıran ışığın yapısını aydınlatması ve uçuştaki alanının elektromanyetik ışıınım olduğunu ispatlamasıdır. 1888 yılında Heinrich Hertz (1857-1894) radyo dalgaları üretip saptayınca bu düşünce doğrulanmış oldu: Sonuç, modern iletişim tarihinin başlaması oldu. İkinci, entelektüel meyve Maxwell'in denklemlerinin sezgileri kuvvetli Einstein'ın dikkatli bakışlarına maruz kalmasıyla ortaya çıkan görelilik kuramıydı (9. Bölüm).

7 Tesadüfi ve ilgisiz bir bilgi, Maxwell'in babası John'un düz bir katip olarak doğmuş ama Maxwell'e Kirkcudbrightshire'da bir mülk bırakmayı başarmış olmasıdır.

20. yüzyılın başında foton kavramının (elektromanyetik bir enerji paketi) 1905 yılında Einstein tarafından geliştirilip (bkz. 5.Bölüm) 1916'da Amerikalı kimyacı G. N. Lewis tarafından adının konulmasıyla aynı ağaçtan üçüncü meyve düştü. Foton tanımlanan ilk *mesajcı parçacıktı*; mesajcı parçacıklar çıkış yapan parçacıklar ile yanıt veren parçacıklar arasında, örneğin iki elektron ya da bir elektron ile bir çekirdek arasında, bir kuvvet taşıyan parçacıklardır. Foton elektromanyetik alan için bir mesajcı parçacıktır, etkileşimli parçacıklar arasında kuvvet taşır ve ışık hızında hareket eder.

Bu aşamada fotonların iki özelliğini belirtmemiz gerek, çünkü bunlar daha sonra konuyla ilgili olacak. Bir foton kütesizdir ve elektronlardaki gibi hiç ortadan kaldırılmayan bir spine sahiptir. Spinin kuantum mekanik tanımıyla bağlantılı teknik nedenlerle bir elektrona yarım birimlik bir spin açısıl momentumu atfedilir. Benzer şekilde fotona da bir birim spin atfedilir. Yarım tamsayı spinlere (protonlar, nötronlar, keza elektronlar), bunların nasıl tanımlanacağını keşfetmiş olmanın yanında, savaş sırasındaki Manhattan Projesine bağlı olarak ilk nükleer reaktörü inşa etme projesini yönetmiş olan İtalyan fizikçi Enrico 'den (1901-1954) adını alan şekilde *fermion* denir. Tamsayı spinli parçacıklara da, bunlardan çok büyük sayıda içeren ışıkla ya da güneş ışınyla dolu bir kutu gibi sistemlerin istatistiksel özelliklerini çalışmış olan Hintli fizikçi Satyendra Nath Bose'den (1894-1974) yola çıkılarak *bozon* denmektedir. Sonuçta maddenin bütün temel parçacıklarının fermiyon, bütün mesajcı parçacıklarının bozon olduğu ortaya çıkmıştır. Bu yüzden çok derin bir tanıma göre madde, bozonlarla bağlanmış fermiyonların toplamıdır.

Aşkta burcundan yana şanssız herhangi bir talihsiz âşık aslında size fotonun kütesiz olduğunu söyleyebilir, zira yıldızların onun kütesizliğinin doğrudan bir sonucu olduğunu görebiliyoruz. Akıl yürütme zincirimiz kabaca şöyledir. Birincisi 3. Bölümün sonunda çok kısa sürelerde yaşayan parçacıkların enerjisinde büyük belirsizlikler olduğunu gördük. İkinci olarak belirli bir kütledeki bir mesajcı parçacığın varoluş sahibi olması için kütleleriyle orantılı bir enerji ödünç alması gerekir ($E = mc^2$): Ağır parçacıklar çok miktarda enerji varlığına karşılık gelir. Bir parçacık an-

cak hırsızlık enerji kontrolünde belirsizlik tarafından gizlenirse, enerji korunum polisine yakalanmadan varlık kazanabilir. Aynı mantıkla ağır bir parçacık ancak çok kısa bir süre yaşıyorsa, enerji korunum polisine yakalanmadan varlık kazanabilir (bir milyar doları bir pikosaniyede çalışırsanız paçayı sıyrabilirsiniz). Akıl yürütmemizde üçüncü zincire geçelim. Var olduğu süre sırasında mesajcı parçacık yüksek bir hızda uçar ve gidebileceği uzaklık hayatta kalabilmesüresiyle orantılıdır.⁸ Ağır bir mesajcı parçacık çok kısa ömrüyle fazla uzağa gidemez. Tersinden, mesajcının sonsuz uzaklığa gidebilmesi için sonsuza dek yaşaması gerekir ki bunu enerji korunum polisine yakalanmadan başarması ancak ilk başta bir şey çalmamışsa mümkün olur. Yani kütsüz olmak zorundadır. Buradan çıkan sonuç şudur; elektromanyetizmin sonsuz erime sahip olması için fotonun kütsüz olması zorunludur. Fotonların kütsesi olsaydı elektromanyetik ışımanın büyük mesafelere ulaşması olanaklı olmaz ve bizler yıldızları görmezdik; aşığımız da burçlardan yana şansız olmazdı. Fotonlar gerçekten ağır olsalardı, atomlar parçalarına ayrılırdı, çünkü çekirdeğin çekişi elektronları tutmaya yetmezdi.⁹

Aşına olduğumuz üçüncü kuvvet kütleçekimdir. Kütleçekim kuvveti bütün parçacıklar arasında etkimektedir ama elektromanyetik etkileşimden müthiş derecede zayıftır. Örneğin iki elektron arasındaki kütleçekimsel etkileşim, bu ikisinin elektromanyetik etkileşimden 10^{42} oranında daha zayıftır. Kütleçekim kuvveti bir miligramlık bir pireyi hareket ettirebiliyor olsaydı, elektromanyetik kuvvet bir milyon Güneşi hareket ettirirdi. Bizim elektromanyetizm altında ezilmememiz ve kütleçekimi hissedebilmemiz, evrenin eşit sayıda artı ve eksi yüklü parçacık içermesi, dolayısıyla çekme ve itmelerin kozmik ölçekte birbirini dengelemesi olgusunun bir sonucudur. Fakat kütleçekim tamamıyla toplamsaldır: Yalnızca kütleçekimsel çekim vardır, itme yoktur, dolayısıyla birbirini götürme, dengelenme yoktur. Evren-

8 Bir kuvvetin erimi mesajcı parçacığının kütsesiyle şu şekilde bağlantılır: $erim = (Planck\ sabiti) / (kütle \times ışık\ hızı)$. Bir foton bir elektron kadar ağır olsaydı, ışık kaynağından yalnızca 10^{-11} m uzaklaşabilirdi.

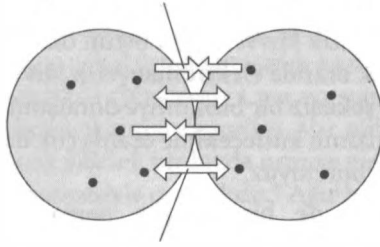
9 Kesinlik açısından bu argümanın yalnızca kuvvet taşıyıcı parçacıklar olan *sanal parçacıklara* uygulanabileceğini belirtmeliyim; kütleyle sahip gerçek parçacıklar devasa mesafelere ulaşabilir ve bilgi taşıyabilirler.

deki parçacıkların hepsi birbiriyle zayıf şekilde etkileşime girer ve onların toplam çekmesinin etkimesini deneyimleriz. Yerel olarak elektromanyetik kuvvetler en üstün olanıdır: Sahip olduğumuz şekli büyük oranda elektromanyetik kuvvetler belirler ve çekilerek yerdeki şekilsiz bir birikintiye dönüşmüyor oluşumuzu da elektromanyetizmin kütleçekime oranla çok üstün bir etkinliğe sahip olmasına borçluyuz.

Kütleçekim için de bir mesajcı parçacığın var olduğu düşünüldü. Maddeyle çok zayıf etkileştiği için saptanmadı ama en azından adı konuldu: *graviton*. Graviton kütesiz bir bozondur, foton gibi, ama iki kat hızlı spine sahiptir. Kütleçekimin neredeyse sonsuz uzayı çekebilmesi gravitonun kütesiz olduğunun bir işaretidir. Herhangi bir akıllı denizci size gravitonun spininin 2 olduğunu söyleyebilmelidir, çünkü bu iki kat spin hızını okyanuslarımızda gelgitin günde iki kez yaşanması olgusuna bağlayan mantıklı bir argüman zinciri vardır.

Sıradaki, aşına olmadığımız iki kuvvete geldik şimdi: *yeğın kuvvet* ve *zayıf kuvvet*. Aşına olunmasa da, düşünmeyi seven bir insan yeğın kuvvetin varlığını çıkarsayabilir. Akıl yürütme zinciri şöyledir. Bir çekirdek çok küçük bir hacimle bir araya gelmiş proton ve nötronlardan oluşur. Protonlar arasındaki elektromanyetik kuvvet iticidir (aynı yüke sahip oldukları ve aynı yükler birbirini ittiği için), dolayısıyla çekirdek güçlü bir patlama eğilimine sahiptir. (Bazıları, örneğin radyum gibi radyoaktif elementlerin çekirdekleri tam da bu nedenle patlar zaten.) Protonları çekirdeğin içerisinde tutan nedir? Dahası yüksüz nötronlar niçin dışarı düşmemektedir? Onları içeride tutan nedir? Nötronlar herhangi bir elektriksel kuvvetten etkilenmezler, dolayısıyla onları çeken başka bir şey olmak zorundadır. Uzun lafın kisası çekirdeklerin çoğu patlamadığı için ve yine çekirdeklerin çoğu nötronlarını tuttuğu için, elektromanyetik kuvvetten daha güçlü olan ve protonlar arasında, nötronlar arasında ve protonlar ile nötronlar arasında etkiyen bir kuvvet var olmak zorundadır. Üstelik evrendeki tüm madde giderek tek bir dev çekirdeğin içine kapanmadığına göre bu yeğın çekici kuvvet çok kısa bir erime sahip olmak zorundadır; erimi bir çekirdeğin çapından daha büyük olamaz.

100 000 000 000 000 000 000 000 N



100 000 000 000 000 000 000 000 N

Şekil 6.9 Elektronlar (gri arka plan) ve çekirdeklerden (siyah noktalar) oluşan elektriksel olarak yüksüz iki cisim arasındaki olağanüstü hassas dengenin bir gösterimi. Bu tür (birbiriyle sıkıca kucaklaşan insan vücutlarını temsilen) iki su küresi arasındaki itici kuvvet trilyonlarca newtondur (N kuvvet birimidir; bir newton yaklaşık olarak bir ağaçtaki 100 gramlık bir elmanın deneyimlediği kütleçekim kuvvetidir). Çekirdekler arasındaki itici kuvvet de aynıdır. Fakat bir cisimdeki elektronlarla diğer cisimdeki çekirdekler arasındaki çekim de trilyonlarca newtondur ve mutlu bir tesadüf eseri itmeler ve çekmeler birbirini götürür. Bu bizim aramızda net çekme ya da itme olmadığı anlamına gelir.

Burada dikkat edilmesi gereken bir noktayı eklemeliyim. Nötronlar ve protonlar *kuark*’lardan oluşan bileşik parçacıklardır (aşağıya bakınız).¹⁰ Aslında değerlendirmeye almamız gereken nükleonlar arasındaki net etkileşim (bazı bileşenler arasındaki çekmeler ile diğer bileşenler arasındaki itmelerin genel sonucu) değil, tekil bileşenleri arasında gerçekleşen daha ayrıntılı etkileşimdir. İkisi arasında çok önemli bir fark olabilir. Örneğin sizinle benim aramda, sıkı sıkıya kucaklaşsak da etkiyecek net elektromanyetik kuvvet aslında, atomlarımızın çekirdekleri birbirini kuvvetli şekilde itmesine, keza elektronlarımız da birbirini kuvvetle itmesine rağmen sıfırdır: Bu yeğın itmeler, sizin ve benim elektronlarımız ve çekirdeklerimiz arasındaki yeğın çekmeler

¹⁰ Yaptığı keşfe bu adı (1963 yılında) koyan Murray Gell-Man kelimesinin bağlamındaki kullanılışını muhtemelen görmediği için olsa gerek bunu “kwork” diye telaffuz ederdi (“Muster Mark için üç kuark”, *Finnegans Wake*’ten). Benim edindiğim izlenime göre çoğu insan artık sözcüğü Mark’la uyaklı şekilde kullanıyor.

tarafından etkisiz hale getirilir (Şekil 6.9).¹¹ Dolayısıyla eğer kendimizi iki bileşik parçacık olarak düşünürsek, sıfır net elektromanyetik etkileşime sahip olmamız gerçeği, bileşenlerimizin çok güçlü, uzun erimli bir etkileşime sahip oldukları gerçeğini örter. Benzer biçimde bileşik parçacıklar olan nükleonlar arasındaki net etkileşim, onların bileşeni kuarklar arasında etkimekte olan kuvvetten çok farklı olabilir. Gerçekte de durum budur. Nükleonlar arasındaki *artık* kuvvet çok kısa, bir çekirdeğin çapı kadar bir erime sahiptir. Fakat tekil kuarklar arasındaki kuvvet, gerçek yeğin kuvvet sonsuz bir erime sahiptir ve onun mesajcı parçacıkları *gluon* adı verilen kütesiz bozonlardır. Aşına olduğumuz kuvvetlerden farklı olarak gerçek yeğin kuvvet, kuarkların ayrılığı arttıkça kuvvetlenir. Gluonları ve bu karman çorman dünyanın “yeğin yüklerini” sonra daha yakından inceleyeceğiz.

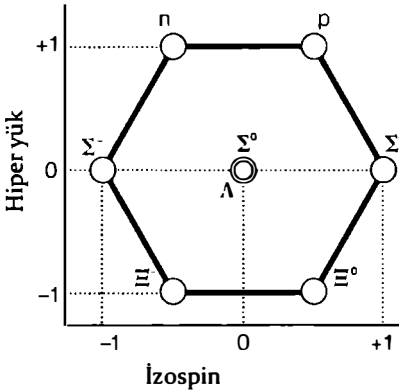
Zayıf kuvvetin ya da onun özelliklerinin varlığını kendi kendinize çıkarsamanızı sizden beklemeyelim. Zayıf kuvvetin radyoaktif bozunumun belirli bazı türlerini açıkladığı iddia edilir. Kuarklar cinsinden düşünmek en iyisi olacaksa da, kuvvetin net etkisi bir nötrona yavaşça asılıp kopartılması yoluyla bir elektronu söken ve geride bir proton bırakan bir etki olarak kafada canlandırılabilir. Elektron çekirdekten dışarı atılır ve β -ışınımı (beta ışınımı) olarak bilinen radyoaktivite formuna yol açar. Zayıf kuvvet çok kısa bir erime sahiptir, bir çekirdeğin çapından bile azdır. Aracılığını *W* ve *Z* vektör bozonları denen parçacıklar yapar ve bunların kütleleri sırasıyla protonun kütesinin yaklaşık seksen ve doksan katıdır.

Genel olarak mesajcı parçacıklara *ayar parçacıkları* adı verilir. Bu garip ismin nereden geldiğini birazdan aktaracağız. Şimdilik şunu söylemek yeterli olur: Foton, graviton, vektör bozonları ve gluonlar da ayar parçacıklarıdır ve bu temel kuvvetlerin aynı kökenden geldiğine ilişkin ilk ipucudur diyebiliriz. Aslında Maxwell’le başlayan kuvvetlerin birleştirilmesi süreci elektromanyetik ve zayıf etkileşimlerin *elektrozayıf etkileşim* adlı tek bir

11 Bu tip bir kucaklaşmada elektronlarımız arasındaki itme kaba bir tahminle yaklaşık 4×10^{27} newtondur; bu kuvvet Güneş’in yörüngesindeki Dünya’ya uygulanmış olsa onu on saniyeden kısa bir süre hareketsiz bırakmaya yetecek büyüklüktedir. Gerçek kucaklaşmalar zarifçe dengelenen işlerdir.

kuvvette birleştirilmesine dek ilerledi. Bu birleşme simetrisinin bir özelliğidir ve parçacık hayvanat bahçesini biraz daha yakından inceledikten sonra buna tekrar döneceğiz.

Hayvanat bahçesi iki büyük park şeklinde bölünmüştür. Parkların birinde “hadronlar”, diğerinde “leptonlar” gezinir. *Hadronlar* yeğin kuvvet yoluyla etkileşen parçacıklardır. Hadron parkında sadece kuarkları düşüneceğiz, çünkü burada gezinen garip yaratıkların hepsi (protonlar, nötronlar ve bir alay gariplik) özel bir simetri çeşidine dayalı kuralların kullanılmasıyla bu kuraklardan yapılmıştır. Bu bağlamda ünlü “sekiz katlı yol”u duymuş olabilirsiniz (Şekil 6.10). Sekiz katlı yol, simetri işlemlerinin özel bir grubu kullanılarak sınıflandırılan hadronların bir çeşit periyodik tablosudur. Proton ve nötron aynı ailedendirler, dolayısıyla onların izospin akrabalığını bir Döbereiner üçlüsünün (bu durumda bir ikili) parçacıklardaki benzetmesi olarak, genel sınıflandırmanın örüntüsünün bir parçası olarak



Şekil 6.10 Sekiz katlı yol, temel parçacıkların kimyasal elementlerdeki periyodik tabloya benzer şekilde sınıflandırılıp düzenlenmesinin bir yoludur. Burada sekiz parçacıktan oluşan (yalnızca proton, p ve nötron, n sizlere aşinadır, ama bunların garip kardeşleri de var) bir grafik görüyoruz, bir eksen izospindir (metinde aktarılabilecek), hiper yük adı verilen diğer eksense iç simetrisinin bir başka versiyonudur. Bu yolla sekiz parçacığın akraba olduğu gösterilmektedir. Daha ayrıntılı şemalarda diğer parçacıklar da yer alır.

düşünebiliriz. *Leptonlar* da parçacıkların geri kalanlarıdır: Yeğin kuvvet yoluyla etkileşmeyen parçacıklardır.

İlginç bir biçimde ve bir açıklama gerektiriyormuş hissi yaratacak tarzda üç hadron ailesi ve bunlarla akraba üç lepton ailesi vardır (Şekil 6.11). Gerçek hayattaki tipik ailelerden farklı olarak üç parçacık ailesinin her biri, iki *nesil*'den gelen iki parçacık grubundan oluşmaktadır.

Önce leptonlara bakalım. Bir ailede elektron ve elektron nötrino var, diğerinde müon ve müon nötrino var ve son olarak üçüncü ailede de tau parçacığı ve onun nötrinosu var. Nötrinoların kütlesi çok küçüktür (elektrondan çok daha azdır), hatta sıfır kütleli bile olabilir; kimse kesin bilmiyor. Nötrinoların yükü yok, çok az kütlesi var, spini de yarım birim. Üç türün ayırt edilebilmesi için başka bir özellik daha olması gerek; bu özelliğe de *çeşni* deniyor. Nötrinolar neredeyse kütesiz spinli çeşniler. Bir müonsa epey ağır bir elektrona benziyor, spini ve yükü elektrona aynı, ama yaklaşık 204 kat daha ağır, durum bir bowling topuyla pinpon topuna benziyor. Bir tau çok daha ağır, ağırlığı 3500 elektron kadar var, burada da durum büyük bir köpekle pinpon topunu andırıyor.

Bir de bu parçacıkların *karşı-parçacıkları* var. Karşı-parçacık (Karşı-madde parçacığı) kulağa çok egzotik geldiği için bilimkurgu yazarlarının özel ilgisine mazhar olmuş bir sözcük. Oysa egzotik değil: Sadece nadir bulunuyor. Bir karşı-parçacık karşılık

	Birinci Aile		İkinci Aile		Üçüncü Aile	
	Parçacık	Kütle	Parçacık	Kütle	Parçacık	Kütle
Leptonlar	Elektron	0.000 54	Müon	0.11	Tau	1.9
	Elektron nötrino	$< 10^{-6}$	Müon nötrino	< 0.0003	Tau nötrino	< 0.033
Hadronlar	Yukarı	0.0047	Tılsım	1.6	Üst	189
	Aşağı	0.0074	Acayip	0.16	Alt	5.2

Şekil 6.11 Her durumda ikiyeş lepton ve hadron (kuark) nesli gösteren üç temel parçacık ailesinin tablosu.

geldiği parçacığın bütün özelliklerine sahip, ama yükü zıt işaretli. Örneğin bir elektronun karşı-parçacığı olan artı yüklü *pozitron* elektronla aynı kütleye ve spine sahip. İleride düşünmemiz gerekecek bir soru da şu olacak: Etrafta neden bu kadar az karşı-madde var, evren madde ve karşı-madde açısından niçin asimetrik?

Çizimde gördüğümüz gibi (Şekil 6.11) hadronları oluşturan altı kuark da her biri iki nesillik üç aileye bölünüyor. Leptonlarda aileleri kütlelerinden ayırt edebiliyoruz. Elektron ve onun nötrinოსunun kuark karşılıkları *yukarı kuark* ve *aşağı kuark* sırasıyla 8,7 ve 13,7 elektron ağırlığındalar. Müon ve onun nötrinოსunun kuark karşılıkları *tılsım kuark* ve *acayip kuark* sırasıyla 3000 ve 300 elektron kütlesi ağırlığındadır. Tau ve onun nötrinოსunun karşılıkları *üst kuark* (1995 yılında en son keşfedilendir) ve *alt kuark*, sırasıyla fil gibi ağırlıklarıyla 350 bin ve 10 bin elektron kütlesi çekmektedir. Bu farklı kuark çeşitlerinin (yukarı, aşağı, acayip vs) çeşitli nötrinolar gibi farklı çeşnilere sahip olduğu söylenmektedir. Bizim aşına olduğumuz maddenin çoğu (daha net ifade edersek çekirdeklerdeki protonlar ve nötronlar ve çevreleyen atom elektronları), leptonların ve kuarkların birinci ailesinden (elektron, nötrinოსu, yukarı ve aşağı kuarklar) oluşmaktadır ve diğer aileler yalnızca daha egzotik madde biçimlerine katkı yapmaktadır. Aslına bakılırsa ikinci ve üçüncü ailelerin varlığı biraz gereksiz gibi gözükmektedir; ama bunun bir nedeni olduğuna da kuşku yok, zira her şeyin var olmasının bir nedeni vardır. Neden simetride mi gizli? Cevabın simetri kavramının uygun şekilde esnetilmesiyle muhtemelen evet olduğunu göreceğiz.

Kuarkların hiçbirisi şimdiye dek tekil olarak saptanmamıştır. Bu beni bölümün sonuna doğru gerçekleşecek bir bilimsel paradigma kaymasına zihninizi alıştırma amacıyla bir yorum yapmaya sürüklüyor. Yunanlar genelde deneyden çekindikleri ya da deneyi keşfetmemiş oldukları için bilim insanları olarak başarısızdılar: Onların yaptığı kontrollü deneyi ve bunun paylaşılmasını hiç içermeyen salt kuramdı. Kuarkların doğrudan saptanmamış olsalar da, an itibarıyla başarılı bir kuram gerektirdiği için var olduklarına inanılıyor olması ve varlıklarının çok fazla *ikincil* deneysel destekle destekleniyor oluşu belki de Yunanlara doğru tehlikeli bir geri adım anlamına geliyor ve bunun pozitivistleri

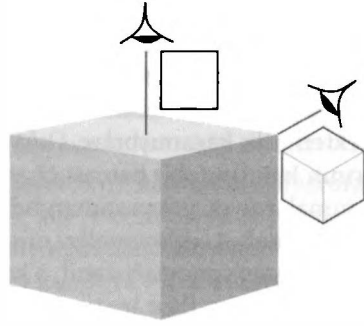
üzdüğüne de hiç kuşku yok. Burada kuram akıllı davranarak hiç yıkıcı davranmıyor ve ayrık kuarkların *bulunamayacağını* bile öngörüyor, zira daha önce bahsettiğimiz gibi kuarklar arasındaki yeğin kuvvet uzaklıkla beraber arttığı için birbirleriyle birleşmekten asla kaçamıyorlar. Dolayısıyla *bulunamayışları* varoluşlarının kanıtının bir parçası oluyor! O halde kuarkların varlığına inanmalı mıyız, yoksa zamanında atomların hesaplama simgeleleri olarak kabul edilmemeleri misali ret mi etmeliyiz? Varoluşlarının deneysel sonuçları dahil, o kadar çok şeyi açıklıyorlar ki belki de inanmalıyız. Eğer bu tür bir inançla, bu tür bir gerçeklikle bir sorununuz yoksa, bundan sonra söylenecek olanları kabul etmeniz de muhtemeldir.

Madde konusunda her şey bundan ibaret: Spinleri dışında ve özellikle yeğin kuvvet olmak üzere çeşitli kuvvetlere katılmada farklı becerilere sahip olmaları haricinde benzer özellikleri olan üç fermiyon ailesi. Bildiğimiz her şey bu bileşenlerin ayar bozonunun üç türü aracılığıyla aynen birbirine bağlanmasından oluşuyor. Dünya kök itibarıyla son derece basit aslında.

Fakat bizim betimlemelerimiz yeterince basit değil. Gerçek basitliğin peşindeyse, çok az olmasına karşın (birinci aileye odaklanırsak dört fermiyon ve birkaç ayar bozonu) parçacıkların sayısı yine de devasa bir büyüklüktedir. Daha önce zayıf etkileşimin W ve Z bozonları ile elektromanyetik etkileşimin fotonlarının, elektrozayıf etkileşimin mesajcı parçacıklarının farklı yüzleri olduğunu belirtmiştik. Acaba bütün fermiyonların, benzer şekilde bütün bozonların da tek bir varlığın farklı yüzleri olması mümkün mü? Onları bir arada tutan fermiyon ve bozonlar köken olarak *tek* bir varlığın farklı yüzleri olabilir mi? İşte bu mutlak basitliğe yakın, kayda değer bir durum olurdu.

Durum da böyle gibi gözüküyor. Fakat bunun ne anlama geldiğini anlamamız için bu bölümün konusu olan simetriye dönmemiz ve simetrinin çok yaklaşmış gibi göründüğümüz derin kavrayış için nasıl bir çerçeve sunduğunu görmemiz gerekiyor. Simetrinin görünüşte bağlantısız şeyleri nasıl bağlantılandırabildiğini kafanızda daha somut canlandırabilmek için bir küp

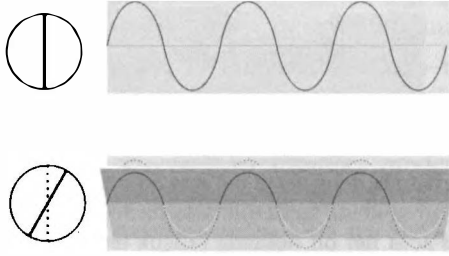
Şekil 6.12 Bölümün geri kalanında bu benzetme aklınızda bulunsun: Görünüşte bağlantısız iki boyutlu iki şekil (bir kare ve altıgen) daha yüksek bir boyutta tek bir cismin, bir kübün farklı görünüşleri olarak düşünülebilir.



hayal edebilirsiniz. Yukarıdan bakıldığında bir karedir. Bir köşenin üzerinden (tek göz kapalı) bakıldığında altıgen gibi gözükür (Şekil 6.12). Bir kübün dönmesi bir kareyi bir altıgene çevirir. Elbette bu iki boyutlu bir izleyiciye özgü bir dönüşümdür ama üçüncü boyuta erişimi olan bizler için de basitliğin ta kendisidir. Görünüşte bağlantısız olan şeyleri bağlantılandıran simetri işlemlerinden bahsederken bu görüntüyü aklımızda tutarsak yardımcı dokunacaktır.

Doğa *ayar simetrisi* denen dikkat çekici bir özelliğe sahiptir. Bu ciddi isim parçacık fiziğinin gelişim tarihinde epey eskidir, kabul edilişi parçacık fizikçilerinin '60'lı yılların sarsıntılı, deli dolu zamanlarında acayip, tılsım gibi isimleri takmalarının öncesine, sonrasında da ayık gezmeye başlayıp saçlarını kestirdikleri, havallılığın geçmişte kaldığı, kullandıkları dilin pırıltısının söndüğü ve yeniden "aracı vektör bozonu" gibi isimlere dönüş yaptıkları dönemlerin de çok daha öncesine dayanır. Ayar simetrisi dikkat edilmesi gereken soyut, iç simetrilere birisidir. Fakat mantıklı biçimde yorumlandığında da çok önemlidir, çünkü kuvvetin kökenini açığa çıkartan bir simetridir.

Ayar simetrisini anlamak için bir elektron için verilen Schrödinger denklemine ve çözümüne, dalga fonksiyonuna dönmemiz gerekir. Dalga fonksiyonu herhangi bir fark edilir fiziksel sonucu olmadan ayarlanabilen *faz* dediğimiz bir özelliğe sahiptir. Bu simetri daha önce vurguladığımız noktadan doğar: Herhangi bir noktada bir dalga fonksiyonunun değerinin yalnızca karesinin fiziksel önemi vardır, dolayısıyla karesinin aynı kalması şartıyla dalga fonksiyonunun kendisi üzerinde değişiklik yapabiliriz.

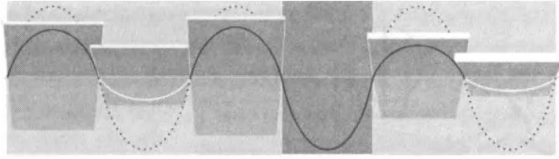
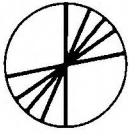


Şekil 6.13 Ayar dönüşümlerinin gösterimi. Üstteki çizim serbest bir parçacığın dalga fonksiyonunu gösteriyor. Altteki çizim fazı her yerde aynı miktarda değişime uğratıldığında dalga fonksiyonunun nasıl değiştiğini gösteriyor. Faz değişikliğine işaret etmek için dalgayı yayılım yönü etrafında bükülür şekilde gösterme adetine biz de uyduk. Bu değişimle dalga fonksiyonunun genliği değişmez, dolayısıyla dalga fonksiyonu parçacığın konumu hakkında aynı bilgiyi iletir. Bu yüzden ayar dönüşümü sistemin bir simetrisidir.

Serbest bir parçacığın dalga fonksiyonunun faz değişikliğini dalga'nın gidiş yönü etrafında bir dönmeyle göstermek uygun olacaktır (Şekil 6.13).¹² Fazın bu şekilde ayarlanması *ayar dönüşümünün* bir örneğidir. Bu bahsettiğim iç simetri işlemlerinden biridir, zira ben fazı ayarlamayla uğraşırken gözlerinizi kapattıysanız (dalga fonksiyonunun kendisine değil, dalga fonksiyonunun karesine bağlı olan) fiziksel ölçümlerden bir şey yapıp yapmadığımı bilemezsiniz. Dalga fonksiyonunun fazını her yerde sabit bir miktar kadar değiştirirsek Schrödinger denklemi değişmeden kalır, çünkü kaydırılmış fazlı bütün dalgalar da çözümlere dahildir. Başka bir ifadeyle, sabit miktarda ayar dönüşümü Schrödinger denkleminin bir simetrisidir. Bu simetri işlemleri grubuna (fazı 0 ila 360° arasında herhangi bir şeyle değiştirme) $U(1)$ denir; buradaki 1 yalnızca bir özelliğin değiştiğini gösterir.¹³ “ $U(1)$ simet-

12 Genel olarak fazın değiştirilmesi dalga fonksiyonunun $e^{i\phi}$ ile çarpılması anlamına gelir. Aslında gidiş yönü etrafında sarmallar şeklinde karmaşık dalga fonksiyonları çizmem ve faz kaymasını da sarmalları biraz ilerleterek göstermem gerekirdi.

13 Daha önce belirttiğimiz üzere U “üniter” sözcüğüne işaret etmektedir. Grubun bu matematiksel özelliği, simetri işlemleri gerçekleştirildiğinde parçacıkların yaratılmadığı ve yok edilmediği şeklindeki fiziksel gereklilikten doğmaktadır.



Şekil 6.14 Bu çizimde daha genel bir ayar dönüşümünü aktarmaya çalıştık; faz her bir noktada farklı miktarlarda değiştiriliyor, böylece dikeyde kıvrılma açısı her bir noktada (küçük resimde gösterildiği üzere) farklı gerçekleşiyor. Her yarı dalga uzunluğunun aynı miktarda kıvrıldığını varsayarak sunumda bir basitleştirmeye gittik: Pratikte değişim süreklidir. Bu tür bir ayar dönüşümünde değişmezlikse bir kuvvetin varlığına işaret eder.

ri grubu” terimi, bir parametreyi, bir dalganın fazını kimsenin ruhu duymadan herhangi bir miktarda ayarlayabilme becerimizi belirtmenin süslü bir yoludur.

Genel olarak ayar dönüşümü uzaydaki her bir noktada farklı bir değer alabilir; başka bir deyişle bir dalga fonksiyonunun fazını her bir noktada farklı miktarda ayarlayabiliriz (Şekil 6.14). Bunu yaptığımızı ama yine de Schrödinger denkleminin değişmeden kalmasını istediğimizi düşünelim; yani denklemin $U(1)$ grubunun bütün işlemlerinde, uzaydaki her bir noktada farklı faz kaymalarına izin verecek şekilde *ayar değişmez* olmasını istiyoruz. İşte bu noktada inanılmaz bir şey oluyor. *Ayar değişmezliğini bu genel anlamda sağlamak için denkleme başka bir terim eklememiz gerekiyor. Bu terim elektron üzerinde etkiyen bir elektromanyetik kuvvetin etkisine eşdeğerdir.* Diğer bir deyişle ayar değişmezliği gereksinimi, bir elektromanyetik kuvvetin varlığına işaret eder. Simetri gereksinimlerinin bir kuvvetin varlığını gerektirmesi de bu anlamdadır. Simetri güdüler.

Fazla oynayan $U(1)$ dediğimiz simetri işlemleri grubunda Schrödinger denkleminin ayar değişmezliğinin bir elektromanyetik kuvvetin varlığına işaret ettiğini gördük. Burada akla gelebilecek soru diğer kuvvetlerin de ayar değişmezliğinin sonucu olup olmadıklarıdır. Yani parçacıkların dalga fonksiyonuyla oynamanın, denklemleri değişmeden kalacak şekilde diğer kuvvet türleri olarak yorumlayabileceğimiz ek terimlerin varlığını gerektiren ye-

terince karmaşık bir biçimi var mıdır? Zira bu girişimin başarısı bütün kuvvetlerin ortak bir kökene sahip olduğunu gösterir.

Steven Weinberg (d. 1933), Abdus Salam (1926–1996) ve Sheldon Glashow (d. 1932) 1973 yılında elektromanyetik ve zayıf kuvvetleri bu şekilde birleştirmeyi başardılar ve çalışmaları bugün kabul edilen birleşik kuvvetlerin *standart modelinin* formüle edilmesine yol açtı. Tanımladıkları simetri işlemleri grubu elektromanyetik kuvvet sonucunu veren $U(1)$ ile $SU(2)$ denen daha karmaşık başka bir dönüşüm kümesinin birleşimidir. Toplam simetri grubunun $U(1)$ ile $SU(2)$ 'nin bir kombinasyonu ve $U(1) \times SU(2)$ şeklinde yazılabilir olması bize iki kuvvet türünün ortak bir kökene sahip olduğunu söyler. Elektrozayıf etkileşimin iki yüzüdürler. Küp benzetmesini hatırlayın: Elektrozayıf kuvvet küp gibidir, elektromanyetik kuvvet de kübü bir yönden baktığında kare şeklinde görmek gibidir, zayıf kuvvetse kübün farklı bir yönelmeye çevrildiğinde altıgen olarak görülmesi gibidir.

Elektrozayıf kuvvet kuantize edildiğinde [nicemlendiğinde] kuramın $U(1)$ kısmı fotonlara yol açar. $SU(2)$ kısmı kuramda “aracı vektör bozonları” denen, iki (her yükten bir adet) ve elektriksel olarak yüksüz bir *Z parçacığı* olmak üzere üç parçacığa neden olur. Dört parçacığın hepsinin de spini 1’dir ve hepsi de ayar bozonudur. Fotonun kesin keşfi 1905 yılında Einstein açıklarken gerçekleşmiştir (7. Bölüm); W ve Z parçacıklarının varlığı ise 1983’te CERN’deki hızlandırıcı deneylerinde tespit edilmiştir.

Bahsettiğimiz ayar simetrileri tamamlanmış olamazlar, çünkü W ve Z parçacıkları kütleye sahipken (hem de bayağı büyük kütleye, sırasıyla protonun seksen ve doksan katı ağırlığındadırlar) foton kütsesizdir. Nükleonun izospin simetrisi ve periyodik tablonun gizli simetrisi durumlarında karşılaştığımız gibi kütle farkı altta yatan parçacıkların simetrisini kıran bir etkileşimden doğmuş olmalıdır. Bu simetri kırınımı, proton ile nötron kütleleri arasındaki fark nasıl elektromanyetik alanla farklı etkileşimlerine atfediliyorsa, benzer biçimde W ve Z parçacıklarının da *Higgs alanı* adı verilen bir başka alanla etkileşimine yorulmaktadır. Kütle edinilmesine atfedilen bu Higgs mekanizması adını kuramı ortaya atan Peter Higgs’ten (d. 1929) almaktadır; benzer bir mekanizma 1964 yılında Brüksel Üniversitesinde birbirlerin-

den bağımsız olarak Robert Brout ve François Englert tarafından da ileri sürülmüştür. Alanlar elbette nicemlenmiştir, dolayısıyla elektromanyetik alanla etkileşim aslında nicemlenmiş alanların parçacıklarıyla, fotonlarla etkileşim anlamına gelir. Fotonları proton üzerinde nötron üzerinde olduğundan daha güçlü şekilde yoğunlaşmış olarak düşünebiliriz, böylece enerjisini, dolayısıyla kütesini düşürmektedir. Higgs alanına dalmış parçacıklar da da hemen hemen aynısı olur, bu nedenle *Higgs parçacıkları* adı verilen Higgs alanındaki kuantayı¹⁴ elektrozayıf etkileşimin vasıtaları üzerinde farklı derecelerde yoğunlaşmış olarak düşünebiliriz. Bunun sonucunda W ve Z parçacıkları kütle edinirken, foton kütle edinmez.

Simetri kırınımının ve kütle edinmenin bu açıklanışının geçerliliği Higgs parçacığının varlığına bağlıdır. Şu ana dek Higgs parçacığını gören olmadı.¹⁵ Bunun olası iki açıklaması var. Biri Higgs parçacığının olmadığıdır. Elektromanyetik ve zayıf etkileşimlerin varlığını ve birleşmesini gösteren simetri argümanları çok çekici olduğu için bu açıklamayı parçacık fizikçilerinin kabullenmesi çok zor olacaktır. Bu sav doğruysa, o halde ayar bozonlarının bazılarına kütle bahşeden bir simetri kırınım mekanizmasının var olması gerekir. Dolayısıyla Higgs mekanizması gibi bir şey gerçekten etkin olabilmeli, aksi halde bütün yaklaşım çöker. Belki de çökmelidir. Alternatif olarak Higgs parçacıklarının şu ana dek hiçbir hızlandırıcının onları var etmeye yetecek kadar enerjiye erişemediği büyüklükte bir kütleyle sahip olması düşünülebilir. Parçacık fiziği dünyası şu anda biri CERN, diğeri Chicago'nun batısındaki Fermilab'ta olmak üzere iki hızlandırıcıyı Higgs parçacığını daha dinamik bir biçimde aramaya yetecek enerjilere yükseltmeye uğraşıyor. Ya belli bir aşamada bulunacak ya da parçacık fizikçileri en sevdikleri modellerinden birini gözden geçirmek zorunda kalacaklar. Bu araştırmanın önemini

14 Sözlük anlamıyla paket, öbek anlamına gelen kuantum sözcüğünün çoğulu kuantadır –çn.

15 4 Temmuz 2012'de CERN, "Higgs bozonu ile tutarlı" bir parçacığın resmi keşfini açıklamaya yeterli olan "5 sigma" seviyesindeki sinyali doğruladı. 14 Mart 2013'te bir grup bilim insanı Higgs Bozonu'nun varlığından emin olduklarını açıkladı. 8 Ekim 2013 tarihinde Nobel Fizik Ödülünü Peter Higgs ve François Englert'in kazandığı açıklandı –çn.

anladığınızı umarım, zira madde hakkında şu anki kavrayışımız buna bağlı.

Yeğîn kuvvetin de ayar simetrisinin dışavurumu olduğu ortaya çıkmıştır. Bu örnekte kuarkların çeşnilerin yanı sıra gluon takası yaparak birbirleriyle etkileşime girmelerine olanak sağlayan özel bir yük çeşidine de sahip olduğunu görüyoruz. Her kuark bu üç “yeğîn yük”ten birine sahip olabilir ve fizikçiler bu yüklere *renk* adını verme şeklinde memnuniyet verici bir uzlaşya gitmişlerdir. Bu rengin gerçek renklerle en ufak bir ilgisi yoktur: Yeğîn yükün adlandırılması için kullanılan şık bir isimdir sadece. Bir kuarkın renk yükü kırmızı, yeşil ya da mavi olabilir. Kuarkların bilinen bütün kombinasyonları (proton ve nötronu oluşturan üçlüler ve gluonları oluşturan kuark-karşı-kuark kombinasyonları) “beyaz”dır: Bunlar, gerçek beyaz rengi nasıl gerçek kırmızı, yeşil ve mavinin karışımıysa aynı onun gibi¹⁶ beyazlıkla sonuçlanan renk yükü karışımlarıdır, herhangi bir kalıntı renk yükü göstermezler.

Şimdi ayar simetrisinin yeni bir çeşidine geldik. Kuarkların renklerini renk tonunu oynatarak sistematik şekilde değiştirirsek, bir dalga fonksiyonunun fazını değiştirmenin eşdeğerini elde ederiz. Bu durumda tek bir faz yerine üç değer, renkler işin içine girer. Elektromanyetik etkileşimin basit grubu $U(1)$ ve biraz daha karmaşık zayıf etkileşimin biraz daha karmaşık grubu $SU(2)$ ’nin yerine, bu kez çok daha ayrıntılı bir simetri işlem grubu olan $SU(3)$ ’ü düşünmemiz gerekir. Fakat tıpkı diğer kuvvetlerde gördüğümüz gibi, bu daha karmaşık ayar dönüşümü altında denklemlerin aynı kalması için denkleme bir kuvveti temsil eden bir terim eklememiz gerekiyor. Bu ek terim, yeğîn kuvvetle tamamen aynı özelliklere sahip. Dahası bu etkileşimi nicemlediğimizde denklemlerden düşen ayar bozonları, renkli kuarklar arasında kuvvet taşımaktan sorumlu spin-1 kütlesiz parçacıklar gluonlardır! Burada doğanın bir simetrisine (bu sefer biraz daha karmaşık bir gizli simetriye) uymanın, bir kuvvet olarak tanıdığımız bir terimin varlığını nasıl zorunlu kıldığını bir kez daha görüyoruz.

¹⁶ TV ekranındaki ısıtılı renkli benekler (fosforlar) kırmızı, yeşil, mavidir: Üçü birden elektron ışınının çarpışıyla aydınlatıldığında biz beyazı algılarız.

Şimdi sisli bir entelektüel bataklığa dalıp bir tür soyut çamurda saklanmış haldeki yeğin ve elektrozayıf kuvvetlerin birleşmesini ve buna bağlı olarak da leptonlar ve hadronların tek bir hayvanat bahçesinde birleşmesini bulup çıkarmak zorundayız. Burada simetri bir kez daha rehberimiz olmaya aday gözüküyor. Gerçekten ayrıntılı ve karmaşık bir simetri işlemleri grubu acaba bize yeğin kuvvet ve elektrozayıf kuvvetlerin tek bir kuvvetin farklı yüzleri olduğunu gösterecek mi diye merak ediyoruz. Somut bir benzetme istiyorsanız, kare ve altıgen şekiller gösteren dönen bir küp yerine daha ayrıntılı bir çok yüzlü düşünün ve bu çok yüzlü bazı yönlerden kareler ve altıgenler, diğer yönlerden bakıldığında sekizgenler ve başka şekiller gösteriyor olsun: Şekillerin hepsi tek bir cismin görünümleridir.¹⁷

Birleşik kurama büyük birleşik kuram, *grand unified theory*'nin kısaltmasıyla GUT denmektedir. Şu anda insanlar daha zengin simetri grubunun ne olduğundan tam olarak emin değiller ve yapılmış birkaç farklı öneri var. Deneyler yön göstermeye ve yapılan seçimi değerlendirmeye yardımcı oluyor. Örneğin kuarklar ve leptonlar hayvanat bahçesindeki ayrı parklarından tek bir bölgeye sürüldükleri için, bir kuarkın da elektрона dönüşmesi ve bu yüzden bir protonun bozunuma uğraması olasılığı da var. $SU(3)$, $SU(2)$ ve $U(1)$ 'in, sırasıyla yeğin kuvvet, zayıf kuvvet ve elektromanyetik kuvvetin birleşimi olan $SU(5)$ adlı daha büyük ve en basit grup seçimi protonun ömrünün 10^{27} – 10^{31} yıl aralığında olmasını öngörüyor. Fakat deneyler bu ömrün en az 10^{32} yıl olduğunu gösteriyor. Bu uyuşmazlık daha zengin simetri grubunun en basit seçiminin uygun olmadığına işaret ediyor ve şu an daha incelikli simetrilerin varlığı araştırılıyor. Program başarılı olursa (ki bilimciler her zamanki iyimserlikleriyle başarılı olmamasından pek az kuşku duyuyorlar), protonun sonlu ömrü 8. bölümde de göreceğimiz gibi evrenin uzun vadeli geleceği açısından çok büyük bir öneme sahip olacak.

Fermiyon hayvanat bahçemiz leptonlar ve hadronlardan oluşuyor ve şimdi bunları tek bir parkta otlanmaya salmış durumdayız. Bir de bozon hayvanat bahçesi var, burada da fermiyonları

17 Her türlü çok yüzlü cisim dönmesi ve görünümüleri için harika bir site: <http://www.georgehart.com/virtual-polyhedra/vp.html>.

birleştirip bağlayarak protonlara ve insanlara eviren ve nihayetinde fermiyon topluluklarının görüş ifade etmesine olanak veren kuvvetlerin mesajcı parçacıkları bulunuyor. Bu kuvvetler tek bir kuvvetin görünümleridir. Acaba bir varlığı bir yüzünde bir fermiyon, diğer yüzünde bir bozon olacak şekilde eviren daha da büyük, daha incelikli bir simetri işlemleri grubu (ve daha da büyük, daha incelikli bir çok yüzlü) bir tür soyut i uzay içerisinde var olabilir mi? Bazı deneysel varsayımlara göre her bir parçacığın (elektron, mezon, nötrino, kuark, ayar bozonu, foton) tek bir varlığın farklı yüzü olduğu böyle bir *süpersimetri grubu* gerçekten var. Elbette böyle bir durumda çok fazla simetri kırınımlı olması gerekecek, çünkü parçacıklar son derece farklı ktletlere sahipler; ama periyodik tabloda da aynı problem vardı ve biz farklı kütleler edinilmesiyle nasıl başedeceğimizi, rneğin Higgs parçacıklarının farklı ölçülerde kütlesiz parçacıklara yapışmalarını sağlamak gibi yollarla vs biliyoruz. Süpersimetri fermiyonlar ile bozonların denkliğini göstermede başarılı olursa, bu durumda kuvvetler ve parçacıklar doğaları icabı ayırt edilemez olacaklar ve her şey sadece bir şey olacak. Simetri iktisat yapar, spersimetriye süper şekilde iktisat yapar.

Bu fikir araştırılırken bize işe yaradığı yönünde güçlü işaretler sağlıyor. Fakat kuram ayrıca bilinen parçacıkların eşlerinin varlığını da öngörüyor. Selektronlar, skuarklar, sntrinolar, fotinolar, Winolar, Zinolar ve gluinolar dahil bu süpersimetrik eşlerin hepsi bildiğimiz, tanıdığımız eşlerinden yarım birim spin farklılaşmaktadır. Dolayısıyla rneğin bir selektron sıfır spindir ve bir fotino yarım spindir. Problem şu ki neredeler? Olağan yanıtlar sunulabilir: Ya yokturlar (evren süpersimetrik olmadığı için) ya da hiçbir hızlandırıcının üretemeyeceği kadar ağırdırlar. Yanıtı henüz bilen yok, ama güzellikten haz duyuyorsanız büyük olasılıkla evrenin mümkün olduğu kadar güzel, dolayısıyla süpersimetrik olduğuna inanmaya eğilimlisiniz demektir. Fakat inanç bilimde bir rehber ve ölçüt değildir.

şimdi yüzleşmemiz gereken bir dizi soruyla karşı karşıyayız. Bazılarını ilerlerken siz de fark etmiş olmalısınız. Biri maddenin

karşı-maddeye neden ağır bastığıdır. Bir başkası neden üç fermi-yon ailesi olduğudur. Üçüncüsü neden bu kadar fazla temel par-
çacık olduğu. Dördüncü bir soru, kütleçekim kuvvetinin bütün
kuvvetlerin birleşmesi yolculuğumuzda tarifi neden bu kadar
zor bir kuvvet olduğudur. Bütün bu soruların yanıtları evrenin
simetrisinde mi yatıyor? Evren bizim düşündüğümüzden çok
daha mı güzel yoksa? Sonsuz güzellikte, mükemmel şekilde si-
metrik mi?

Süpersimetrik olabilir belki ama mükemmel derecede si-
metrik olmadığı kesindir, aksi halde eşit miktarda madde ve
karşı-madde olurdu. Aynı oranda olmadığına işaret eden başka
göstergeler de vardır. Bariz büyük ölçekli orantısızlıklar vardır.
Örneğin insan nüfusunun çoğu sağ elini kullanır. Kimse neden
böyle olduğunu bilmiyor: Kalbin vücudun hafif sol tarafından
olmasıyla bağlantılı olabilir,¹⁸ fakat nedeninin çözülmesi evrenin
yapısına ilişkin derin bir içgörü sağlayacağı da benzemiyor. Yapı-
mızın biraz daha derininde aminoasitler yer alıyor ve bunlar bo-
bin ve katman şeklinde dizildiklerinde yaşam süreçlerini yöneten
en önemli proteinleri oluşturuyorlar (2. Bölüm). Aminoasit mo-
lekülleri iki biçimde karşımıza çıkıyor ve bunlardan biri diğeri-
nin ayna görüntüsü. Hayatın gerçeği şu ki, en azından dünyada,
proteinlerimizde gerçekleşen aminoasitler de aynı el kullanımına
sahipler (bazı teknik ölçütlere göre sol elliler). Kimse neden böy-
le olduğunu bilmiyor. Tamamen tesadüf olabilir: Bütün yaşam
formlarının uzak bir ortak atası sol elli aminoasitler kullanıyordu
ve ondan gelen bütün canlılar aynı el kullanımını miras aldılar.
Kimileri de aminoasitlerin sol elliliğinin evrenin kozmik orantı-
sızlığına bağlı olduğunu ileri sürüyor; buna göre sol elli asitler
sağ elli ayna görüntülerinden birazcık daha fazla kararlılar ve bu

¹⁸ İnsanlarda sağ el kullanımının yeğlenmesinin (diğer hayvanlarda çok
daha az gelişkindir bu) evrimsel kökeni, annenin kalp atışının sesi-
nin yatıştırıcı etkisini aktarmak için insan annelerin bebeklerini sol
tarafalarında tutma eğiliminde yatıyor olabilir. Bu anneler boş kalan
elleriyle cisimleri kullanmada daha yetenekli olur ve seçilimsel ola-
rak yeğlenirler. Modern kültürel basınçları kalıtsal eğilimlerden ayırt
etme amacıyla ortaçağ iskeletleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır.
Rakip bir teoriye göreyse sağlaklık, beyinde evrimsel olarak yarar-
lı olan konuşmanın gelişimi için yer ayrılması ihtiyacından doğdu.
<http://www3.ncbi.nlm.nih.gov/htbin-post/Omim/dispim?139900>.

yüzden üstünlüğü ele geçirmişler. Aslında kimse neden böyle olduğunu bilmiyor, ama eğer bu el kullanımı zincirinin ucu temel bir şeye dek sürülebilseydi çok hoş olurdu. Evrende başka bir yerde var olduğunu düşündüğümüz organizmaların proteinlerinin Dünya'daki organizmalarla aynı el kullanımına sahip olup olmadığını bilseydik elbette bunun konunun karara bağlanmasına yardımı olacağına şüphe yok.¹⁹

Evrenin orantısızlığı derken neyi kastediyoruz? Mükemmel simetrik bir evrende, bir aynada gözlemlenen olaylar olayların kendisinden ayırt edilemez olacaktır. Doğrudan evrene mi yoksa onun ayna yansımaya mı baktığımızı asla bilemeyeceğiz. Bu ideal durum için kullanılan teknik terim *parite korunumu*'dur. Fakat 1957'de gerçekleştirilen bazı deneylerin sonuçlarının ayna görüntülerinden ayırt edilebildiği görüldü, dolayısıyla parite korunmuyordu. Evren yansımaya aynı değildir, uzamsal olarak eğridir.

Evrenin uzamsal olarak simetrik olmaması zamanın da simetrik olmama olasılığını akla getiriyor. Zaman-simetrik bir evrende geriye doğru akan bir evren ile ileriye doğru akan evrende doğa yasaları aynı olacaktır. Bu durumda evren, acaba sıfır zamanda başlayıp ileriye doğru mu akıyor yoksa sıfır zamanda başlayıp geriye doğru mu akıyor bilemezdik. Daha belirli ve küçük ölçekte söyleyelim; yeni parçacıklar oluşturmak üzere iki parçacık arasındaki çarpışma, yeni iki parçacığın çarpışıp ilk parçacıkları oluşturduğu ters işlemle eşdeğerdir. Bu simetri için kullanılan teknik ifade 'dir. Fakat 1964 yılında yapılan deneyler gösterdi ki parçacıkların hayvanat bahçesinin kuytu sessiz bir köşesinde²⁰ zamanın yönü önem taşıyor. Orantısızlık evrenin tarihinin ilk anlarında ortaya çıkmış olan maddedeki ve karşı-maddedeki asimetriyle yakından bağlantılı ve 8. Bölümde bu konunun devamını getireceğiz.

Dolayısıyla deneyler evrenin uzayda ve zamanda simetrik olmadığını gösteriyor. Fakat bu simetrik olmama rasgele bir asi-

19 Gezegenler arası yolculukta bir risk daha ortaya çıktı: Yabancı bir gezegende yaşam sağ elli aminoasitlerden kurulmuşsa, aç Dünyalı yolcular kendi sığır etli sandviçlerini yanlarında getirmek durumunda kalacaklar.

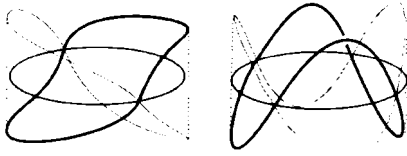
20 Yüksüz K mezonları, kaonların bozunumu.

metri değil, çünkü uzaydaki simetrik olmama zamandaki simetrik olmamaya bağlantılı. Bu bağlantıyı anlamak için *yük eşlenikliği* denen ve her parçacığın karşı-parçacığıyla değiştirildiği üçüncü bir orantısızlık türü olduğunu bilmeliyiz. Parçacıklar ile karşı-parçacıkların ilk halinden ayırt edilemeyecek şekilde yer değiştirdiği bir evren beklentisine girebiliriz. Durum böyle değildir. Zayıf etkileşim yük eşlenikliği değişmezliğine uymaz, dolayısıyla maddenin yerini karşı-maddenin aldığı bir evren bu evrenden farklı davranacaktır. (Bu fark bize felaket biçimde içine dalmadan önce bir karşı-madde bölgesini tanımlayabilme şansı tanır.)

Simerideki bu kırımını aklımızda tutarak şunun ortaya çıktığını söyleyebiliriz: Evren, (bildiğimiz kadarıyla) eğer *eşanlı olarak* parçacıkları karşı-parçacıklarla değiştirirsek (buna C diyeceğiz), evreni aynadan yansıtırsak (buna P diyoruz) ve zamanın yönünü değiştirirsek (bunu da T diye belirtiyoruz) simetriktir. Yani Wolfgang Pauli'nin önerdiği teoreme göre evren *CPT değişmez*'dir. Dolayısıyla evren tekil değişikliklere maruz kaldığında orantısızdır, ama bileşik eylem açısından düşünersek mükemmel şekilde biçimlenmiştir.

Ele alınması gereken en büyük soru adı geçen parçacıkların tümünün nihai doğasıdır. Şu anda parçacık fiziğinde, yanıtı içerebilecek ama belki de hiçbir zaman deneysel olarak doğrudan sınanamayacak olan bir kuramsal proje için büyük emek harcanmaktadır. Bu son iki bölümün başına, Yunanların maddeyi kesip ne kadar ileri gidebileceklerini düşündükleri yere geri dönersek, örtük varsayım son kertede son derece küçük, noktaya benzer varlıklara ulaşmaktı. Onlar bu noktaların atomlar olduğunu düşünüyordu, biz bu noktaların yapısız görünümlü leptonlar ve kuarklar olduğunu düşünüyoruz. Fakat durumun böyle olmadığını düşünün. Kesmenin en sonunun bir nokta değil, bir doğru olduğunu varsayın. Sorduğumuz soruların çoğuna yanıt olma ışığı taşıyan *sicim kuramının*²¹ başlangıç noktası budur. Sicim kuramı

21 Sicim kuramına daha önce bahsettiğimiz fermiyon-bozon bağlantısına sahip süpersimetrisinin bazı özelliklerini içerdiği için *süpersicim kuramı* da denmektedir.



Şekil 6.15 Bir sicimin salınmasının iki tarzi: Sıfır noktasındaki her salınım farklı bir temel parçacığa karşılık gelir.

bu bölümde karşılaştığımız simetri argümanlarının uzantısıdır, çünkü şu ana dek ele aldığımız katı geometrik dönüşümlerin yanı sıra uzayzamanın topolojisini, esnekliğini ve deliklerle delik deşik edilmiş olma olasılığını içerir.

Sicim kuramında küçük, sicime benzer çemberleri doğanın nihai yapıtaşı olarak kabul ederiz. Sicim çok küçüktür: Çemberin yarıçapı yaklaşık olarak sadece Planck uzunluğu kadardır (yaklaşık olarak 10^{-35} m, 7. Bölüm). Çok küçük ifadesindeki “çok” bu örnekte gerçekten çok anlamına gelir. Bir çekirdek Dünya büyüklüğünde büyütülmüş olsa, sicimin aynı oranda büyütülmüş haliyle daire yarıçapı bahsettiğimiz çekirdeğin boyutlarından fazla büyük olmazdı. Sicim işini müthiş yapar: Gerginliği, trilyonlarca Güneşe bedel olan 10^{39} tona denk bir ağırlığın ondan sarkmasıyla eşdeğerdir. Ciddi derecede küçük ve gergin sicimlerden bahsediyoruz.

Gergin sicimler titreşir. Sicim kuramına göre farklı her titreşim tarzı temel bir parçacığa karşılık gelir. Dolayısıyla sadece bir tür sicim vardır, ama onun farklı türdeki titreşimleri şu ana dek karşılaştığımız çeşitli parçacıkların hepsine karşılık gelmektedir (Şekil 6.15). Burada kastettiğim gitarda farklı notalara basarken olduğu gibi titreşimin sıklığını arttırmak değil: Bu çok fazla, aşırı enerji gerektirir. Bir üst notaya geçmek bile o kadar çok enerji alır ki bu bilinen bütün temel parçacıklardan aşırı derecede büyük kütleli, neredeyse küçük bir bakterininki kadar büyük kütleli bir parçacığa karşılık gelir.²² Buradaki titreşimler sicimin *sıfır noktası titreşimleri* dediğimiz titreşimlerdir. Kuantum mekaniğine göre bir salıngaç asla tamamen hareketsiz olamaz, her zaman çok küçük de olsa bir kalıntı enerjiye sahiptir ve buna sıfır noktası

²² Neredeyse Planck kütlesi kadar, yaklaşık 10^{19} proton kütlesi kadar olur.

enerjisi denir. Sicimin insan kalbi gibi sessizce atıyormuşçasına titreştiğini düşünün, her titreşimi farklı bir parçacığa karşılık gelmektedir.

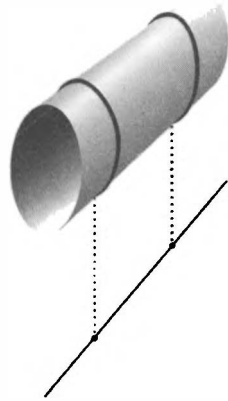
Sicim kuramı ilk ortaya atıldığında yalnızca bozonlar için geçerli olabiliyor ve şu utancı taşıyordu: Sicimlerin yirmi altı boyutlu uzayzamanda var olması gerekiyordu. Bu *embarrasse de dimensions*²³ süpersimetri uygulandığında ve kurama fermiyonlar eklendiğinde kısmen hafifledi. Süpersimetrinin işaret ettiği kısıtlamalarla sicimlerin dokuzu uzay, biri zaman olmak üzere sadece on uzayzaman boyutunda gelişebileceği bulundu. Bu boyutların düzenlenmesi için çeşitli yollar bulundu ve şu anda eğer boyutsallığın on bire çıkmasına izin verilirse sanki farklı kuramlar tek bir süperkuramda birleştirilebilirmiş gibi gözüküyor. Bu sayıyı biz de kabul edecek ve sicim kuramının on uzay boyutunda ve bir zaman boyutunda tireşen sicimler olduğunu varsayacağız. Şu an gündemde olan iki boyutlu zarları da içeren tek boyutlu sicimlerin daha karmaşık versiyonlarına sahip on bir boyutlu sicim kuramı tipine *M-kuramı* denmektedir. Bu M'nin neyin kısaltması olduğu unutuluyor sık sık, o yüzden belirtelim: M harfi zarın (*membran*) başharfi olabileceği gibi belki de "bütün kuramların anasını" (*mother of all theories*) simgeliyor olabilir.

Burada hemen akla bütün bu boyutların nerede olduğu sorusu geliyor. Bizlere hep dört boyutlu (üç uzay, bir de zaman boyutu) bir dünyada yaşadığımız öğretiligeldi, o halde bu kayıp yedi boyut nerede? Bunların iç içe sarılmış olduğu varsayılıyor. Ya da daha doğrusu evren şekillenirken açılmayı başaramadıkları düşünülüyor: Evrenin ilk genişlemesi o kadar hızlıydı ki (8. Bölümde ele alacağız) yedi uzamsal boyut işe uyanamadı ve çok geç kaldı. İnsanların "sıkıştırılmış", sarılı boyutlarla yüzleştiklerinde yaşadıkları kavramsal anaforu hafifletmek için çok sık kullanılan benzetme, çimlerdeki sulama borularının düşünülmesidir. Uzaktan sulama borusu tek boyutlu bir çizgi gibi gözükür ama yakından baktığımızda bir ene sahip olduğunu görürüz.

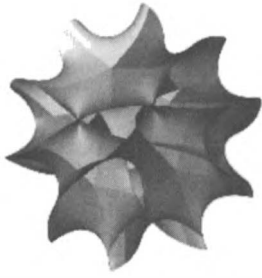
Sıkıştırılmış bir boyutu kafada canlandırmak için uzayın her bir noktasına bağlanmış (üzerindeki konumların bu boyuttaki

23 (Fr.) boyut utancı-çn.

Şekil 6.16 Üzerinde noktaya benzer iki parçacık bulunan bir boyutlu çizgi şeklinde gözüken şey aslında üzerinde iki dairesel sicim olan bir tüptür. Ek boyut sıkıştırılmıştır ve gerçekliğin derin yapısını soruşturmadıkça orada olduğunu fark etmeyiz. İki parçacık arasındaki bir çarpışma aslında iki sicim arasındaki çarpışmadır.



yerlere işaret ettiği) küçük bir çemberi düşünebiliriz (Şekil 6.16). Bu uzaydaki bir çarpışmayı kafamızda canlandırmak için artık çarpışan noktaları düşünmeyiz: Borunun etrafında kıvrılan ve birbirine ileri geri çarpıp uzaklaşan lastik bantlar şeklinde düşünürüz. Aslında her bir noktada lastik bantlar borunun etrafına sarılmış gibi sicimlerin bir şekilde etraflarında kıvrılmasıyla bu biçimde sıkıştırılmış olan yedi boyut vardır. Sıkıştırılmış boyutların her bir noktada özel bir şekil aldığı düşünülmektedir. Bu şekillere, şekiller üzerine çalışan iki matematikçi, Eugenio Calabi ve Shing-Tung Yau'dan hareketle *Calabi-Yau uzayları* denmektedir. Fizikçiler işe yaramaz görünen kavramları hayran kalınacak bir akli çabayla soyut olarak çalışarak sonradan tam da fizikteki ilerlemelerle başetmek için ihtiyaç duyulacak olan araçları farkında olmadan hazırlamış olduklarını keşfedecek olan matematikçilere her zaman minnettar kalmışlardır. Platoncu bir bakış açısıyla yaklaşırsak (bkz. 10. Bölüm) matematik hazır halde keşfedilmeyi beklemektedir, dolayısıyla Calabi ve Yau belki de o anda sandıkları gibi icat etmekten ziyade zaten önceden var olanı günışığına çıkartıyorlardı. Şekil 6.17'de böylesi bir uzay gösterilmektedir. Buna benzer şekiller (yedi boyutta) sicim kuramının sulama borularıdır, sicimler etraflarında ve deliklerin içersinden geçerek kıvrılmaktadır.



Şekil 6.17 Bir Calabi-Yau uzayı. Şekil 6.16'da gösterildiği gibi uzaydaki bir çizginin basit bir tüp olması yerine, belki de çizgi üzerindeki her bir noktanın gerçekte çok boyutlu bir uzay olması mümkündür. Bu tür bir uzayın bir kesiti burada gösterilmektedir. Buna benzer bir yapının (ama çok boyutlu olarak) uzaydaki her bir noktaya bağlanmış olduğunu düşünün.

M-kuramı büyük sorulardan birini yanıtlamanın kıyasına kadar geldi gibi gözüküyor: Neden üç parçacık ailesi var? Yanıt simetride yatıyor gibi gözüküyor. Fakat bu sefer söz konusu simetri, Calabi-Yau sulama borularının, bu uzaylardaki deliklerin, sicimlerin vidalanır şekilde dolandığı deliklerin boyutsallığıyla ilişkili simetrisidir. Bu şu ana dek bulduklarımız içerisinde en zor algılanan, en incelikli simetridir. Bir Calabi-Yau simetrisinin belirli bir biçimde ayarlanırsa yeni uzaydaki çift sayıda boyuta sahip deliklerin sayısının ilk baştaki uzayın tek sayıdaki deliklerinin sayısına eşit olduğu ortaya çıkmıştır. Ailelerin sayısı sarma örüntülerinin sayısı, dolayısıyla deliklerin sayısı tarafından belirlenir. Burada bir ipucu vardır (ve şu anda bu ancak bir ipucudur, fazlası değil) ve bu ipucu parçacık ailelerinin sayısının uzayzamanın sıkıştırılma tarzıyla yakında ilişkili olması ve üç sayısının muhtemel bir önem taşıyacak şekilde karşımıza çıkmasıdır.

Diğer büyük soru, bizim üç boyutlu uzayımızı sağlamak için neden sadece üç uzamsal boyutun açılmayı başardığıdır. Sicim kuramı buna bile bir yanıt ileri sürebiliyor; ama bu kozmoloji (evrenbilim) alanına giriyor ve 8. Bölümümüzün konusu olacak.

Sicim kuramı ve onun daha zarif ve incelikli hali M-kuramı hayret verici bir güce sahip. Fakat bu bilim olmayabilir. Bir süre önce sizi uyarmış ve bilimin kabul edilebilirlik ölçütlerinde değişiklik yapma gerekliliği duyma olasılığına dönük zihninizi hazırladığımı belirtmiştim. Bunu kuarklarla bağlantılı olarak söylemiştim: Kuarklar henüz görülmediler ve muhtemelen de

görülemeyenler, buna rağmen varlıklarına dair doğrulanabilecek o kadar çok şeye sahibiz ki var olduklarından giderek daha fazla emin oluyoruz. Bu deney yoluyla doğrulama değil, çıkarım yoluyla doğrulamadır: Bu doğrudan deneyim yoluyla doğrulama değil, duyuma dayalı doğrulamadır. Belki de çizginin aşılabildiği bir nokta karşımıza çıkacak, fakat bu bilimin çok büyük bir dikkatle aşması gereken geri dönüşü olmayan bir noktadır.

M-kuramıyla, bu bölümün esasları olan simetri argümanlarının en yücesiyle bu tehlikeli yolda bir adım daha ilerliyoruz. M-kuramı için geçerli doğrudan deneysel hiçbir motivasyon yoktur: Derin sorulara çözüm önerileri getiren muhteşem güzellikte bir fikirdir, ama tek bir sayısal öngörü gerçekleştirmemiştir. Parçacık ailelerinin sayısı gibi kapsamlı konuların hesaplanması için yollar önermektedir, ama on binlerce Calabi-Yau uzayı olduğu için, elimizde ileri görüşlü bir öngöründen ziyade hileli denebilecek bir sonradan-görüş vardır. *Doğrudan* deneysel sınama diye önerdiği şeyler, muhtemelen sonsuza dek erişemeyeceğimiz teknolojik beceriler isteyen galaktik, hatta kozmik ölçekte aletler gerektirmektedir. Önerdiği dolaylı rasyonalizasyonlar son derece ilginç ve kapsama alanı yönünden harikadır. Örneğin M-kuramı kütesiz bir spin 2 bozonun, gravitonun varlığını öngörmektedir. Dolayısıyla kütleçekim kapsama alanında yer almaktadır ve kuvvetlerin sonuncusu ve ele avuca en zor geleninin kuramın diğer kuvvetleriyle birleştirilebileceği yönünde temkinli bir inanç duyabiliriz. M-kuramı üzerine çalışan bilimciler bunun doğru olmasını özlemle bekliyorlar, çünkü çok güzel; ama daha önce belirttim, tekrar vurgulamak zorundayım, salt inancın o tatmin edici sıcaklığı bilimde yetersiz kalmaktadır.

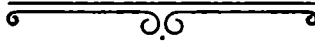
7 KUANTUM

ANLAMANNIN BASİTLEŞMESİ



BÜYÜK FİKİR

Dalgalar parçacık gibi, parçacıklar dalga gibi davranırlar



Eğer birisi kuantum kuramının ne olduğunu bildiğini iddia ediyorsa, o kişi kuramı anlamamış demektir.

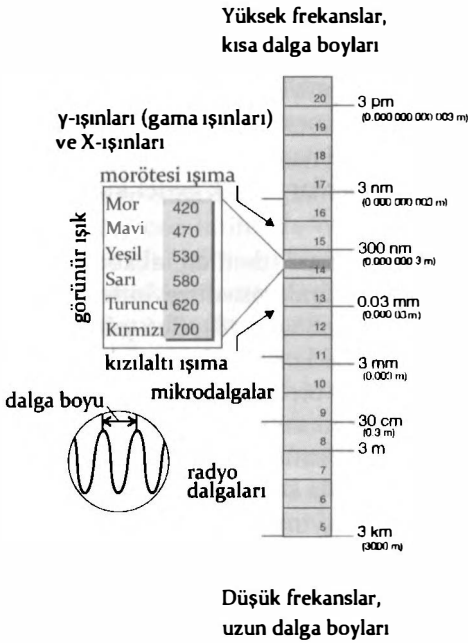
RICHARD FEYNMAN

Ayağımızın bir parmağını onun tehlikeli sularına daldırmış, kuantum kuramının kıyısında oyalanıp duruyorduk. Şimdi suya dalma zamanı geldi. Bu olağanüstü kuramın önemini kavramak için on dokuzuncu yüzyılın sonuna dek dalgaların açıkça, herhangi bir belirsizlik şüphesi olmaksızın dalga, parçacıkların da açıkça parçacık olduğunu belirtelim. Bu safça algılayışın hiç de hayrına olmayacak şekilde yüzyıla girerken bu ayrım artık kayboldu. 19. yüzyılın sonuna doğru yapılan gözlemlerde klasik fiziğe bir virüs girdi. 20. yüzyılda geçen birkaç on yılın ardından da hastalık klasik fiziği tümünden yıktı. Virüs parçacık, dalga, izlenen yol gibi klasik fiziğin en çok kullandığı kavramlardan bazılarını geçersizleştirmekle kalmadı, gerçekliğin dokusuna ilişkin yerleşmiş anlayışımızı da paramparça etti.

Klasik fiziğin (Newton'ın ve onun takipçilerinin fiziğinin; 3. Bölüm) yerinde artık *kuantum mekaniği* yükseliyordu. Felsefeciler arasında bu kadar büyük bir şaşkınlığa yol açan bir madde kuramıyla hiç karşılaşmamıştık. Keza fizikçilerin elinde bu kadar güvenilir olduğu ispatlanabilen bir madde kuramına da hiç sahip olmamıştık. Kuantum mekaniğinin öngörülerine uymayan kuraldışı hiçbir durum gözlemlenmedi ve hiçbir kuram bu kadar yoğun ve bu kadar büyük bir kesinlikle, başarıyla sınanmadı. Sorun şu ki kuramı büyük bir beceri ve yetkinlikle kullanabiliyor olsak da yüz yıllık tartışmalara rağmen aslında ne anlama geldiğini hiç kimse bilmiyor. Buna rağmen ABD'nin GSMH'sının %30'unun kuantum mekaniği uygulamalarına şu veya bu şekilde bağlı olduğu tahmin ediliyor. Kimsenin anlamadığı bir kuram için hiç fena değil. Bir de anlıyor olsaydık, gerçekleşecek olan potansiyel büyümeyi ve yaşam koşullarındaki iyileşmeyi (ve kaçınılmaz olarak kuantum silahlanmanın gelişmesiyle ölüm koşullarındaki "iyileşmeyi") düşünün!

Klasik fiziğin canına okuyacak virüs ilk kez 19. yüzyılın sonlarında sıcak bir cisimden yayılan ışıkla ilgili anlaşılması biraz zor bir problemle uğraşan fizikçiler tarafından bulundu. Ne olduğunu anlamak için ışığın bir *elektromanyetik ışıma* biçimi olduğunu, yani ışık hızı c' ile ilerleyen elektrik ve manyetik alan dalgalarından oluştuğunu bilmemiz gerekiyor. Işınının *dalga boyu* dalgaların iki tepesi arasındaki uzaklıktır ve görünür ışıktaki bu yaklaşık olarak bir milimetrenin on binde 5'i kadardır. Herkes bunun çok küçük olduğunu söyler: Öyledir, ama kafada canlandırılması *hemen hemen* mümkündür; bir milimetrenin bin parçaya bölündüğünü düşünün, ardından bu parçalardan birini yarıya bölün. Farklı ışık renkleri farklı ışıma dalga boylarına karşılık gelir; kırmızı ışık görece uzun dalga boyuna, mavi ışık görece kısa dalga boyuna sahiptir (Şekil 7.1). Beyaz ışık ışığın bütün renklerinin karışımıdır. Dalga boyundaki küçük değişiklikler önemli sonuçlar yaratır: Trafik ışıkları kırmızından sarıya, oradan yeşile değişirken, dalga boyu önce bir milimetrenin on

1 c' 'nin değeri $2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, saniyede yaklaşık 186.000 mil ya da 687 milyon mph'dir.



Şekil 7.1 Farklı bölgeler şeklinde sınıflandırılan elektromanyetik tayf. Tayfin görünür bölgesi dalga boylarında çok dar bir aralığı kapsar ve algıladığımız renklere karşılık gelen dalga boyları (küçük resimde gösterildiği üzere komşu tepeler arasındaki uzaklık) "görünür ışık" kutusunda nanometre (bir metrenin milyarda biri) cinsinden gösterilmiştir. Uzun dik griçubuktaki sayılar saniyedeki döngü sıklığı üzeri on (hertz, Hz) şeklindedir; dolayısıyla örneğin 8, 10^8 Hz'lik (saniyede yüz milyon döngü) bir sıklık (frekans) demektir. Bölgelerin sınıflandırılması katı değildir ve tayfin üst veya alt sınırı yoktur.

binde 7,0'undan 5,8'ine, ardından 5,3'üne düşer ve sürücüler bu minik farklara yanıt verirler. Mikrodalga fırınlarda kullanılan mikrodalga ışıınımı da elektromanyetik ışıımadır, ama dalga boyu birkaç santimetredir, dolayısıyla kafada canlandırması daha kolaydır.

Frekans (sıklık) kelimesinin anlamını da bilmek durumundayız: Yanınızdan bir dalganın geçtiği bir noktada olduğunuzu hayal ederseniz, bu durumda frekans saniyede yanınızdan geçen tepelerin sayısıdır. Uzun dalga boyundaki ışık düşük frekanslıdır, çünkü yanınızdan saniyede sadece birkaç tepe geçer; kısık dalga boyulu ışık yüksek frekanslıdır, çünkü yanınızdan saniyede çok sayıda tepe geçer. Görünür ışııkta saniyede yaklaşık 600 trilyon (6×10^{14}) tepe geçer, dolayısıyla frekans saniyede 6×10^{14} döngü (6×10^{14} hertz, Hz) olarak raporlanır. Kırmızı ışık yaklaşık olarak

saniyede sadece 440 trilyon döngüyle hayli düşük frekanslıdır, mavi ışıkta saniyede yaklaşık 640 trilyon döngüyle hayli yüksek frekanslı bir ışıındır. Bizler bu ışımayı farklı renkler olarak algılarız, çünkü gözlerimizdeki farklı reseptörler farklı frekanslara cevap verir. Çizimdeki sayılar bundan sonra anlatılanlarda herhangi bir rol oynamayacak, ama elektromanyetik tayftaki tipik büyüklükler ve çeşitli bölgelerden haberdar olmak genel kültürün bir parçasıdır.

19. yüzyılın sonunda “kara cisim ışıması” denilen, akkor bir cisimden yayılan ışığın iki özelliği saptanarak yasa düzeyinde ifade edildi. Alman fizikçi Wilhelm Wien (1864–1928) 1896 yılında kara cisim ışımasının yoğunluğunun (akkor cismin parlaklığının) en yüksek değeri, sıcaklığa basit bir biçimde bağlı bir dalga boyunda aldığını fark etti. Gündelik yaşamımızda bizler bu özelliğe niteliksel olarak aşınayız, çünkü bir cismin ısıtıldığında önce nasıl kırmızı renk aldığını, sıcaklık daha da arttırıldığında bu kez beyaza döndüğünü biliyoruz. Bu renk kayması, sıcaklık arttıkça ilk baştaki kırmızı (uzun dalga boyu) akkorluğa giderek daha fazla mavi (kısa dalga boyu) ışık katıldığına işaret ediyor, dolayısıyla yoğunluktaki en yüksek nokta daha kısa dalga boylarına kayıyor. 1879 yılında Avusturyalı fizikçi Josef Stefan (1835–1893) gündelik yaşamdan aşına olduğumuz bir başka özelliği daha araştırarak yayılan ışığın toplam yoğunluğunun sıcaklıkla nasıl keskin biçimde arttığını tespit etti ve aradaki ilişkiyi sayısal olarak yasa şeklinde ifade etti.²

Son derece yetenekli kuramcıların gayretli çabalarına karşın ne Wien’in ne de Stefan’ın yasası klasik fizik kavramlarıyla açıklanamıyordu. 27 Nisan 1900 tarihinde Kraliyet Kurumunda yaptığı konuşmada Lord Kelvin kara cisim ışımasının açıklanamaması başarısızlığını o dönem klasik fiziğin ufkunda yer alan iki küçük kara buluttan biri olarak tanımladı (öteki kara bulut hareketin

2 Wien’in yasası, maksimum yayınının dalga boyu ile mutlak sıcaklığın çarpımının bir sabit sayı olduğunu söyler ($\gamma_{\max} T = \text{sabit}$); Stefan-Boltzmann yasası da denen Stefan’ın yasası ise yayılan toplam yoğunluğun mutlak sıcaklık üssü dört ile orantılı olduğunu söyler (yoğunluk = sabit $\times T^4$). Bir ampülü çalıştırıp filamentin sıcaklığını 300 K’dan (oda sıcaklığı) 3000 K’ya (çalışma sıcaklığı) yükseltmek, yayılan yoğunluğu 10.000 kat artırır, bu yüzden de aniden bu kadar parlak ışımaya başlar.

esirin içinde gerçekleştiğinin saptanamamasıydı). Kelvin'in iki küçük bulutu büyüyerek şiddetli bir fırtına halini alacak ve bu fırtına dünya hakkındaki kavrayışımızı, hesaplamaları yapma biçimimizi, gözlemleri yorumlama tarzımızı ve gerçekliğin derin doğasına dair algılayışımızı silip süpürecekti.

Bu sıkıntılı durum içerisinde Max Planck (1858-1947) bilmeden ve istemeden kuantum kuramının doğuşuna neden oldu. 19 Ekim 1900 tarihinde Wien ve Stefan'ın yasalarına açıklama getiriyor gibi görünen bir denklem ortaya attı ve sonraki haftalarda bu denklemin ifade edilişi için kuramsal bir temel sağlamak için uğraştı. Bugün kuantum kuramının resmi doğum tarihi olarak kabul edilen 14 Aralık 1900 tarihinde Alman Fizik Topluluğu önünde yaptığı sunumda çözümünü dinleyicilere aktardı. Öncelikle ışımayı sıcak cisim içerisinde salınan atomların ve elektronların titreşimi tarafından güdülenen bir şey olarak ele aldı; her bir titreşim frekansı ışıma içerisinde belirli bir ışık renginin varlığına karşılık geliyordu. Bu standart yaklaşımdı ve çağdaşlarının hepsi de aynısını yapıyordu. Çağdaşları keza bu salıngaçların her birinin enerjisinin, nasıl bir sarkacın salınışı (onların varsayımına göre) herhangi bir genlikte olabiliyorsa aynı şekilde, sürekli değişken olduğunu varsayıyordu. Fakat Planck kökten farklı bir yaklaşım geliştirdi. Her bir salıngacın enerjisinin sadece *ayrık* adımlarla değişebileceğini, söz konusu olan enerjinin düz bir yokuş değil bir merdiven olduğunu ileri sürdü. Bunu net olarak da ifade etti: Belirli bir frekanstaki salıngacın enerjisi $h \times \text{frekans}$ 'ın katlarıydı; buradaki h şimdi *Planck sabiti* adını verdiğimiz³ yeni bir evrensel sabitti. Buna göre belirli bir salıngacın izin verilen enerjiler merdiveni, $h \times \text{frekans}$ niceliğinin 0, 1, 2, ... katı basamaklardan oluşuyordu.

h değeri o kadar küçüktür ki elektromanyetik ışıyım biçimlerinin çoğunun (özellikle de görünür ışık dediğimiz ışıyımın) enerji basamakları çok incelikli yöntemler kullanılmadıkça sap-

3 Tarihi aktarımların tümüne göre gayet nazik ve kibar bir insan olan Planck kendi adını vererek böbürlenme yoluna gitmemiş: Bu işi başkasına bırakmış. Ona kalsa bunun adı *eylem kuantumu* olurdu. Denklemlerini sıcak cisim ışıması gözlemleriyle uyumlulaştırarak bir değer tahmini de yaptı. Günümüzdeki değer $6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s' dir}$

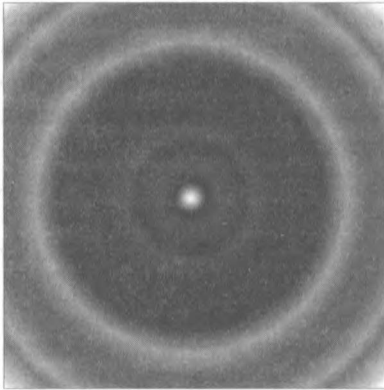
tanamayacak ölçüde küçüktür, dolayısıyla fizikçilerin enerjilerin sürekli olarak farklılaştığını düşünmesine neyin yol açtığını anlamak zor değildir. Bir sarkaca baktığınızda sallanma genliğinin sadece basamaklı olarak, derece derece değiştirilebildiğini görebilir misiniz?⁴ Buna rağmen basamaklı olarak enerji değişimi kara cisim ışımasının özelliklerinin açıklanabilmesinin tek yoludur ve enerjinin basamak şeklinde değişimi (*kuantizasyonu*) bugün herkes tarafından kabul edilen bir gerçektir.

Özel yaşamında Planck oğluna açılarak Newton'ınkilerle karşılaştırılabilecek bir keşif yaptığını düşündüğünü paylaşmıştır. Planck yaşamının geri kalanında çaresizce kuantizasyonu klasik fizik bağlamında açıklamaya uğraştı ve başaramadı. Bilimsel yöntem kavrayışımız açısından çıkartabileceğimiz iki ders yatıyor burada. Birincisi devrimci fikirler güçlerini hiç durmayan saldırılara karşı direnişten alırlar. Delice fikirlerin sorgusuz sualsiz çekici bulunarak sahiplenildiği diğer insani girişimlerden farklı olarak bilimde delice bir fikir özellikle (gerçekten de özellikle) kurulu düzende kabul gören bir paradigmayı yıkıyorsa, sürekli bir biçimde saldırıya uğrar. İkinci ders, yaşlı erkeklerin (ve her ne kadar onlar için biraz da mecburiyetten ve ne yazık ki şu an için daha az deneysel kanıta sahip olarak söylesek de yaşlı kadınların) radikal bilimin ateşli misyonerleri olmadıklarıdır, çünkü geleneksel yaklaşımla yetişmiş ve zihinleri bu fikirlerle dopdolu olduğu için öğrendiklerinin geçersizleşmesine çok içerlerler. Yeni alışkanlıklar gibi yeni paradigmalar da ancak eski nesiller ölünce kabul edilir.

Planck'ın devrimci, delice fikri, enerjinin öbekler halinde geldiği, düz değil granüllü olduğu, su gibi değil kum gibi olduğu, bizim gerçeklik algımızı değiştirecek bu fikri sessizlikle karşılandı. Önerdiği fikrin fiziksel olarak gerçekliği ancak 1905 yılında gladyatör Einstein arenaya çıktığında, matematiksel kılıcını çekip bir başka klasik ejderhaya sapladığında ortaya çıktı.

4 Cevabınız evetse atıyorsunuz demektir. Sarkaçlı büyük saatlerde görülen, yaklaşık 5 cm'lik bir genlikle salınan 100-g vuruşlu 1 metrelik bir sarkacın genlik basamakları düşey düzlemde yalnızca 10^{-30} cm ayrışır ve bu büyüklük açısından bir atom çekirdeğinin çapından on beş kat daha küçüktür.

Ejderhayı anlatabilmek için onun inine girerek 19. yüzyılın sonlarındaki fizik ortamı içerisinde bakmamız gerekiyor. Yeni yüzyıl yaklaşırken herkes ışığın (daha genel olarak elektromanyetik ışımanın) dalga şeklinde ilerlediğine inanmış haldeydi: Bir dalga olarak yayılıyordu. Bu kanı her zaman aynı yönde değildi. Newton (sonradan Laplace da onu destekledi) ışığın bir parçacık akışı olduğu konusunda ısrarlıydı, fakat 19. yüzyılda elde edilen deneysel kanıtlar herkesi ışığın dalga olduğuna ikna etmişti. En ikna edici kanıt da ilk olarak çok dikkatli ve titiz bir gözlemci olan Leonardo da Vinci (1452–1519) tarafından tespit edilip Huygens, Young ve Fresnel gibi alanına hâkim fizikçilerin harcadığı büyük emeklerle niceliksel olarak araştırılan *kırınım* olgusuydu. nın en çarpıcı doğrulamalarından biri, diğer taraftan aydınlatılmış bir küresel ya da çembersel ekranın gölgesinin merkezinde bir ışık noktası olması gerektiği şeklindeki öngörüydü (Şekil 7.2). 1818 yılında Augustin Fresnel (1788–1827) Fransız Akademisinin sponsorluğunu yaptığı bir yarışmaya kırınım kuramı hakkında bir makaleyle başvurdu. Hakem kurulunun içerisinde yer alan matematikçi Poisson ışığın dalga kuramına son derece eleştirel yaklaşıyordu ve Fresnel'in kuramından dairesel bir engelin arkasında parlak bir ışık ortaya çıkacağı şeklinde saçma görünen bir çıkarım yaptı. Fakat kurulun bir başka üyesi François Arago Poisson'un parlak ışığını aramaya karar verdi ve deneysel olarak buldu. Sonuç olarak yarışmayı Fresnel kazandı ve bir süre sonra ışığın dalga kuramı kabul edilerek kesin bir paradigma olarak benimsendi. Ejderha, ışığın dalga özelliğine sahip olmasıydı.



Şekil 7.2 Poisson noktası. Işığın dalga kuramına göre bir lambanın önüne opak bir disk yerleştirildiğinde gölgesinin merkezinde beyaz bir noktanın gerçekleşeceği öngörülür. Bu gibi kırınım olguları ışığın dalga doğasına yönelik ikna edici kanıt özelliği taşır.

Einstein 1905'te ışığın parçacıklardan oluşmuş olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstererek ejderhayı öldürdü. Einstein'ın paradigmayı yıkışı iki kısımdan oluşuyordu. İlk olarak ısıtılmış bir kovuğun içerisindeki elektromanyetik ışımanın termodinamik özelliklerini analiz ederek bunun Planck'ın gözlemleriyle uyumlu olduğunu gösterdi; ışıma dalgalarından değil parçacıklardan oluşmak zorundaydı. Bu ışık parçacıklarına on yıl sonra *foton* adı verildi ve halen de bu ismi kullanıyoruz.

Einstein'ın önerisi aradığı deneysel desteği çok kısa süre sonra elektronların morötesi ışıma maruz kalmış bir metalin yüzeyinden dışarı atıldığı *fotoelektrik etki*'de buldu. Fotoelektrik etki ışığın dalga kuramının açıklamayı beceremiyor gibi görüldüğü bir dizi acayip özelliğe sahipti. Fakat etki, bir elektron ile ona gelen bir foton arasındaki bir çarpışmanın sonucu olarak düşünüldüğünde hemen açıklanabilir hale geliyordu. Bu model fotoelektrik etki adına niceliksel olarak kesin bir sonuca yol açtı ve Einstein 1921'de Nobel ödülüne aday gösterilirken kendisine atıfta bulunulan başarılarından biri oldu. Fotonların varlığına ilişkin şu anda halen ders kitaplarında (benimki dahil) aktarılan söz konusu desteğin tartışılmaz bir kanıt olarak verilmesine karşın kusurlu olması, bugün fotoelektrik etkinin elektromanyetik dalgaları nasıl açıkladığını bilmemiz yönünden kader ve fiziğin beklenmedik bir örtüşmesi sayılabilir. Buna karşın fotonların varlığı tartışmasızdır, çünkü buna dair farklı türde bol bol kanıt sahibiz.⁵

Işığın parçacıklardan oluştuğu şeklindeki yeni ve deneysel olarak tartışmasız görüş ile ışığın dalgalarından oluştuğunu söyleyen eski ve deneysel olarak tartışmasız görüş arasında bir uzlaşma sağlanması, tahmin edebileceğiniz üzere ilk öne sürüldüğünde bir zorluk barındırıyordu. O zamandan beri de aynı zorluğu taşımaktadır ve buna daha sonra tekrar döneceğiz.

Aktarımımızın bu aşamasında kuantum virüsü artık klasik fiziğin bünyesine girmiş ve hastalık yayılmaya başlamıştır. Einstein'ın kuantum kuramının oluşumuna yaptığı ikinci katkı da

5 Einstein'ın Nobel ödülüne o sırada tartışmalı görülen ama ileride doğru olduğu (bildiğimiz kadarıyla) kanıtlanmış olan asıl çalışması görelilik kuramıyla değil de, yanlış bir analizle ama elde ettiği doğru bir sonuçla aday gösterilmiş olması da bir başka ilginç tesadüftür.

*anni mirabili*⁶ olan 1905-1907 arasında gerçekleşti. Bu, malzemelerin ısıtıldığında yaşadığı sıcaklık artışıyla ilgili daha gösterişsiz ve sade türde bir bilinmezin çözümüne yaptığı katkıydı. Araştırılan özellik, sıcaklığı belirli bir miktarda artırmak için gereken ısıнын ölçüsü olan bir maddenin *ısı kapasitesi*ydi.⁷ 1819 gibi eski bir tarihte pek fazla sayıda olmayan deneysel sonuçla ve bağımsız değerlendirme sisteminin henüz doğmaya başladığı koşullarda kaygısız bir özgüvenle Fransız bilimciler Pierre-Louis Dulong (1785-1838) ve Alexis-Thérèse Petit (1791-1820) bir örneklemdeki atom sayısına indirgendiğinde bütün maddelerin aynı ısı kapasitesine sahip olduğunu duyurmuştu. Açıkça doğru olmamasına karşın herkes de onlara inanmıştı. Elli yıl sonra daha fazla veriye ulaşılabilir olduğunda ve fizikçiler ısı kapasitelerini düşük sıcaklıklarda ölçmeye başladıklarında Dulong ve Petit'nin yasasının ele aldığı konuya dair kötü bir değerlendirme olduğu ve bütün ısı kapasitelerinin sıcaklık azaltıldığında sıfıra doğru düştüğü kaçınılmaz olarak açığa çıktı.

Klasik fizik, atomların giderek daha dinamik şekilde salınımında bulunmasıyla ısıнын oluştuğunu varsayarak Dulong ve Petit'nin yasasını çok kolayca açıklayabiliyordu. Bu yüzden yasanın düşük sıcaklıklarda ve çoğu örnekte oda sıcaklığında da geçersiz olduğunu kabul etmek zorunda kalmak klasik fizikçiler açısından moral bozucuydu. Einstein 1916'da olağanüstü aklını bu konuya yöneltene dek konu çözümsüz kaldı. Einstein salınan atomların rolünü kabul etti, ama Planck'ın izinden giderek çok önemli bir öneride bulundu ve atomların enerji düzeylerinin sarsıla sarsıla yükseldiğini, bir merdiven gibi basamak basamak artan enerjilerle titrestiğini öne sürdü. Düşük sıcaklıklarda atomların salınım yapması için yeterli enerji yoktur, dolayısıyla ısı kapasitesi çok düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda bütün atomların salınım yapabilmeleri için yeterli enerji vardır ve ısı kapasitesi klasik Dulong ve Petit değerine yükselir. Einstein ısı kapasitesinin sıcaklık bağımlılığını hesaplamayı başardı ve gözlemle oldukça iyi bir uyuşma elde etti. Oluşturduğu model birkaç yıl sonra Hollandalı fizikçi Peter Debye (1884-1966) tarafından geliştirildi ve ana fikri

6 (Lat.) muhteşem yılları-çn.

7 Örneğin suyun ısı kapasitesi olan $4 \text{ J K}^{-1} \text{ gr}^{-1}$, yani onun "özgül ısısı", 1 gr suyun sıcaklığında 1°C artış için 4 J ısı gerektiğini belirtir.

zedelemeyen benzer inceltmeler sonucunda deneyle harika bir örtüşmeye ulaşıldı.

Einstein'ın katkısı elektromanyetik ışıma üzerine yapılan çalışmalarda ortaya çıkmış kavramları atomların titreştiği tamamen mekanik sisteme genişlettiği için çok kritik bir önem taşıyordu. Virüs ışımadan maddeye türler arası bir geçiş yapmıştı.

Virüs hem maddede hem de ışımada yerini sağlamlaştırdıktan sonra hastalık klasik fiziğin bütün yapısını kemirmeye başladı. 1906'da başlayıp ileriye doğru uzanan hatta, özellikle de 1916 yılında ünlü Danimarkalı fizikçi Niels Bohr'un (1885-1962) ortaya attığı ilk başta kuantum kavramlarının parçacık sistemlerine uygulanabilirliğini doğrular gibi görünen, imge gücü kuvvetli fakat savunulamaz nitelik taşıyan hidrojen atomu modeli olmak üzere, belirli tarihlerde ulaşılan çeşitli başarılar söz konusudur. Fakat bizim aktarım hedeflerimiz açısından kritik tarih, virüsün maddenin tam kalbine ulaştığı ve parçacık kavrayışını yok ettiği 1923 yılıdır.

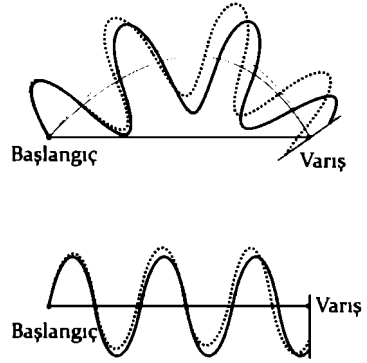
Geçmişte Newton gibi ciddi bilimciler ışığın parçacıklardan oluştuğu görüşünde olmasına rağmen, anlayacağınız fotonların ortaya çıkışı tam bir sürpriz değildi, hiçbir ciddi bilimci (büyüleyici bir girişimcilik ve spekülasyonda sınır tanımayan birkaç antik Yunan hariç) maddenin dalgaya benzer olduğu görüşünü savunmamıştı. Fakat 1920'li yıllarda toplumun yaşadığı dalgalanmaların ortasında ortaya çıkan ve kökleşen algı bu oldu. Bu görüşün ilk sahibi XIV. Louis'nin soyluluk payesi verdiği bir aileden gelen Prens Louis de Broglie'ydi (1892-1987).

De Broglie'nin bu devrimci görüşe katkısı, ışığın yayılımı ile parçacıkların yayılımı arasında bir benzetme kurmasına dayanıyordu. Konuyu görelilik çerçevesinde tartıştı ama bu karmaşaya girmeden görüşlerinin esasını aktarabiliriz. *Geometrik optiğin*, ışık ışınlarının aynalardan yansıdığı ve lenslerden geçerek kırınıma uğradığında izlediği yolları düz çizgiler olarak değerlendirilen optik türünün en önemli özelliği, bu çizgilerin çıkış noktası ile varış noktası arasında en kısa yolculuk zamanını sağlayan

yollardan ilerlemeleridir. Bu aslında İskenderiyeli Heron'un *Catoptrics* eserinde MÖ 125 yılı civarında yaptığı gözlemi 1657 yılında Fransız yargıç ve amatör ama seçkin matematikçi Pierre de Fermat'ın (1601-1665) genelleştirilerek sunmasıyla ortaya çıkmış olan *en az zaman ilkesi*'dir. Hatta aslında ismi *sabit zaman ilkesi*'dir: Bu garip "sabit zaman" ifadesi, yolun geçilme zamanının ya minimum ya da bazı durumlarda maksimum olabildiği anlamına gelir. Tatışmamızı en az zaman yollarıyla sınırlayacağız, ama işaretle kolaylıkla en uzun zamanlı yollara da genişletilebilir. Burada hemen aklımıza gelen soru şudur: Işık, anlaşıldığı kadarıyla hem de önceden, en az zamanda sonuçlanacak yolu nasıl biliyor? Yanlış yolda ilerlemeye başlarsa, başlangıca dönüp yeniden başlamak yerine, yoluna devam etmesi zaman harcanması açısından daha ekonomik olamaz mı?

Işığın dalga kuramı burada çok şık bir biçimde yardıma koşuyor. İki sabit nokta arasında rasgele bir yol düşünelim ve bu yolda bir dalganın ilerlediğini hayal edelim (Şekil 7.3). Ardından üzer-

Şekil 7.3 Üstteki çizimde iki sabit nokta arasında eğrisel bir yol ve hemen yanında bir eğrisel yol daha görüyoruz. Her iki yolun üzerine aynı dalga boyunda birer dalga çizdik. Aynı genlikle başlamalarına rağmen varış noktasına ulaştıklarında genlikler çok farklıdır. Yan yana yollardan ilerleyen bütün dalgaları birden düşünürsek, varış noktalarındaki genliklerin hepsinin çok farklı olduğunu ve yıkıcı şekilde girişime uğradıklarını, sonuç olarak toplam genliğin sıfır olacağını anlayabiliriz. Alttaki çizimde aynı şeyi düz bir yolda ve onun yanındaki yollardan birinde görüyoruz. Bu kez varış noktasına ulaşan dalgaların hepsi çok benzer genliklere sahipler ve yıkıcı şekilde girişime uğramıyorlar. İstenen rotada ilerleme özgürlüğünün tam olarak tanındığı koşullarda girişim sonrası sağ kurtulan rotaların yalnızca düz bir çizgiye yakın olanlar olduğu sonucuna varıyoruz.



lerinde yine dalganın ilerlediği, ilk yolun çok yakınındaki yolları düşünelim. Varış noktasında bu farklı yollardan gelen dalgaların tepe ve çukurları birbirini yok edecektir: Bu karşılıklı yokoluşa, bu birbirini götürmeye *yıkıcı girişim* denmektedir. Girişim dalga hareketinin ayırt edici özelliğidir: Bir dalgalanmanın çukuru bir başkasının tepesiyle karşılaşır sudaki yer değiştirmeler birbirini götürdüğünde aynısı su yüzeyinde de görülür. Fakat yollardan birinde komşularının tepelerinin konumları o kadar az farklılaşır ki bunlar birbirini götürmek yerine güçlendirir: Bu karşılıklı güçlendirmeye *yapıcı girişim* denir. Bu etki suyun üzerinde tepelerin çakıştığı ve sudaki yer değiştirmelerin arttığı dalgalanmalarda da görülür. Yapıcı girişime uğrayan yollar başlangıç ve varış noktaları arasında düz bir çizgi olmaya (genel olarak en az zamanlı yol budur) çok yakındırlar.

Şimdi argümanın en önemli yerine geldik. Işık hangi yolun en az zamanlı yol olacağını ne önceden bilir ne de bilmeye ihtiyaç duyar: *Bütün* yolları dener, ama sadece en az zamanlı yola çok yakın olan yollar birbirini götürmez. Işığın dalga boyu ne kadar kısaysa yıkıcı ve yapıcı girişim o kadar daha şiddetli olur ve sonsuz kısa dalga boyu sınırına, yani fiziksel (dalga) optiğinin geometrik optik haline geldiği sınıra yaklaştıkça yalnızca geometrik olarak düz çizgiler ayakta kalır. *Mutlak hareket özgürlüğü bir kurala sonuçlanır*. Hiçbir sınırlama olmadığı koşullardaki kurdun sistematik davranışın koyunu olarak belirlediği, anarşinin kurallar olarak karşımıza çıktığı, düzensizliğin altta yatan düzen olarak ve özgürlüğün kontrolün temeli olarak görüldüğü bu durum bilimsel açıklamanın en güzel örneğidir.

Bu açıklamayı aklımızda tutarak parçacıkları düşünmeye geri dönelim. Klasik mekaniğe göre bir parçacığın izlediği yol (3. Bölümde gördüğümüz üzere) ona her an etkiyen kuvvetlerce belirlenir. Fakat dalgaların yayılımında bu açıklamayı bütün yolu kapsayan bir ifadeye dökebiliriz. Fransız matematikçi ve gökbilimci Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759) 1744 yılında bir parçacığın izlediği yolun, onun yolla bağlantılı *eylem* adını verdiği bir minimum nicelik olduğunu duyurdu. Maupertuis’yi *en az eylem ilkesini* kabule götüren fizikten ziyade teolojik düşüncele-riydi, zira *Essai de cosmologie* (1759) adlı eserinde kutsal bir varlı-

ğın mükemmelliğinin ancak ve sadece en büyük basitlik ve en az çaba harcamayla bağdaşabileceğini ileri sürmüştü. Bu görüşün aksine ilkenin modern biçiminde bir parçacığın bazı durumlarda en çok eylemin olduğu yolu tutabildiği de teslim edilmektedir, dolayısıyla *sabit eylem ilkesi* daha iyi bir isimlendirme olur. Ama basit tutma adına en az eylem yolu ifadesiyle devam edelim.

Maupertuis'nin "eylem" tanımı muğlak ve kafasındaki fikre göre idi; yine de doğru bir fikrin filiziydi ve aradan hiç zaman geçmeden hemen İsviçreli matematikçi Leonard Euler (1707-1783) tarafından matematiksel olarak titiz ama sınırlı bir biçimde, son hali olarak da 1760 yılı civarında Joseph Louis Lagrange (1736-1813) tarafından ifade edildi. Bu tarihsel ayrıntılarla fazla zaman kaybetmeye gerek yok: Esas önemli olan, "eylem" denen (bunu "çaba"ya yakın bir şey olarak düşünün) iyi tanımlı bir niceliğin var olması ve bir parçacığın en az eyleme, en az çabaya karşılık gelen bir yol benimsemesidir. Burada hemen aklımıza gelen soru (şimdi de yukarıda yazdığım ifadelerden alıntıya başladım, haydi bakalım) ışık, anlaşıldığı kadarıyla hem de önceden, en az eylemle sonuçlanacak yolu nasıl biliyor? Yanlış yolda ilerlemeye başlarsa, başlangıca dönüp yeniden başlamak yerine, yoluna devam etmesi eylem (ya da çaba) harcanması açısından daha ekonomik olamaz mı?

En az zaman ve en az eylem ilkeleri olarak ifade edildiklerinde sırasıyla optiğin ve parçacık dinamiğinin temel yasaları arasında bir benzerlik kurulabilmesi De Broglie'yi çok etkilemişti. Bir parçacığın yola koyulmadan önce hangi yolun en az eylemle sonuçlanacak olduğunu biliyor gibi gözükmesi probleminin, tam da ışıktaki çözüldüğü gibi, *bir dalganın bir parçacıkla bağlantılandırılması şartıyla* çözülebileceğini gördü. Ardından anarşi, yasa sonucuna ulaşacaktı: Parçacıkla bağlantılı dalgalar başlangıç ve varış yerleri arasındaki bütün yolları inceleyecek ve sadece düz bir çizgiye karşılık gelenler (eğer etki eden hiçbir kuvvet yoksa ve daha genel yollarda eğer aynalar ve lenslere benzer kuvvetler varsa) yapıcı girişime uğrayacak ve komşuları tarafından yok edilmeyeceklerdi. Bu yokoluş bu "madde dalgalarının" dalga boyları düştükçe daha şiddetli bir hal alacak ve sonsuz kısa dalga boyları sınırına doğru yaklaştıkça uzaydan geometrik olarak ge-

çen iyi tanımlı yolları yeniden elde edecektik. Başka bir deyişle parçacıkların kesin yollar izlediği Newton dinamiği karşımıza çıkacaktı.

Bu benzetme üzerinden ilerleyen de Broglie bu madde dalgalarının dalga boyları için bir ifade çıkarılamayı başardı:

$$\text{Dalga boyu} = h / \text{momentum}$$

İfadedeki h Planck sabitidir, bir parçacığın momentumu ise (3. Bölümde gördüğümüz üzere) kütlesi ile hızının çarpımıdır. Böylelikle Planck sabiti (Planck'ın bu sabite "eylem kuantumu" adını verdiğini hatırlayın) hareketin tam içine işleyerek madde dinamiği tanımına çok derin bir düzeyde dahil oluyordu. Kütlenin bu ifadede paydada momentuma katkısı üzerinden yer aldığına dikkat edin, dolayısıyla büyük kütlelerin (top, insan, gezegen gibi) son derece kısa dalga boylarına sahip olması beklenenecektir. Örneğin saniyede 1 metre hızla hareket ettiğinizde sizin dalga boyunuz yaklaşık olarak sadece 1×10^{-35} m'dir, dolayısıyla hareketiniz Newton dinamiğine göre ele alınabilir ve kırıma uğramaktan ve Pisa yerine ancak Padua'ya varabilmekten korkmanıza çok gerek yoktur.⁸ Bu kadar kısa dalga boyları olan dalgaların hiç fark edilmemiş olması ve Newton dinamiğinin görünür, "büyük ölçekli" cisimlere uygulandığında bu kadar başarılı olması çok da şaşırtıcı değildir. Fakat elektronlar düşünüldüğünde farklı bir dünyaya adım atıyoruz, çünkü elektronlar momentumları düşük ve dalga boyları da bununla uyumlu olarak uzun olacak kadar hafifler. Atomun içerisindeki bir elektronun dalga boyu atomun çapıyla karşılaştırılabilir düzeydedir ve elektronlar açısından Newton dinamiği artık kabul edilebilir bir yaklaştırım sağlamaz.

1929 yılında "elektronun dalga doğasını keşfi" nedeniyle Nobel ödülüne layık görülen de Broglie'nin bunu hak ettiğine hiç kuşku yok. Fakat Nobel komitesi değerlendirmesinde tam olarak

8 Durduğunuzda ilk tepkiniz sağduyunun tersine, dalga boyunuzun aniden sonsuz hale geldiğini ve evrenin her tarafına yayılmış olduğunuzu düşünmek olabilir. Fakat aslında sadece duruyor gibi gözüküyorsunuz; gerçekte siz o noktada titreştikçe bedeniniz kendini farklı yönere vurmaya devam ediyor.

doğruyu söylemiyordu: de Broglie'nin parçacıkların dalga doğasını tespit edişi sadece elektronlar için değil, parçacıkların *hepsi* için geçerliydi. Elektronlar yaygın görülen parçacıkların en hafifidir, dolayısıyla onun iddiası en açık şekilde elektronlarda görülmektedir; ama ilkesel anlamda kendisiyle bağlantılanabilen bir dalga karakteri olmayan hiçbir parçacık ya da parçacık topluluğu (buna toplar, insanlar, gezegenler dahil) yoktur. Bu dalga karakterinin varlığı, elektronların dalgaların en ayırt edici özelliği olan kırınımına uğradıkları gösterilerek deneysel olarak da onaylanmıştır. Amerikalı Clinton Davisson (1881-1958) 1937 yılındaki Nobel ödülünden payını 1927 yılında tek bir beş sentlik nikel para kristalinin elektronları kırınımına uğrattığını göstererek kazanmış, George Thomson (1892-1975) da kendi Nobel'ini Aberdeen'de çalışırken elektronların ince bir zar tabasından geçirildiklerinde kırınımına uğradıklarını göstererek elde etmiştir. O zamandan bugüne bütün moleküller kırınımına uğratılmıştır. G. P. Thomson'ın ödülü elektronun bir dalga olduğunu gösterdiği için, babası J. J. Thomson'ın da aynı ödülü elektronun bir parçacık olduğunu gösterdiği için almış olması aile boyu bilim yapmanın hoş bir yönüdür. Thomson'larda kahvaltılar epey olaylı geçiyor olsa gerek.

Henüz tam olarak oluşmamış ve anlaşılmamış olsa da havada devrimin hissedildiği noktaya geldik. De Broglie bile aslında "madde dalgaları" derken ne demeye çalıştığını tam bilmiyordu. Saptanan şey madde ve ışınımın *ikiliği*, hem dalga hem de parçacık özelliğine sahip olmalarıydı. Uzun zamandır dalga gibi olduğu bilinen ışığın başka bir yüzü daha olduğu, parçacık gibi davrandığı gösterilmişti. Uzun zamandır parçacıklı olduğu bilinen maddenin başka bir yüzü daha olduğu, sanki dalgaymış gibi davrandığı gösterilmişti. Yine bir yanından kare gibi, diğerinden altıgen olarak gözükene küp görüntüsü aklımıza geliyor (Şekil 6.12).

Fizikte en rağbet gören kavramları yıkmış olan virüs 1926 yılında de Broglie'nin madde dalgalarının doğasına açıklama getirdiğinde en güçlü haline ulaştı. Bundan sonra da göreceğimiz gibi, bizim küçültücü kavramımız olan "virüs"ün aslında duruma uygun düşmediği yavaş yavaş ortaya çıkıyor, zira klasik fiziğin toz

dumanı ağır ağır dağıtıldıkça çok daha basit, temiz ve anlaşılabilir bir dünya doğuyor. Klasik geleneklerde adet olduğu üzere doymuş ve eski olan bu yeni basitlikle uzlaşmıyor ve sonuç olarak genci yanlış yönlendiriyor. Bundan sonraki aktarımında genç ve yeni düşüncelere açık zihinlere kuantum mekaniğinin dünya kavrayışımıza getirdiği sadelik ve basitliği aktarmayı umuyorum.

Kuantum kuramının geçmişine baktığımızda karşımıza iki büyük dev çıkıyor: Esrarengiz Alman Werner Heisenberg (1901–1976) ve romantik ve coşkulu Avusturyalı Erwin Schrödinger (1887–1961). İkisi beraberce parçacıkların hareket özelliklerini (bu şekilde adlandırmaya devam edeceğiz) hesaplamamızı sağlayan ve Newton’ın hareket yasalarının yerini alan denklemleri formüle ettiler. Sırasıyla *matris mekaniği* ve *dalga mekaniği* adı verilen formülasyonları birbirine hiç benzer görünmediği gibi, felsefeleri de bambaşkaydı. Fakat bir süre sonra bu iki formülasyonun matematiksel olarak özdeş olduğu gösterildi, böylece birbirine rakip felsefeleri de kişisel bir seçim konusu haline geldi. Matematik’in fiziksel dünyaya farklı ama eşdeğer biçimlerde kendisini eşleyebilmesi açısından bu kaleme benzer bir karakteri vardır, dolayısıyla başka birisinin formülasyonunu hor görürken her zaman dikkatli olmamız gerekir, çünkü bizimkiyle eşdeğer çıkma ihtimali vardır. Matris ve dalga mekaniğinin karışımına bugün genel olarak *kuantum mekaniği* denmektedir; biz de bundan sonra bu terimi kullanacağız.

Burası kuantum mekaniğinin ayrıntılarına ya da kronolojik olarak formüle edilişine girmek için uygun değil. Bunun yerine ayrıntılara boğmadan iki yaklaşımı karıştırıp eşleştirerek sizlere kuantum mekaniğinin özünü göstereceğim. Tarihini bir kenara bırakıp içeriğindeki önemli noktalara yoğunlaşacağız. Bir dizi garip ve rahatsız edici fikirle karşılaşmaya şimdiden kendinizi hazırlayın, ama bunları ele alırken dikkatle yol göstermeye çalışacağımı da bilin lütfen.

Kuantum mekaniğinin en ünlü ve tartışmalı yönlerinden biri Heisenberg’in 1927’de formüle ettiği *belirsizlik ilkesi*’dir. Heisenberg’in göstermeye çalıştığı şey, de Broglie’nin dalga boyu ile momentum arasındaki bağlantısını akılda tutarak, bir parçacık hakkındaki bilgimiz konusunda bazı sınırlamalar olduğudur.

Örneğin mikroskopla bir parçacığın yerini ölçmek istiyorsak, parçacığı gözlemlemek için en azından bir foton kullanmamız gerekecektir ve elde ettiğimiz yer ne kadar kesinse kullanmak zorunda olduğumuz fotonun dalga boyu o kadar kısadır. Genel anlamda söylersek, yerini bulmak için kullandığımız ışımamın dalga boyundan daha kesin bir şeyin yerini saptamamız mümkün değildir. Dolayısıyla görünür ışıkla yaklaşık olarak bir milimetrenin binde 5'inden daha az herhangi bir şeyin yerini saptayamayız. Dalga boyları 1 m'ye yaklaşan ses, kaynağın yerini yaklaşık olarak 1 m'den daha büyük bir kesinlikle saptamamıza izin vermez, bu yüzden yaraların yankıyla yer bulurken çok yüksek frekanslı, kısa dalga boylu sesler kullanması gerekir.⁹ Öte yandan bir parçacığın yerini saptamak için kısa dalga boylu elektromanyetik ışınım kullanmanın bir bedeli de vardır. Bir foton parçacığa çarptığında momentumunun bir kısmını ona yükler ve de Broglie'nin bağıntısından fotonun dalga boyu kısalдықça aktarılan momentumun büyüklüğünün arttığını çıkarsayabiliriz. Bu nedenle bir parçacığın konumu hakkındaki bilgimizi arttırırken momentumu hakkındaki bilgimizi bulanıklaştırırız. Bu problemi ayrıntılarıyla araştıran Heisenberg buradan o ünlü sonucunu çıkarmayı başarmıştır:

Konumdaki belirsizlik $\times$ momentumdaki belirsizlik h 'den az değildir.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesini, bahsettiğimiz mikroskop deneyi tam olarak yapılmamış olsa bile, deneysel bir sonuç olarak değerlendirmeliyiz: Heisenberg'in formüle edişi itibarıyla belirsizlik ilkesi, deneysel bir düzenlemenin sahip olunan bilgi ışığında dikkatle yapılmış analizinin özetidir. Gerçek bir deney bizim bu *gedanken* (düşünce) deneylerimizin birinde öngördüğümüzden çok farklı bir sonuç verebilir elbette; ama bu da zaten bilimsel yöntemde deneyin rolünün özünde vardır. Bizim kavrayışımızın doğru olması şartıyla, mevcut bilim uygulanabilir nitelikteyse, nihayetinde Heisenberg'in vardığı sonuç doğrudur.

9 Arama sırasında yarasa 1 cm'lik bir dalga boyuna karşılık gelen 35 kHz'te bir sinyal kullanır. Yemeğin yerini saptadığındaysa 8-4 mm açıklığında dalga boylarına denk gelen 40-90 kHz aralığındaki yüksek frekanslı öldürme modunda cırıltılara geçiş yapar.

Bir fotonun momentumundan, fotonlar hakkında hiçbir şey bilmediği ve Planck sabitinin de farkında olmadığı için, esasen habersiz olan klasik fizik, konum ve momentumun eşanlı olarak isteğe bağlı bir kesinlikle bilinebilir olduğu görüşüne dayanır. Şimdi ortaya çıkan soru, (doğanın temel bir betimlemesi ve klasik fizikten büyük bir ayrılma olarak görmemiz gereken) belirsizlik ilkesinin hareketin matematiksel betimlenişiyle nasıl birleşik hale getirileceğidir. Klasik fizikte bir parçacığın konum ve momentumunu zamanla değişime uğrar şekilde düşünürüz, her ikisi de zamanla iyi tanımlı şekilde parçacığın *izlediği yol* olarak açılır.

Yanıtı şu şekilde gidebiliriz. Verili herhangi bir an için şunu yazabileceğimiz açıktır:

$$\text{konum} \times \text{momentum} - \text{momentum} \times \text{konum} = 0$$

Örneğin belirli bir noktadan konum 2 birim, momentum 3 birim olarak ölçülmüşse, bu durumda soldaki ilk terim $2 \times 3 = 6$ birim, ikinci terim $3 \times 2 = 6$ birim olur ve aradaki fark açıkça görüldüğü üzere sıfırdır. Fakat bu açıkça görülen birbirini götürme, kuantum mekaniğinde basbayağı yanlıştır. Genel olarak söylersek, konum ile momentumu eşanlı olarak bilemediğimiz için her bir terimin *tam olarak* 6 birim (ya da ölçümlerimiz ne sonuç veriyorsa o) olduğundan emin olamayız, dolayısıyla bu ifadedeki ilk terimin ikincisinden Planck sabitinin belirsiz katı kadar farklı olması mümkündür. Heisenberg'in büyük başarısı konum ile momentum arasındaki belirsizlik bağıntısının, evren hakkında deneysel olarak doğrulanmış bu ifadenin ancak ifadenin sağ tarafının sıfır olmayıp aslında Planck sabiti h olduğunda elde edildiğini gösterebilmiş olmasıdır:¹⁰

$$\text{konum} \times \text{momentum} - \text{momentum} \times \text{konum} = h$$

Klasik fizikçiler örtük olarak sağ tarafın sıfır olduğunu varsaydılar ve klasik fiziğin harika yapısını buna göre inşa ettiler. Bugün sağ tarafın sıfır olmadığını biliyoruz, ama klasik fizikçilerin sıfır olduğunu düşünmesine şaşırılmayacak kadar da küçüktür. Sağ

¹⁰ Biz biraz basitleştiriyoruz: Sağ taraftaki değer tam olarak h 'nin kendisi değil, $i - 1$ 'in karekökü olmak üzere $ih / 2\pi$ 'dir.

tarafın sıfır olmayışının işaret ettiği çok önemli şeyler var ve klasik fiziği çökerten özellik işte budur.

Heisenberg, meslektaşları Max Born (1882–1970) ve Pascual Jordan'ın (1902–1980) yardımıyla konum–momentum ifadesinin var olan bu sağ tarafının kuantum mekaniğine nasıl dahil edileceğini buldu. Bu arada Schrödinger de başka bir yol bulmuştu. De Broglie'nin bir şekilde parçacıkla “bağılantılı” bir madde dalgasının varlığını önerdiğini ve girişim hesaba katıldıktan sonra da hayatta kalan dalganın en az eylem yolunda açıldığını hatırlayacaksınız. Dalgaya bu hayatta kalma yolunu bulmak için uzayda el yordamıyla nasıl ilerleyeceğini söylemenin kurallarını bulmak gayet kolaydır. Bu kurallar *Schrödinger denkleminde* bulunur." Bu ünlü denklem madde dalgasının çeşitli noktalarda nasıl değiştiğini gösterir ve onu formüle etmek için tam da Heisenberg'in klasik fizikten ayrılırken kullanmak durumunda kaldığı konum–momentum ifadesinden faydalanmamız gerekir. Bu bağıntının her iki formülasyonda oynadığı merkezi rol Heisenberg ile Schrödinger'in yaklaşımlarının matematiksel olarak eşdeğer olmalarının da esas nedenidir.

Schrödinger denklemini çözdüğümüzde madde dalgalarının aldığı şekillerin matematiksel ifadelerini elde ederiz. Artık ne “madde dalgası” ifadesi ne de de Broglie'nin bunlara dair yorumu kullanılmaktadır. “Madde dalgası” için kullanılan modern ifade *dalga fonksiyonu*'dur (hatırlarsanız ilk kez 5. Bölümde karşılaştığımız bir ifadeydi) ve bundan sonrasında da bu ismi kullanacağız.

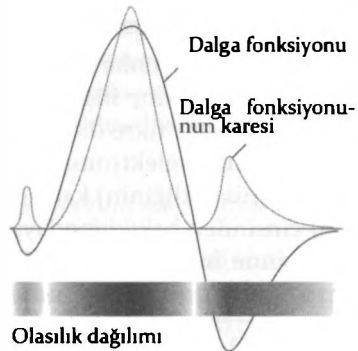
Dalga fonksiyonları anlamsız matematik formüller değildir: Fiziksel önemlerine ilişkin şu anki yorum Max Born tarafından ileri sürülen bir fikre dayanır. Born, klasik (dalga) açıdan ışığın yoğunluğunun elektromanyetik dalganın genliğinin (sıfırın üstündeki yüksekliğinin) karesiyle orantılı olduğuna, kuantum (foton) cinsinden bakıldığında da yoğunluğun bir fotonun bir uzay bölgesinde bulunma olasılığıyla orantılı olduğuna dikkat çekmişti. Işığın genliği iki katına çıkarılırsa yoğunluğu dört katına

11 Kayıtlara geçsin diye verelim; potansiyel enerjisinin V olduğu bir bölgede hareket eden m kütlesinde bir parçacığın (birkaç π katı oynamayla) Schrödinger denklemi şöyledir: $\hbar^2 \psi'' / m = (V - E)\psi$; buradaki E parçacığın enerjisi, ψ bulmaya çalıştığımız dalga fonksiyonu ve ψ'' onun bükülmesidir.

çıkar (ışın dört kat daha parlaktır) ve belirli bir bölgede bir foton bulma olasılığımız dört kat artar. Hemen ardından da, bu bağıntıyı dalga boylarını kapsayacak şekilde genişletmenin mümkün olduğunu ve *bir parçacığın herhangi bir noktadaki dalga fonksiyonunun karesinin parçacığın-orada bulunma olasılığını verdiğini* ileri sürmüştür. Dolayısıyla bir dalga fonksiyonu eğer bir yerde diğerine göre iki kat genliğe sahipse, bu durumda parçacığı bu ilk yerde bulma olasılığı ikincisinden dört kat büyüktür. Bu nedenle dalga fonksiyonunun karesinin büyük olduğu yerlerde parçacığın bulunma olasılığının yüksek olduğu, küçük olduğu yerlerdeyse parçacığın bulunma olasılığının düşük olduğu sonucuna varabiliriz (Şekil 7.4). Bu yoruma göre bir dalga fonksiyonunun eksi değer taşıdığı bölgelerin (su dalgasında buralar çukura karşılık gelir) artı olduğu bölgelerle aynı öneme sahip olduğuna da dikkat etmeliyiz, çünkü dalga fonksiyonunun karesini aldığımızda negatif bölgeler de pozitif olmaktadır.

Born'un yorumuna karşın dalga fonksiyonu sizlere tanımlanması biraz zor bir kavram gibi gözüküyor olabilir. Önümüzdeki

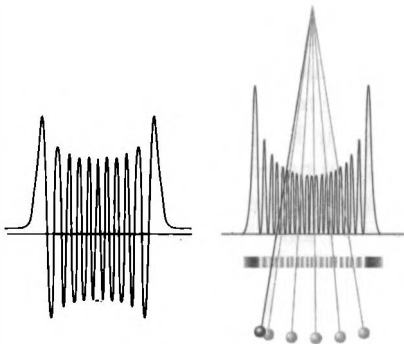
Şekil 7.4 Born'un dalga fonksiyonu yorumu. Kesiksiz çizgi rasgele bir dalga fonksiyonudur: Birkaç noktada sıfırdan geçtiğine (bunlara düğüm denmektedir) ve artı ve eksi genlik bölgelerine sahip olduğuna dikkat edin. Dalga fonksiyonunun karesini aldığımızda hiçbir yerde negatif olmayan fakat dalga fonksiyonu sıfırlandığında sıfırlanan kesikli çizgiyi elde ederiz. Born yorumuna göre bu eğri bize parçacığın uzayın herhangi bir noktasında bulunma olasılığını verir. Bu yorumu eklediğimiz çubuktaki gölgelenme yoğunluğuyla gösterdik.



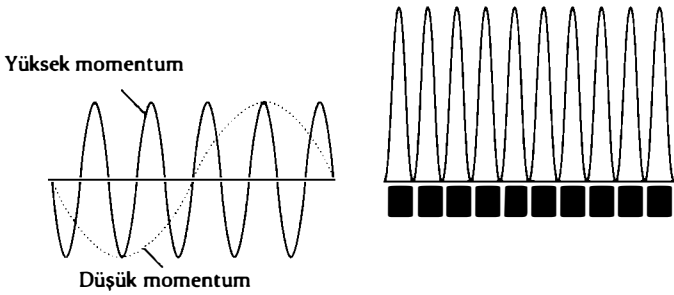
birkaç paragrafta bunların neye benzediğine ilişkin bir fikir vermeye çalışacağım. Sizlerden ikinci dereceden bir kısmi diferansiyel denklemin çözülmesi ne demektir hiç görmemiş ve en ufak bir fikri olmayanlar için de kafanızda Schrödinger denklemini nasıl çözebileceğinizi göstereceğim.

Genel anlamda konuşursak Schrödinger denklemi bir dalga fonksiyonunun bükülmesini gösteren bir denklemdir: Bize dalga fonksiyonun nerede keskin şekilde eğrisel, nerede hafif eğrisel olduğunu söyler. Bükülmenin en keskin olduğu yerler parçacığın hareket enerjisinin büyük olduğu yerlerdir, en az olduğu yerler de hareket enerjisinin düşük olduğu yerlerdir. Örneğin bir sarkacın ucundaki ağırlığın dalga fonksiyonu Şekil 7.5'tekine benzer bir şeydir: Ağırlık sallanmasının orta noktasında en hızlı hareket eder ve yön değiştirdiği yer olan dönüş noktalarında, en uçlarda en yavaş hareket eder; orta noktalara yaklaştığında dalga fonksiyonun daha keskin eğriler çizdiğini görüyoruz. Dalga fonksiyonunun en yüksek genliklerinin de dönüm noktalarında olduğuna dikkat edin; bu durum sarkacın aşına olduğumuz hareketiyle uyumludur, çünkü en yavaş hareket ettiği yerde bulunma olasılığı çok yüksektir ve bu da tam yön değiştirmek üzere olduğu sırada, sallanmasının son noktalarında gerçekleşir.

Şimdi de diğer tipik dalga fonksiyonlarının nasıl görüldüğüne bakalım. Serbest bir parçacığın dalga fonksiyonu çok basittir. Düşündüğümüz parçacığın uzun bir yatay telde kayabilen bir



Şekil 7.5 Tipik bir dalga fonksiyonu (soldaki). Bu dalga fonksiyonu, küçük bir enerji miktarıyla sallanmakta olan bir sarkaca aittir. Dalga fonksiyonunun karesi (solda gösterilmektedir) sallanan sarkacın farklı yerlerde bulunma olasılığını vermektedir. Bu yorumu da aşağıya eklediğimiz çubuk grafikteki gölgelenme yoğunluğuyla gösterdik.



Şekil 7.6 Soldaki çizim her iki uçta durarak uzun bir yatay telde kayabilen bir boncuk için, soldaki düşük momentuma, diğeri yüksek momentuma karşılık gelen iki dalga fonksiyonunu göstermektedir. Sağdaki çizimse daha hızlı hareket eden parçacığın teldeki noktalarda bulunma olasılığını göstermektedir.

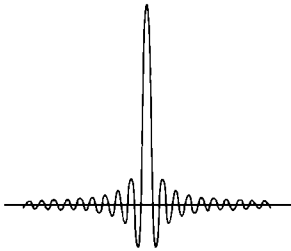
boncuk olduğunu varsayalım. Boncuğun potansiyel enerjisi konumundan bağımsız olarak hep aynıdır, dolayısıyla dalga fonksiyonunun belirli bir bölgeyi tercih etmeyeceğini düşünebiliriz. Yavaş bir parçacık düşük hareket enerjisine sahiptir, dolayısıyla dalga fonksiyonu az bir bükülmeye sahiptir (Şekil 7.6); başka bir deyişle yavaş hareket eden bir parçacığın dalga fonksiyonu, tam da de Broglie bağıntısının bize söylediği gibi uzun dalga-boylu düzgün bir dalgadır. Hızlı bir parçacığın (yüksek hareket enerjisiyle) çok fazla bükülmeye sahip bir dalga fonksiyonu olur, dolayısıyla kısa mesafede birçok kez aşağı ve yukarıya doğru bükümlenir ve bu yüzden çok kısa dalga boylu bir düzgün dalgadır. Bu da de Broglie bağıntısının öngörülerindendir.

Parçacığı nerelerde bulmamız daha olası? Boncuğun tel üzerinde her iki uçtaki son noktalar arasında gidip gelerek ilerlediğini ve rasgele kontrol ettiğimizi düşünelim. Boncuk sabit hızda hareket ettiği için klasik fiziğe göre teldeki herhangi bir noktada bulunma olasılığı diğerleriyle eşittir. Kuantum mekaniğiyle farklı bir tahminde bulunur. Boncuğun nerede bulunacağını tahmin etmek için Born'un ileri sürdüğü fikirden faydalanırız: Her bir konum için dalga fonksiyonunun karesini hesaplarız ve çıkan sonucu parçacığın o konumda bulunma olasılığı yorumlarız. Çizimden de görebileceğiniz gibi parçacığın tel üzerinde eşit me-

safelerdeki bir dizi bölgede bulunması en olasıdır ve tam olarak tekdüze şekilde dağılmaz.

Şimdi serbest bir parçacığın dalga fonksiyonunun belirsizlik ilkesine, yani momentumu biliyorsak konumu bilemeyeşimiz ya da tersinin de geçerli olduğu söz konusu ilkeye nasıl uyduğunu görelim. Çizimde gösterilenlere benzer dalga fonksiyonları telin uzunluğu boyunca yayılmış durumdadır, dolayısıyla parçacığın nerede bulunacağını tahmin edemeyiz: Telde herhangi bir yerde olabilir. Öte yandan momentumu tam olarak biliyoruz, çünkü dalga kesin bir dalga boyuna sahiptir. Bu yüzden belirsizlik ilkesinin gerektirdiği üzere momentumu tam olarak biliyoruz ama konum hakkında hiçbir şey söyleyemiyoruz. Aslında dalga boyu sayesinde sadece doğrusal momentumun *büyükliğini* biliyoruz: Parçacığın sağa mı sola mı hareket ettiğini bilmiyoruz. Fakat parçacık tel üzerinde tamamen düzgün şekilde dağılmamış olduğu için nerede olduğu konusunda tamamen belirsizlikte değiliz, dolayısıyla momentum (yönü) hakkında biraz bilgisiz olmamız nerede olduğu (daha doğrusu nerede olmadığı) konusunda biraz bilgi sahibi olmamız olasılığını doğurmuş durumda. Şeylerin nerede olduğu ile ne kadar hızlı hareket ettikleri arasındaki ilişkinin inceliğini görmeye başladığınızı umuyorum.

Şimdi parçacığın aslında telin belirli bir bölgesinde olduğunu bir şekilde bildiğimizi varsayalım. Dalga fonksiyonu parçacığın olma ihtimalinin en yüksek olduğu yerde güçlü tepe olmasıyla biraz Şekil 7.7'deki gibi gözükecektir. Bu parçacığın momentumunu belirlemek isteseydik dalga fonksiyonunun



Şekil 7.7 Bir önceki çizimdekiler gibi fakat farklı dalgaboyları olan otuz dalga fonksiyonunun üst üste birleştirilmesiyle oluşturulan bir dalga paketi. Parçacığın oldukça iyi tanımlı bir uzay bölgesinde bulunması muhtemelse de, sahip olduğu otuz doğrusal momentum değeri hakkında hiçbir şey söyleyemeyiz. İleride bu dalga paketinin klasik bir parçacığa benzer tarzda hareket ettiğini göreceğiz.

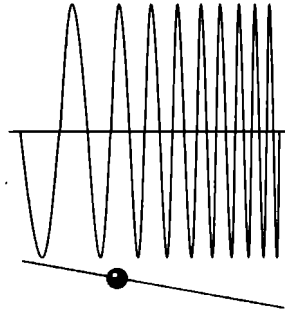
dalga boyunu belirlememiz gerekecekti. Ama güçlü tepelere sahip bir dalga fonksiyonu uzatılmış bir dalga olmadığı için, sesteki bir vuruşun (darbe) kesin bir dalga boyunun olmamasıyla aynı şekilde, kesin bir dalga boyuna sahip değildir. Bu, parçacığın momentumu hakkında ne anlama gelmektedir?

Çizimde görülen tepeli dalga fonksiyonunu, her biri belirli bir doğrusal momentuma karşılık gelen kesin fakat farklı dalga boylarına sahip çok sayıda dalganın birlikte toplanması (teknik olarak *üst üste binme* terimi kullanılmaktadır) yoluyla oluşmuş olarak düşünebiliriz. Çizimde de görüldüğü gibi bu dalgalar, tepe ve çukurlarının çakıştığı diğer her yerin birbirini götürdüğü ve hepsinin tepesinin çakıştığı yerde asıl dalga fonksiyonunun tepesini oluşturacak şekilde toplanmaktadır. Dalga fonksiyonlarının bu şekilde üst üste binmesine *dalga paketi* denmektedir. Çizimdeki gibi bir dalga fonksiyonuna sahip bir parçacığın momentum değerini sorduğumuzda, yanıtımız dalga paketini oluşturmak için kullanılan dalga boylarının temsil ettiği değerlerden *herhangi biri* olmalıdır. Dolayısıyla bizim kısmen yerelleşmiş parçacığımız belirsizlik ilkesinin de gerektirdiği üzere kesin olmayan bir momentuma sahiptir.

Bir parçacığın herhangi bir anda tam olarak nerede olduğunu bilseydik, dalga fonksiyonu, parçacığın bulunduğu yer hariç her yerde sıfır genliğe sahip son derece sivri uçlu bir tepeye sahip olurdu. Bu tip bir sivri uç da dalga paketidir, fakat bulunan yerin sonsuz keskinliğe ulaşması için farklı dalga boylarında, dolayısıyla momentumlarda sonsuza sayıda dalgayı üst üste bindirmemiz gerekir. Burada tam da belirsizlik ilkesinin bize söylediği biçimde bir parçacığın nerede olduğunu tam olarak bilmenin momentumunu söyleme olasılığımızı ortadan kaldırdığı sonucuna varıyoruz. Belirsizlik ilkesi kaybolmanın kuantum versiyonudur: Ya nerede olduğunuzu bilir ama nereye gittiğinizi bilmezsiniz ya da nereye gittiğinizi bilir ama nerede olduğunuzu bilmezsiniz.

Dalga paketi kavramı klasik parçacıkların bazı özelliklerini taşıdığı için bizim kuantum mekaniği ile klasik mekaniğin rahat aşinalığı arasında köprü kurmamıza yardım eder. Bağlantıyı görmek için bu kez yatay değil de soldan sağa doğru eğimi düşen bir

Şekil 7.8 Yatay açısı sağa doğru ilerledikçe düşük bir potansiyel enerjiye sahip olacak tarzda tutulmuş bir tel üzerindeki boncuğun dalga fonksiyonunun genel biçimi. Sağa doğru ilerledikçe dalga boyunun kısaldığına ve bunun klasik olarak parçacığın telden aşağı kaydıkça kinetik enerjisinin artmasına karşılık geldiğine dikkat edin.

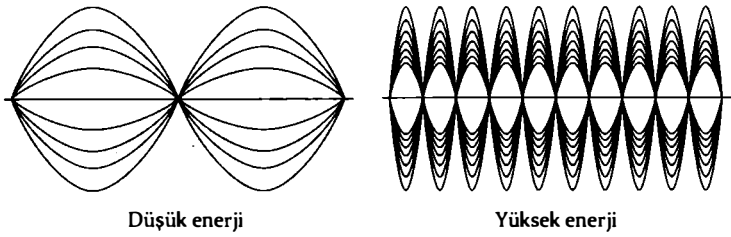


telin üzerinde yer alan bir boncuğu düşünelim. Klasik yaklaşımda boncuğun giderek daha hızlı ilerleyerek telden aşağı kaymasını bekleriz. Kuantum mekaniğinde ne olur?

İlk olarak boncuğun dalga fonksiyonunu formüle etmemiz gerekir; bunu yapmak için Schrödinger denkleminin bükülme hakkında söylediklerine dair bilgimizi kullanabiliriz. Boncuğun enerjisi sabit olduğu için (enerji korunumludur, 3. Bölüm), ama potansiyel enerjisi soldan sağa doğru düştüğü için, hareket enerjisi telde soldan sağa doğru artar. Hareket enerjisinin artması bükülmenin artmasına karşılık gelir. Dalganın soldan sağa doğru kısalan bir dalga boyuna sahip olacağını düşünebiliriz. Mükemmel şekilde tanımlanmış toplam enerjili bir parçacıkta böylesi bir dalga fonksiyonu Şekil 7.8'tekine benzer bir görünüm kazanacaktır.

Şimdi de dalga fonksiyonunun zamanla bağlantılı değişimine geelim. Bu kez dalga fonksiyonunun parçacığın toplam enerjisiyle orantılı bir frekansta salındığını aklımızda bulundurmamız gerekir. Yavaş hareket eden (düşük enerjili) parçacığın dalga fonksiyonunu yavaş salınım yapar şekilde, hızlı hareket eden (yüksek enerjili) parçacığın dalga fonksiyonunu da hızla salınımda bulunur şekilde düşünebiliriz (Şekil 7.9).¹² Şekil

¹² Dalga fonksiyonu zaman içerisinde salınım yaptıkça parçacığın kaybolup yeniden belirmesi sizi şaşırtabilir. Konuyu biraz sadeleştirdim. Aslında dalga fonksiyonunun yaptığı gerçek bir değerden sanal bir değere, sonra yeniden bir gerçek değere salınmaktadır, böylece karesi aynı kalır. Burada ayrıntıların doğuracağı bir kafa karışıklığından kaçınmak istedim.

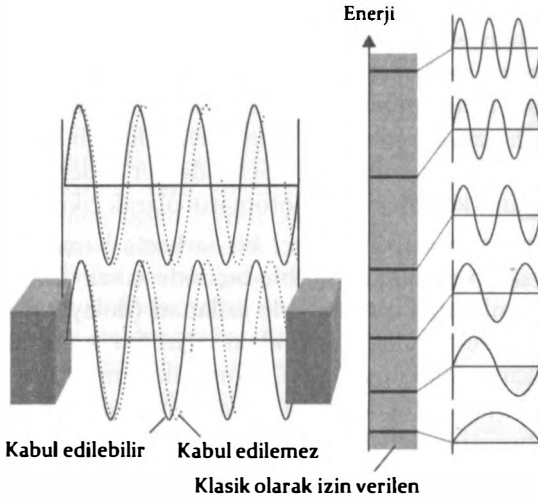


Şekil 7.9 Dalga fonksiyonlarının zaman bağımlılığının temsili gösterimi.

Dalga fonksiyonları zaman içerisinde enerjilerine bağlı bir hızda salınırlar. Şekil 7.6'daki dalga fonksiyonlarının nasıl bir salınım göstereceğini öngörmeye çalıştık: Yüksek hareket enerjili dalga fonksiyonu (sağda) düşük hareket enerjili dalga fonksiyonundan (solda) daha hızlı salınım gösterir.

7.8'deki dalga fonksiyonu da tam olarak aynı biçimde hareket eder ve enerjisi tarafından belirlenen bir hızda salınım yapar.

Son olarak boncuğun enerjisini tam olarak bilmediğimizi varsayalım (teli tuttuğumuz ellerimiz titriyor olabilir; hava molekülleri boncuğu sallıyor olabilir). Bu durumda dalga fonksiyonu çizdiğimiz kadar saf olmak yerine hafif farklı şekillerdeki benzer dalga fonksiyonlarının çok büyük sayıdaki örneğinin toplamı olacaktır. Sonuçta ortaya çıkan üst üste binme Şekil 7.7'de gösterilen gibi bir dalga paketidir. Dalga fonksiyonlarının her biri az önce gördüğümüz üzere zaman içerisinde olduğu gibi uzay içerisinde de salınım yapar, dolayısıyla toplandıklarında ortaya çıkan şekil değişir, çünkü bir anda tepeler toplanarak bir yerde birleşirken, sonra bir tepe bir çukura rastlayınca dalga paketi farklı bir şekil alır. Toplamı incelerken dalga paketine neden olan yapıcı girişimin soldan sağa doğru hareket ettiğini fark ederiz. Dalgaların en kısa dalga boylarına sahip olduğu yerde, sağ tarafta da hız kazanır. Bu boncuğun aynı klasik fizikte gördüğümüz şekilde soldan sağa doğru hızlanması anlamına gelir. Dolayısıyla gündelik hayatınızdaki cisimlerin aşına olduğunuz hareketi yaparken (toplari zıplarken, uçakları uçarken, insanları yürürken) izlediğinizde, bir dalga paketi izlediğinizi ve görünen yüzeyin altına baktığınızda burada dalgaların üst üste binmesinin söz konusu olduğunu aklınızın bir köşesinde tutun.



Şekil 7.10 Bir parçacık belirli bir uzay bölgesine hapsedildiğinde sadece muhafazanın içine uyan dalga fonksiyonlarına ve onlara karşılık gelen enerjilere izin verilir. Solda iki dalga fonksiyonunun perspektiften ve doğrudan görünümünü görüyoruz: Biri muhafazaya uyuyor ve izin verilmiş, diğeri (noktalı) uymuyor ve izin verilmemiş. Sağda enerji üzerindeki etkisini görüyoruz: Gri çubuk klasik olarak izin verilen enerjileri gösteriyor, yatay çizgiler ise ilk altı kuantize, izin verilen enerji düzeyini gösteriyor. En sağda da karşılık gelen dalga fonksiyonları gösteriliyor.

Kuantum mekaniği klasik mekanikten çarpıcı biçimde farklı bir dizi öngöründe bulunur; sıra bu farkları ele almaya geldi. Yata teli kısa olduğunu, boncuğun da sayı boncuklarında olduğu gibi iki ucundaki kısaçaklar nedeniyle sadece birkaç santimetrelik bir hareket alanına sahip olduğunu varsayalım. Nasıl gergin bir keman telinde izin verilen titreşimler sadece perdeler arasına uyan dalgalarsa, aynı şekilde burada da önemli özellik *yalnızca iki uç arasına uyan dalga fonksiyonlarına izin veriliyor* olmasıdır. Dalga fonksiyonunun bükülmesi boncuğun hareket enerjisini ve bu sayede toplam enerjisini belirlediği için (potansiyel enerji sabit olduğu için), bu düzenlemede boncuğun yalnızca belli enerjilere sahip olabileceği sonucuna varıyoruz. Başka bir deyiş-

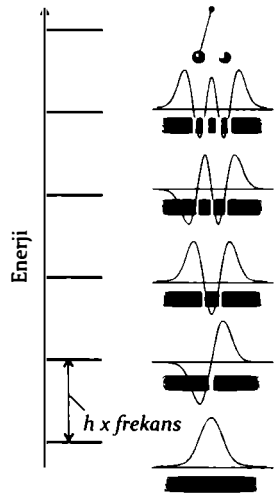
le boncuğun enerjisi *kuantizedir*, yani sürekli değişmeyen, ayrık değerlere hapsedilmiştir (Şekil 7.10). Bu genel bir sonuçtur: İlk olarak Planck ve Einstein'ın ileri sürdüğü *enerji kuantizasyonu*, *Schrödinger denkleminin ve dalga fonksiyonunun parçacığın gezinebileceği uzaya tam olarak uyma gerekliliğinin bir sonucudur*. Bu sayede enerji kuantizasyonu Schrödinger'in denkleminde ve sistemin "sınır koşullarından" otomatik olarak çıkmaktadır.

Kuantizasyon (nicemlenme) bir sarkaçta karşımıza sıra dışı bir yöne sahip olarak ilginç bir biçimde çıkar. İlk olarak tam olarak tanımlanmış bir enerjiyle sallanan (dolayısıyla kesin bir kuantum durumundaki) ucundaki ağırlığın bulunduğu yerin dalga fonksiyonunu düşünelim. Ağırlık iki tarafa sallanırken potansiyel enerji artar, dolayısıyla toplam enerjiyi sabit tutmak için hareket enerjisi düşer ve klasik olarak dalga fonksiyonlarının en büyük genliğe ağırlığın en uzun oyalandığı yer olan sallanmanın uçlarında sahip olmasını bekleyebiliriz. Daha önce böyle bir dalga fonksiyonu görmüştük (Şekil 7.5'te). Uçları kapatılmış teldeki boncukta da görüldüğü gibi izin verilen dalga fonksiyonları yalnızca, bir dönüm noktasından diğerine sallanmanın izin verdiği değerler aralığına uyanlardır. Muhtemel dalga fonksiyonlarından sadece bazıları uygun şekilde davrandığı ve her dalga fonksiyonu farklı bir enerjiye karşılık geldiği için, buradan yalnızca bazı enerjilere izin verildiği sonucu çıkar. İşte bu izin verilen enerjilerin belirli "basamaklarla" birbirinden ayrılan tek biçimli bir değerler merdiveni oluşturduğu ortaya çıkmıştır. Bunu $h \times \text{frekans}$ şeklinde yazabiliyoruz; buradaki h Planck sabitidir, *frekans* ise (birazdan daha fazla açacağız) sarkacın uzunluğunun karesiyle ters orantılı bir parametredir. Yer yüzeyinden 1 m yüksekte bir sarkaç için *frekans* 0,5 Hz olarak hesaplandığında izin verilen enerji düzeyleri arasındaki ayrılık eksiksiz şekilde saptanamayacak kadar küçüktür: bir joule'un 300 trilyon trilyonda biri (3×10^{-34} J), ama işte oradadır ve vardır.¹³ Şekil 7.11'de bu enerjilerden ve onlara karşılık gelen dalga fonksiyonlarından bazıları gösterilmektedir.

Şimdi hayret verici bir özellik görmek üzereyiz. Ağırlığı çekip sallanmaya bıraktığımızı varsayalım. Belki hava moleküllerinden

13 Bir sarkaçta *frekans* = $\frac{1}{2\pi} \sqrt{(g/\text{uzunluk})}$ 'tur; buradaki g serbest düşme ivmesidir (Dünya'da deniz yüzeyinde $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ 'dir).

Şekil 7.11 Bir sarkaçtaki ilk birkaç enerji düzeyi ve bunlara karşılık gelen dalga fonksiyonları. Enerji düzeylerinin eşit aralıklara sahip olduğuna dikkat edin. Ayrıca en düşük enerjili dalga fonksiyonlarının yüksek enerjili dalga fonksiyonlarının şekli konusunda öngördüklerimize (Şekil 7.5'teki gibi) benzemediğine de dikkat edelim, çünkü sarkacın dönüm noktalarında değil, yataydan sıfır uzaklığa yakın yerlerde bulunması muhtemeldir. Klasik fikirleri düşüncelerimize rehberlik amacıyla sadece yüksek enerjilerde kullanabiliriz.



belki de desteğindeki pürüzlerden dolayı değişik enerjilerde salınacaktır. Bu nedenle dalga fonksiyonu çizimde gösterilenlere benzer çok sayıda fonksiyonun üst üste binmesiyle oluşan bir dalga paketi olacaktır. Bu dalga paketi aynı klasik bir sarkaç gibi hafifçe dalgalanırken sarkaç dikeyken en hızlı, sallanmasının uçlarında en yavaş harekete sahip olacaktır. Dahası, ki olağanüstü nokta bu, sallanmanın frekansı (ağırlığın bir uçtan diğerine sallandığı hız) kuantize enerji düzeylerinin ayrılığı için ifadede görülen *frekans* parametresine tam olarak eşittir. Dolayısıyla bir sarkacın sallanmasına baktığınızda sadece bir dalga paketinin hareketini görmekle kalmıyorsunuz, aynı zamanda onun frekansından son derece yakın aralıklı enerji düzeylerinin doğrudan bir portresini de görüyorsunuz. Başka bir deyişle doğrudan kuantizasyonu izliyorsunuz. Bir sarkaç kuantize enerji düzeylerinin ayrılığı için güçlü bir yükselticidir ve 1 metrelik bir sarkacın ileri geri sallandığını izlerken aslında 300 trilyon trilyon trilyon- da bir joule'lük bir enerji ayrılığını gözlemliyorsunuz. Bence bu harika bir şeydir.

Bu tartışmadan çıkarılacak ana fikir, kuantizasyonun Schrödinger denkleminin doğal olarak doğması ve klasik davranışın, kesin kuantum düzeyi bilinmez olduğunda ve bir dalga paketi oluşturmamız gerektiğinde ortaya çıkmasıdır.

Konuya girerken araya kuantum mekaniğinin yorumlanışında merkezi öneme sahip bir sözcüğü, *olasılık* sözcüğünü sıkıştırmıştım. Bölümün geri kalanında bu kaçamak sözcüğün bize işaret ettikleri üzerinden ilerleyeceğiz, zira evreni düşünme biçimimiz açısından bu sözün çok büyük bir önemi var. Aslında şu ana kadar yürüttüğümüz tartışmanın bazı yönlerine geri dönmek ve bunlardan bazı felsefi konularda çıkarım yapmak istiyorum. “Epistemolojik ve ontolojik konular”, yani bilginin doğası ve gerçekliğin temelleriyle bağlantılı konular yazacaktım ama tereddüt ettim. Böyle oldukları ortaya çıkacak ama ben bir felsefeci değilim ve işaret ettiğim noktaların felsefi açıdan teknik nitelik taşıdığı şeklinde bir savım varmış gibi bir izlenim yaratmak istemiyorum. Bu yüzden “konu” şeklinde yazıp bırakmaya karar verdim.

Bir başka açıklama daha yapmak isterim. Bu bölümde şu ana kadar ele aldığımız konular, aslında kuantum mekaniğinde kullanılmak isteyeceğiniz şeyler için yeterli. Teknik ve matematik ayrıntılara girmedim elbette ama şu ana kadar ele aldığımız her şey oldukça açık ve üzerinde tartışma olmayan konulardır. ABD ekonomisinin yüzde 30’unun kuantum mekaniğine dayanıyor olması bu bilgilerin kullanılmasının ve bundan sonraki bilgilere gözlerin kapanmasının bir sonucudur. Kuantum mekaniği tüm bunların ne anlama geldiğini sorduğumuzda felsefi olarak ilginç hale gelmektedir. Bölümün kalanında ele alacağımız konu budur. Okumayı burada bırakırsanız kuantum mekaniğinin ana ilkelerini biliyor ve ilkesel anlamda herhangi bir hesaplama için kullanabiliyor olacaksınız; eğer devam ederseniz bunun hesaplama becerinize bir katkısı olmayacak ama konuyu insanların neden bu kadar kafa karıştırıcı bulduğunu anlayacaksınız.

İlk olarak belirsizlik ilkesini ele alacak ve bu bölümün başlığını anlamlandırmaya çalışacağım: Anlamanın basitleşmesi. Çok sayıda kişi (bunlar arasında kuramın kurucuları da yer alıyor) belirsizlik ilkesinin, bir parçacığın konum ve momentumunu eşanlı olarak bilemediğimiz için onun durumunun ancak eksik bilgisine sahip olabildiğimiz düşüncesiyle, evren kavrayışımızı sınırlandırdığını düşünmektedir. Karamsar bulduğum bu görüş

kültürel şartlanmamızın bir sonucudur. Klasik fiziğe maruz kalarak ve çevremizdeki gündelik dünyaya aşinalıkla hepimiz evrendeki şeylerin tam bir betimlemesine ancak konum ve momentumun her ikisiyle birden ulaşılabilceğine inanarak yetiştirildik. Buna göre havadaki bir topun izlediği yolu betimlemek için (ya da ne zaman vuracağımızı önceden hesaplamak için) onun her bir andaki konum ve momentumunu değerlendirmek durumundaydık. Kuantum mekaniğinin ve özellikle de belirsizlik ilkesinin ispatladığı şudur ki bu tür bir beklenti, her iki öznitelik cinsinden bir betimleme *fazla tamdır*. Dünya böyle değildir. Kuantum mekaniği bize seçmek durumunda olduğumuzu söyler. Evreni parçacıkların konumları cinsinden tartışmak ile parçacıkların momentumları cinsinden tartışmak arasında bir seçim yapmak durumundayız. Başka bir ifadeyle ya sadece topun konumu üzerine konuşacağız ya da sadece momentumu üzerine konuşacağız. Bu açıdan belirsizlik ilkesi evren betimlememiz açısından büyük bir basitleştirme sağlar, çünkü klasik beklentimizin yanlış olduğunu gösterir: Evren klasik fiziğin ve gündelik aşinalığımızın işaret ettiği resim gibi değildir.

Buradan biraz daha ilerleyelim. Belirsizlik ilkesi evreni tartışmak için iki dilin var olduğuna işaret etmektedir: Konum dili ve momentum dili. Her iki dili aynı anda (klasik fiziğin yaptığı gibi ve onun ilkelerinin şartlandığı kişilerin halen yapmaya uğraştığı gibi) kullanmaya çalışırsak, tıpkı İngilizce ile Japonca'yı aynı cümlede kullandığımızda olacağı gibi felaket bir karmaşaya düşmek kaçınılmaz olur. Heisenberg'in kendisi de şuna dikkat çekmiş: "Geleceği öngörmek için bugünü bilmemiz gerekir ifadesinde öncüller yanlıştır." Fakat yanlış olan, hatalı olan kendisiydi. Belirsizlik ilkesinin doğru yorumlanması, onun klasik fiziğin müsaade edilemez ve yanıltıcı şekilde fazla tam bir şimdiki zaman bilgisi peşinde koştuğunu açığa çıkarmasıdır: Şimdiki zamanın tam bilgisi olarak momentumlar *tek başına* yeterlidir ya da konumlar *tek başına* yeterlidir.

Belirsizlik ilkesinin bu yorumu, Niels Bohr'un 1927'de muhtemelen William James'in *The principles of psychology* [Psikolojinin İlkeleri] çalışmasından alıp sonradan *Contraria sunt complementa* [zıtlar tamamlayıcıdır] düsturuyla benimsediği felsefi

duruş olan *tamamlayıcılık ilkesiyle* uyumludur. Bohr'un yazdığı birçok şey gibi bu ilke de pek açık değildir, ama genel olarak ifade edersek evrene bakmanın alternatif yolları olduğunu, bizim bunların içerisinde bir betimlemeyi seçmek zorunda olduğumuzu ve betimlemeleri karıştırmamamız gerektiğini söyler. Bohr devamında bu ilkeyi görelilik ilkesinin alakasız edebi uygulamalarda kullanılıp yozlaştırılmasıyla hemen hemen aynı biçimde edebiyat ve sosyolojiye uyarlamaya geçer ama biz burada biraz daha güvenilir olan kuantum kuramıyla ilişkisinden fazla ayrılma niyetinde değiliz.

Bohr'un ilkesi kuantum mekaniğinin *Kopenhag yorumunun* merkezi bir bileşenidir. Kopenhag yorumu, Born'un olasılıkçı dalga fonksiyonu yorumu, tamamlayıcılık ilkesinin belirsizlik ilkesi tarafından niceliksel olarak ifade edildiği kabulü ve (en önemlisi) sadece klasik ilkelerle işleyen aletlerin kullanılmasıyla yapılmış ölçümlerin sonuçlarının gerçekliğin unsurları olduğu "pozitivist" bir doğa anlayışı etrafında inşa edilmiş bir tutumlar ağıdır. Ölçüm doğaya açılan tek penceremizdir ve bu pencereden algılanmayan her şey mutlak metafizik spekülasyondur ve gerçek olarak değerlendirilmeye değmez. Bu nedenle eğer laboratuvar aletleriniz bir "parçacığın" dalga özelliğini sorgulamak için (örneğin bir elektronunun kırınımını kanıtlama amacıyla) ayarlanmışsa, bu durumda sizin dalga terimleriyle konuşmanız yerindedir. Öte yandan aygıtlarınız bir "parçacığın" parçacıklı özelliklerini sorgulamak üzere (örneğin bir elektronunun fotoğrafik bir levhanın üzerindeki vardığı yeri tespit etmek amacıyla) ayarlanmışsa, bu durumda sizin parçacık dilini kullanmanız uygun olur. Hiçbir alet eşanlı olarak hem dalga hem parçacık özelliklerinin görülmesini sağlayamaz, çünkü bu nitelikler tamamlayıcıdır. Bu esasen Heisenberg'in görüşüydü, çünkü o kuantum mekaniğini yalnızca farklı deneysel gözlemleri ilişkilendirmenin bir yolu olarak değerlendiriyor, altta yatan gerçeklikle ilgili herhangi bir şeyi ortaya çıkardığını düşünmüyordu: Onun için ve diğer sofu Kopenhag Kilisesi müdavimleri için gözlemin sonucu tek gerçeklikti.

Kopenhag yorumunun bizim yoğunlaşacağımız yönü ölçüm eylemidir. Ölçüm kuantum mekaniği yorumunda merkezi önem

taşıyan fikirlerden biri ve kuramın bütün yönleri içerisinde (sadece pozitivist eğilim taşıyanlar için de değil) en fazla makale, muamma ve tasa yaratıyordu. Kopenhag yorumu açısından bu kadar kritik bir öneme sahip olmasının nedeni, yorumun ölçüm aletinin gerçekliği aydınlatmada üstlendiği rol konusunda ısrarcı olmasıdır. Fakat kuantum mekaniğine hangi yorum giydirilirse giydirilsin onun öngörülerinin gözlemle yüzleşmesi gereken bir nokta karşımıza er veya geç çıkacaktır, dolayısıyla öngörü ile gözlem arasındaki ilişkinin anlaşılması büyük bir önem taşımaktadır.

Bu noktada kuantum mekaniğinin belki de en zor ama en önemli yönüne gelmiş bulunmaktayız. Tartışmanın özünü kaybetmeden konuları olabildiğince basitleştirmeye çalıştım. Görüşlerin incelikleri konusunda hassas davranarak mümkün olduğunca anlaşılır olması için de elimden geleni yaptım. Bundan sonrası zorlaşırsa bir sonraki bölüme atlamakta da hiçbir tereddütünüz olmasın, zira şimdi söyleyeceklerim bundan sonraki bölümlere dayanak taşımayacaktır.

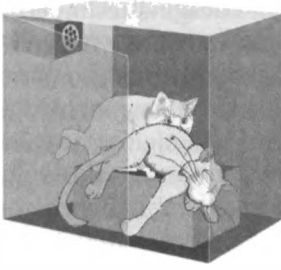
En geniş şekilde ifade edersek, ölçüm eylemi bir kuantum mekanik özelliğin bir makroskopik (büyük ölçekli) aletin çıktısı şeklinde resmedilmesidir. Bu çıktıya “gösterge kaydı” denmektedir ama kavram büyük ölçekli herhangi bir sistemin çıktısı anlamında anlaşılabilir; bu bir gözetleme ekranında çıkan sayı, bir kâğıttaki işaret, kulağımızda duyduğumuz bir çıt sesi, hatta bir kutunun içerisinde ölü bir kedi bulmak da olabilir. Kopenhag yorumu, bir ölçüm aletinin kuantum dünyasını biz devlerin bağlantı kurabileceği nicelikler cinsinden betimlemek zorunda olduğu için klasik şekilde davrandığı konusunda ısrarcıdır. Kopenhag yorumu yıllarca, özellikle de Bohr’un üstlendiği etkili rol sayesinde hâkim olmasına karşın, hiçbir şekilde evrensel olarak benimsenmemiştir. Onun Aşıl topuğu onun bu ölçüm aletinin belirli bir tipi üzerindeki ısrarıdır. Alternatif düşünce ölçüm aletinin de kuantum ilkelerine göre eylemde bulunmasıdır; bunu daha sonra ele alacağız.

Elektron yoksa kırmızı ışık veren, bir elektron varsa yeşil ışığı yakan bir saptayıcımız olduğunu varsayalım. Elektronu daha

önce gördüğümüz gibi uzayda yayılan ve karesi üzerinden elektronun uzayda herhangi bir noktada bulunma olasılığını öğrendiğimiz bir dalga fonksiyonuyla tanımlıyoruz. Saptayıcımızı eğer elektronun olmasından şüphelendiğimiz bölgeye sokarsak, dalga fonksiyonunun büyük olduğu yerde yeşil ışık elde etmemiz, küçük olduğu yerde yeşil ışık elde etmemizden daha olasıdır ve dalga fonksiyonunun karesi bize yeşil ışık alma olasılığımızı (örneğin on denemede bir kere) söyleyecektir.

Saptayıcıyı devreye soktuğumuzda eğer yeşil ışık yanarsa, bu durumda parçacığın o noktada olduğunu *kesin olarak* bileceğiz. Bu saptama eyleminden hemen önce sadece elektronun orada olma olasılığını biliyorduk. Dolayısıyla bayağı gerçek anlamıyla dalga fonksiyonu çökerek yayılmış biçiminden saptayıcıda yeri belirlenen keskin bir tepeye dönüşmektedir. Dalga fonksiyonunda klasik bir alet kullanarak yapılan bu araştırmanın sonucunda yaşanan bu değişime *dalga fonksiyonunun çöküşü* denmektedir. Biz gözlemcilerin yaptığı her gözlemden dalga fonksiyonu gözlemlediğimiz gösterge kaydına karşılık gelen belirli bir yere çökmektedir. Dalga fonksiyonunun belirli bir noktada çökmesine neden olur gibi gözüken bu sisteme dahil oluş Kopenhag yorumunun temel kavramı ve zorluğu ve hesaplama ile gözlemlene arasındaki bağlantının temel ikilemidir. Bu aynı zamanda kuantum mekaniğinin *determinizmi* (belirlenimciliği), şimdiki zaman ile gelecek zaman arasındaki nedensel zinciri ortadan kaldırdığı görüşünün de kaynağıdır; zira bu görüşe göre kuantum mekaniği bağlamında ölçümü yapmadan önce dalga fonksiyonunun belirli bir noktada çöküp çökmeyeceğini öngörmenin, bize çökme olasılığını hesaplama izni vermesine karşın, bir yolu olmadığı iddia edilmektedir.

Bu noktada kuantum mekaniğindeki ölçüm problemi ve onun çözümü için taşıdıkları önem dolayısıyla üç teknik ayrıntıyı aktarmak istiyorum. Bunu artık klişeleşmiş olan *Schrödinger'in kedisi* problemini kullanarak yapalım. Bu kuantum kıssasında Schrödinger geçirimsiz bir kutuda radyoaktif bozunumla tetiklenen bir zehirlenme donanımıyla beraber hapsedilmiş bir kedi hayal eder. Radyoaktif bozunum rastlantısaldır, dolayısıyla belirlenen belli bir zaman aralığında bozunumun olması ile olmama-



Şekil 7.12 Schrödinger'in kedisi. Canlı bir kedi içerisinde ya kediye öldüren ya da hayatta bırakan alçakça bir alet olan geçirimsiz bir kutuya hapsedilir. Kutuyu açmadan önce kedi, ölü ve canlı durumlarının üst üste binme durumunda mıdır? Dalga fonksiyonu ne zaman iki durumdan birine çöker?

sı eşit ölçüde mümkündür. Bu durumda kuantum mekaniğine göre kedinin durumu canlı ve ölü durumların eşit bir karışımıdır (Şekil 7.12) ve şöyle yazabiliriz:¹⁴

$$\text{Kedinin durumu} = \text{canlı durum} + \text{ölü durum}$$

Bu toplama sonucu, dalga paketi inşa ederken dalga fonksiyonlarının üst üste binmesiyle benzeşmektedir, tek fark üst üste koyulan durumlar momentum durumları değil de, kedinin durumlarıdır. Dalga fonksiyonlarının yazımına girsek iş biraz daha karmaşık olurdu, ama bunu yapmamıza gerek yok.

Üst üste binme durumlarının betimlenişi kuantum mekaniğinde en başa bela durumlardan biridir, çünkü örneğimiz özelinde konuşursak bir sonraki gözlemde kedinin “Canlı!” ya da “Ölü!” olduğu sonucunu alıp almayacağımızın öngörülmesi için hiçbir mekanizma yok gibi gözüküyor. Kutuyu açar açmaz derhal kedinin canlı mı ölü mü olduğunu keşfediyoruz, dolayısıyla bir anlamda kedinin dalga fonksiyonu iki dalga fonksiyonundan birine çöküyor. Fakat kedinin dalga fonksiyonu hangi noktada çöküyor? Biz kutuyu açmadan önce mi? Kutuyu açarken mi? Bir saniyenin kesiri kadar sonra, zihnimiz kedinin canlı mı ölü mü olduğunu kaydederken mi? Kedi ölü olduğunu düşündüğünde mi? Kuantum mekaniğinin yaptığı tek şey bu durumların bulunma olasılıklarını öngörmeye yarayan kuralları belirlemektir. Bu nedenle determinizm fiziğin dışına atılmış gibi görünüyor,

¹⁴ Durumları bu şekilde ifade etmek naif gözükabilir ama kuantum mekaniği bize buna benzer ifadelerin nasıl ele alınacağını ve kesin, nice-liksele sonuçlara nasıl varılacağını söyleyen bir kurallar kümesi sağlıyor. Bu sembolik ifadelerin beylik görünüşleri sizi kolay aldatmasın.

kuantum mekaniğiye kendini tanrıların kucağına teslim etmiş gibi. Bu konu Einstein'da derin bir kaygı yaratıyordu ve kendisi bıktırarak ölçüde tekrarlanan “Tanrı zar atmaz” itirazıyla uyarıda bulunmuştu. Bohr nedenselliğin zaten klasik bir kavram olduğuna ve parçacığın bulunduğu yerin uzamsal betimlemesine (biraz muğlak ve kötü tanımlanmış bir ifadeyle) “tamamlayıcı” olduğuna dikkat çekerek eleştirel duruşundan vazgeçti. Yani Bohr’a göre ya klasik fiziği seçecek ve nedenselliğin sağlam avantajlarının keyfini sürecektir ya da kuantum mekaniğini seçecek ve bedelini nedensellikle ödeyecektir.

Şimdi Schrödinger kıssası üzerinde kedinin zehirlenmek yerine vurulduğu daha sert bir değişiklik yaparak başka bir fikri daha ele alabiliriz. Kedi ses yalıtımlı kutuya ilk kapatıldığında cihazın durumu *kedi × mermi silahta* olur.¹⁵ Mermi daha önceki aynı rastlantısal aletle ateşlenir, dolayısıyla merminin ateşlenmiş olması ile hâlâ silahın içinde olması eşit olasılıktadır. Bir aşamada sistemin durumu şu hale gelir:

$$\text{Sistemin durumu} = \text{kedi} \times \text{mermi silahta} + \text{kedi} \times \text{mermi havada}$$

Hemen ardından mermi kediye girerken (mermi havadaysa durum muhakkak bu olacaktır), dolayısıyla ölü bir kedi ürettiğinde ya da silahın içinde kalırken (bundan bir an önce durumu buysa), dolayısıyla canlı kedi korunduğunda sistem şu hale gelir:

$$\text{Sistemin durumu} = \text{canlı kedi} \times \text{mermi silahta} + \text{ölü kedi} \times \text{mermi kedide}$$

Bu kedi ve merminin durumlarının ayrılmaz şekilde dolaşık olduğu *dolanık durumun* bir örneğidir. Sistemin gerçek durumu buysa, sistemin iki durumu arasında çok acayip bazı girişim etkilerinin olmasını bekleyebiliriz. Bu betimlemenin yorumu nasıl yapılabilir? Merminin bulunduğu farklı yerler ile kedinin ölü ve

¹⁵ Bu çarpım (bir kediye bir mermiyle nasıl çarparsınız?) biraz garip görünebilir. Ama kuantum mekaniğinde bu çarpım işlemi iyi tanımlıdır ve gerçekten de kedinin dalga fonksiyonunu merminin dalga fonksiyonuyla çarpmamız gerektiği anlamına gelir. Daha formel bir yazımla çarpımı, ψ (psi) bir dalga fonksiyonu olmak üzere $\psi_{\text{kedi}} \psi_{\text{mermi}}$ olarak yazabiliriz.

canlı versiyonlarının dalga fonksiyonları arasında girişim olması ne anlama geliyor olabilir?

Öncelikle çeşitli durumlar arasındaki kuantum mekaniksel girişim sorusunu ele alalım. Burada üçüncü önemli fikir, eşevresizlik karşımıza çıkıyor. Bu konunun belki de en güç algılanan kısmı ve kavramlar konusunda fazla açılmamak için elimden geleni yapacağım. Kedi tekil, ayık bir parçacık değildir. Trilyonlarca atomdan yapıldır ve toplam dalga fonksiyonu bütün bu atomların bulundukları yerlerin çok karmaşık bir fonksiyonudur. Sisteme dahil olan iki durum (*canlı kedi × mermi silahta* ve *ölü kedi × mermi kedide*) Schrödinger denkleminde zamanla oldukça farklı ve son derece hızlı biçimde evrilir. Çok küçük saniye kesiri içerisinde ölü kedinin dalga fonksiyonu canlı kedininkinden tamamen farklı hale gelir ve canlı ve ölü kedilerin dalga fonksiyonları arasındaki girişim tümüyle kaybolur. Sonuç olarak sistem hiçbir kuantum mekanik girişim etkisi göstermez ve ya ölü ya da canlı bir kediye sahip oluruz, bu iki durumun komik bir üst üste binmesine değil.

Fakat hangi durumu bulacağız? Kuantum mekaniği deneyimizin sonucunun öngörülmesi konusunda sessiz mi kalıyor? Nedenselliğin ve determinizmin kaybı, bilimin ve anlamının temeli ve desteğinin kaybı, çoğu kimse için ödenemeyecek kadar yüksek bir bedeldir, özellikle de ona karşı sunulan sav deneyeyle birleşmiş matematik değil de felsefi bir görüş tadındaysa. Olası bir çözüm Einstein'ın ileri sürdüğü kuantum mekaniğinin *saklı değişkenlerinin* olması ya da bizim göremediğimiz ama parçacıkların (kediler dahil) davranışlarını etkileyen parçacık özelliklerinin var olması anlamında tamamlanmamış olduğu görüşüdür. Kuantum kuramının tüm yaptığının parçacığın belli bir yerde ortaya çıkma olasılığını öngörmek olmasına karşın, belki de saklı bir değişken parçacığa belirli bir yerde ortaya çıkmasını söylüyor olabilir ve asıl sonucu kontrol eden bu saklı değişken de bir şekilde anlaşılamıyordur. Bu saklı değişkenlerle uğraşmanın ve bir gözlemin sadece olasılığı üzerine değil de sonucu hakkında kesin öngörüler yapmanın bu durumda kuantum mekaniğinin altında yatan henüz keşfedilmemiş daha derin bir kuramın alanına girdiği varsayılmaktadır.

Bilinemez ama etkili saklı değişkenlerin varlığının doğrulanması ya da aksi, bilimsel bir çözüme kavuşturulmaya uygun olmaktan ziyade ikna edici olmayan metafizik bir tartışmanın konusu gibi gözükebilir. Fakat 1964'te yayımlanan olağanüstü, basit ama yine de ufuk açıcı bir makalede John Bell (1928–1990) kuantum mekaniği ile saklı değişkenleri içeren uyarlamaları arasında deneysel bir ayrım olduğunu ve bu nedenle sorunun kesin bir şekilde sonuca kavuşturulabileceğini ispatladı. Daha net söylersek Bell kuantum mekaniğinin öngörülerinin *yerel saklı değişkenler* kuramlarından farklılık gösterdiğini gösterdi. Bir *yerel* saklı değişken verilen isimde ima edildiği gibidir: Parçacığın mevcut yeriyle saptanabilen saklı bir değişkendir ve bu bir özelliğe sahip olunması için mantıklı bir gereklilik olarak gözükmektedir. *Bell teoremi*, bir parçacığın başka bir yerde bulunan bir karakter özelliğine bağlı olduğu *yerel olmayan* saklı değişkenleri hükümsüz kılmaz; bu tuhaf bir olasılık gibi gözükebilir ama kuantum kuramı oturduğumuz yerden tuhaflıkları hafife alarak göz ardı etmemeyi öğretmiştir. Bell'in güçlü teoremi kuramsal bir sonuçtur, ama artan incelikte bir dizi deneyle de sınanmıştır. Bütün örneklerde sonuçlar kuantum mekaniğiyle tutarlı ve her türden yerel saklı değişkenler kuramıyla da tutarsız çıkmıştır.

Dolayısıyla kuantum mekaniği eğer gerçekten, en azından yerel özellikler yönünden tamsa, nedensellikten sahidan vazgeçmemiz şart mı? Önerilmiş bir dizi alternatif vardır. En radikal önerilerden ve bu yüzden bilimciler için olmasa bile gazeteciler için çekici olanlarından biri kötü biçimde adlandırılmış olan *çoklu dünyalar yorumu*'dur. Peşpeşe sigara içen, boynuzlu Cadillac kullanan, mültimilyoner silah araştırma analisti Hugh Everett (1930–1982) tarafından 1957 yılında verdiği doktora tezinde pek de öyle kolayca anlaşılmayan bir biçimde önerilmiştir. Everett'in önerisindeki dolambaçsız ve masum görünüşlü ama Bohr'un hor gördüğü fikrin merkezinde Schrödinger denkleminin evrensel olarak geçerli olduğu ve parçacık bir ölçüm aletiyle etkileşime girdiğinde bile dalga fonksiyonlarının evrimini yönettiği düşüncesi yatar. Everett'in dikkat çektiği noktalardan ilerleyerek bu temel üzerine türlü türlü kuleler diken çeşitli yorumcular olmuştur.¹⁶

16 Hatta bunlar o kadar çok sayıdadır ki belki de *çoklu hülyalar yorumu* daha iyi bir isim olabilir.

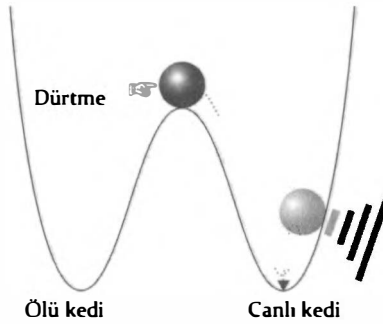
Popülerlik kazanan kule imgesiye, ölçüm yapılıp yapılmaz ve durum algılanır algılanmaz dalga fonksiyonu tarafından ifade edilen bütün olasılıkların sahiden gerçekleştiği (dolayısıyla kedi gerçekte hem ölü hem diridir), ama gerçekleşmenin evreni sonsuz sayıda paralel evrenden herhangi birisine böldüğü (biri ölü kedili, diğeri diri kedili) düşüncesidir. Esas itibarıyla ölçüm aletinin gözlemcinin beyniyle etkileşimi izleyeceği bir evren dalını seçiyor. Her gözlem evreni bölerek dallara ayırıyor, dolayısıyla beyinlerin farklı yollar izlemesiyle oluşan muazzam sayıda ve artan çoklukta paralel evren var. Bu kadar savurgan bir başka yorum daha bulmak zordur, ama hoşlanmama bilimsel bir paye olmadığı için kimi insanlar bu yorumu ciddiye alıyor. Bell'in teoreminden farklı olarak burada zihnin gerçekten saptama aşamasına karışıp karışmadığını sınamanın bir yolu yok gibi gözüküyor; önerilen bir deney hariç. Bu deney gözlemcinin intihar etmesini gerektirdiği için de henüz yapılmış değil.

Everett'in Schrödinger denkleminin büyük ölçekli cisimlere uygulanabilir olduğu biçimindeki (dediğim dedik, koyu Kopenhagçılar hariç) itiraz edilemez görünen temel fikri ile bu görüşe dayanarak yapılan yorumları birbirinden ayırmalıyız; dolayısıyla birisine "çoklu dünyaları mı savunuyorsun?" diye sorduğunuzda çoklu dünyalar yorumunun hangi yönünü kastettiğinizi tanımlamakta dikkatli olmalısınız. Sanırım savunan fizikçilerin çoğu bugün çoklu dünyalar yorumunun Schrödinger denkleminin evrensel olduğu şeklindeki salt vanilyalı, sade biçimini kabul ediyor, birkaç kişi de yoruma eklenmiş olan diğer dondurma çeşitlerinden sevdiklerini savunuyor. "Evrensel Schrödinger yaklaşımı", ölçüm aletleri dediğimiz büyük ölçekli atom toplamlarına uygulandığında kuantum mekaniğinin bir şekilde geçersiz olduğu şeklindeki tatsız düşüncüyü savunan Kopenhag yorumuyla çelişiyor. Bu tutum haksız yere yenilgiyi kabul eder gibi gözüküyor ve sistemde işin içerisine karışan atom sayısı arttıkça kuantum mekaniğinin yavaş yavaş, hatta sertçe başka bir kurama geçiş yapmayı nasıl başardığını anlamak zor oluyor. Büyük ölçekli cisimlerin klasik fizikle büyük bir yaklaştırım içerisinde uyumlu davrandığını kesin olarak görebiliyoruz: Ama bu davranışın aslında kuantum mekaniğinin çok sayıda atoma uygulanmasının bir göstergesi olduğunu da bilmekteyiz.

Şimdi “evrensel Schrödinger yaklaşımı” üzerinden ilerleyerek onun işaret ettiklerine ve sahip olduğu sorunlara bakalım. En basit senaryonun yeterli olduğu olasılıkla baş başayız: Kuantum mekaniği tamdır, yerel saklı değişkenler yoktur ve parçacık sayısı ne olursa olsun bu parçacıklardan oluşan cisimleri tamamen betimlemektedir. Kopenhag yorumunun gizemli bir bileşeni olan dalga fonksiyonunun çökmesi de devre dışı kalmıştır, çünkü evrensel bir Schrödinger denklemi ölçüm sırasında gerçekleştiği düşünülen çökme dahil bir dalga fonksiyonunun geçirdiği tüm değişikliklerden bir şekilde sorumlu olacaktır. Bu durumda bu kısıtlar altında nedensellik ve determinizme kuantum mekaniği çerçevesi ve özelde de ölçüm süreci içerisinde nasıl sahip olacağız?

Kedilerin canlı ve ölü versiyonları arasındaki kuantum mekanik girişimin bertaraf edilmesinde eşevresizliğin başarısı, burada ihtiyacımız olan kurtarıcı şövalyenin eşevresizlik olduğunu iddia ediyor. Canlı ya da ölü bir kedi karmaşık ve ayrıntılı bir gösterge kayıdır. Bu yüzden iki boşluk arasındaki bir sırtın tepesinde duran bir topa sahip ilkel bir ölçüm aleti düşünerek problemi sadeleştiririm. En küçük bir itelemede top iki boşluktan birine düşecektir ve topun hangi boşluğa düştüğünü gözleyerek topun sola doğru mu yoksa sağa doğru mu bir dürtme yaşadığını tespit edebiliriz (Şekil 7.13). Bu aygıt bir dürtme yükseltecidir. Aslında bu bütün ölçüm cihazlarının özündeki özelliktir: Bu cihazların hepsi dürtme büyöltecidir. Dilersek sol taraftaki boşluğa “ölü kedi”, sağ taraftakine “canlı kedi” adını verebiliriz. Bu durumda kedi bir mermi-konum büyöltecidir: Schrödinger kedi büyöltecisi ile onun yeniden biçimlendirilmiş sırttaki top basitleştirmesi arasında ilişkiyi ifade etmeyi size bırakıyorum.

Şu ana kadar tanımladığımız kadarıyla alet işe yaramaz haldedir, çünkü sol boşluğa yuvarlanan top diğer yönde yeniden yuvarlanacak ve sırtı tekrar aşacaktır. Ne var ki enerji israfına sebep olacak bir sürtünme varsa top ilk başta yuvarlandığı boşlukta durabilecektir. Dolayısıyla sürtünme topu düştüğü boşluğa kısırmakta ve boş zamanımızda cihazın çıktısını



Şekil 7.13 Kuantum kuramında ölçüm problemini örnekleyen “dürtme yükseltici”. İki boşluk arasındaki sırtta duran top “hazır” durumundadır. Bir dürtme onu sağa yollarsa, sürtünmenin olmadığı koşullarda top iki boşluk arasında ileri-geri kayacaktır ve topu sağ tarafta bulma ihtimalimiz kadar sol tarafta bulma ihtimalimiz de vardır. Fakat sürtünme olduğunda (eşevresizliği simgeliyor ve çizimde sağdaki çubuklarla gösteriliyor), top hemen aşağıdaki sağ boşluğa yerleşir ve uygulanabilir bir ölçüm aleti elde ederiz.

incelememizi mümkün kılmaktadır. Şimdi elimizde sürtünme sayesinde, sistemin çevresiyle etkileşimi sayesinde uygulanabilir hale gelen uygulanabilir bir ölçüm aletine sahibiz.

Buradaki sürtünme eşevresizliğin benzetmesidir (Bu sav sizin adınıza bir inanç eylemini gerektirmektedir: Burada bir kez daha her bir adımı tek tek anlatmak yerine matematiksel formülasyonu yorumlamaya çalışıyorum). Yuvarlanan topu Schrödinger denkleminin kontrolü altındaki saf bir Schrödinger parçacığı olarak düşünebiliriz. İlk başta ölçüm aletinin durumu topun sırtta dengede olduğu durumdur: Bu duruma *alet hazır* diyoruz. Saptamak üzere tasarlanmış saptayıcının sola gitme (buna *parçacığın sola gitmesi* diyelim) ile sağa gitmenin (buna da *parçacığın sağa gitmesi* diyelim) üst üste binmesi durumunda olduğunu varsayalım; o halde saptama eyleminden önce sistemin durumu şöyledir:

$$\text{Başlangıç durumu} = \text{alet hazır} \times (\text{parçacığın sola gitmesi} + \text{parçacığın sağa gitmesi})$$

Parçacık saptayıcıya çarptığında top sol ve sağ boşluklarda olmanın üst üste binmesi durumundadır, dolayısıyla şu hale gelir:

$$\text{Son durum} = \text{top solda} + \text{top sağda}$$

Fakat top sürtünme yoluyla çevreyle bağlantılandığı için bu iki durumun çok hızlı bir eşevreliliği gerçekleşir ve aralarında hiçbir girişim gözlemlemeyiz: Filliyatta top ya solda ya da sağdadır; üst üste binme bu iki esas itibarıyla klasik durumdan biriyle sonuçlanır.

Halen daha topun gerçekte sol boşlukta mı sağ boşlukta mı olduğu sorusu varlığını sürdürmektedir. *Hazır* durumda topun sırtın üzerinde ince bir dengede durduğunu ve her iki yöne gitmeye hazır olduğunu hatırlamamız gerekiyor. Bu saptayıcının çok duyarlı olduğunu ve herhangi bir sapma taşımadığını söylemenin bir başka yoludur. Şimdi topun da çevresiyle ilişkisinin tümüyle kopmuş olmadığını ve titreşimlere, hava moleküllerinin etkilerine, oradan geçen bir başıboş fotonun çarpmasına vs maruz kaldığını hatırlayalım. Saptanacak parçacık topa çarptığında ve bu onun iki taraftan birine yuvarlanmasını tetiklediğinde, hareketi eşit olasılıklarla iki tarafa tetikleyen ve her iki yönden birinde olabilen yerel düzensizlik etkilerinin birleşimi, hareketi belirli bir yöne doğru tetikler. Sonuç olarak üst üste binme, topun son durumda eşevresizlik tarafından hemen kısıtıldığı bu iki boşluktan birinde olmasına evrilir.

Bu nedenle ölçüm aletinin esas özelliği (Kopenhag yorumunun gerektirdiği üzere) Schrödinger denkleminin buyruğunun işlemediği klasik bir alet olma gerekliliği değil, çevresine gömülmüş ya da onunla bütünleşik bir büyük ölçekli kuantum mekanik alet olmasıdır.

Kuantum mekaniğinin sadece yüzeydeki özelliklerine değinmekle yetindim. Bu aktarımdan alınacak bir dizi mesaj var ve burada bunları bir kez daha toplamak istiyorum.

Birincisi artık dalga ve parçacıkları, her ikisi de birbirinin ayırt edici özelliklerine sahip olabildiği için, ayrı varlıklar olarak

mın yüzeyinin aşıağısında görünmez kalan yerel saklı değişkenlerin var olması anlamında kuantum mekaniğinin tamamlanmamışlığı, bu itibarla da bir kuramın gerçekleştirilen deneylerle uyuşmadığı şeklinde bir çözüm savunulamaz. Kopenhag yorumu Schrödinger denkleminin yerini, dalga fonksiyonunun çökmesi adı verilen gizemli bir sürecin alması gerektiğini ileri sürer. Fakat kuantum mekaniği için sistem daha incelikli ve karmaşık bir hal aldığında kaybolan bir yeterlilik alanı çizmek en ihtimal dışı çözümdür. Modern yaklaşım Schrödinger denkleminin evrensel olarak geçerli olduğu ve çevrenin müdahil olmasından kaynaklanan güç algılanır nitelikte etkilerin bütün gözlemlerden sorumlu olmaya yeterli olduğudur. Kimi insanlar da bu görüşe hararetle karşı çıkmaktadır. Richard Feynman'dan bu bölümün başlığında yaptığımız alıntı halen büyük oranda doğrudur.

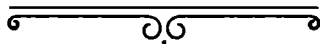
8

KOZMOLOJİ

GERÇEKLİĞİN KÜRESELLEŞMESİ



BÜYÜK FİKİR
Evren genişlemektedir



*İnsana konuşma verildi ve konuşma evrenin ölçütlerinden
düşünceyi yarattı.'*
SHELLEY

Kimileri (bunlara ben de dahilim) bilimin doğru, tam ve mükemmel bilgiye ulaştıran tek yol olma iddiasının boşa çıkabilmesi konusunda oldukça kibirli olduğunu düşünür. Yine de onun büyük başarılarından bazıları son derece mahcup edicidir. İnsanı Dünya'daki yerine yerli yerince koymada oynadığı rol, başarısının en büyük çarpıcılığa sahip olduğu ve başkalarını küçümsemesinin de doruğa ulaştığı alandır. Görkemli başarısının kibriyle bilim kendisini en büyük soruyu yanıtlamaya aday görmektedir: Evrenin kökeni. Kaçınılmaz ve ironik aşağılama, her astronomik ve kozmolojik devrimin İnsan'ın konumunun biricikliğini azaltmış olmasıdır. Ptolemaios (Batlamyus) bizi merkeze koymuştu. Copernicus (Kopernik) bizi güzel ama Güneşin yörüngesindeki kü-

1 *Prometheus unbound.*

çük bir gezegen olmaya iteledi. O günden beri de Güneş önemsiz olduğu kanıtlanabilecek olan bir evrendeki önemsiz bir yıldız kümesinde yer alan önemsiz bir galaksideki önemsiz bir yere doğru dirsek yiye yiye itiliyor.

Bu bölüm, bilimsel keşiflerimizin eskiden küstahça iddia ettiğimiz merkezliğimizden bizi alıp önemimizi azalta azalta bir kenara ittiği bu ardı ardına küçük düşmelerin hikâyesidir. Yine de kendi önemsizliğimizi fark etmek zorunda kalırken biz cılız beyinli küçük şeyler evrenin ölçülerini kavradık, var olan her şeyi ölçütleyebildik, kökenimizin nereden geliyor gibi gözüktüğünü saptadık, hatta kozmik geleceğimizin nasıl şekillenebileceğini bile bulduk. Hiç durmadan artan tevazumuzun ortasında gururlu olmaya hakkımız var.

Daha önceki bölümlerde içe baktık, şimdi dışa bakıyoruz. Daha önce son derece küçüğe bakıyorduk, şimdi son derece büyüğe bakıyoruz. Şimdi gökyüzünde uzaklara bakıyoruz, bizim küçük mücadele alanımızın nerede olduğunu görüyor ve yıldızlardan ne öğrenebileceğimizi araştırıyoruz.

Yıldızlar Yunanların gözünden kaçmadı. İlk önce, gökyüzünün şimdi baktığımızda gördüğümüzden daha karanlık olduğu zamanlarda parlak dış diyardan gök ışığının ısıdığı iğneyle açılmış gibi gözüken deliklere sahip bir kalkan gördüler. Knidoslu Eudoksos'un (yaklaşık olarak MÖ 408–355) ustalıkla geliştirilen fikri uyarınca kalkan yirmi yedi merkezdeş küreye dönüşünce bu evren değerlendirmesi biraz daha incelikli bir hal aldı.² Eudoksos'un küreleri sadece bir hesaplama aleti olarak mı yoksa modeli geliştiren ve sayıyı elli dört yapan Aristoteles gibi gerçek olarak mı ele aldığı konusu hâlâ tartışılıyor. Aristoteles'e göre ya da en azından gerçekte yazdıklarının ortaçağda detaylandırılışına göre bu kürelerin en dışındaki hariç hepsi saydamdı; üzerine ışık noktaları asılı olan en dıştaki siyahtı ve günde bir kez dönüş yapıyordu. Aristoteles'e göre kürelerde yer alan göksel cisimler Dünya'da bir benzeri olmayan beşinci tözden, beşinci elementten yapılmıştı. Şimdi dalga geçiyor olabiliriz ama şunu

² Bu zeki adamın yaşam öyküsü için bkz. <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Eudoxus.html>

da bilin ki beşinci töz bu tartışmanın sonunda yeniden karşımıza çıkacak. Kabuklar ulaşılabilir gibiydi sanki ama ulaşılıyordu, zira o dönemde yüksekliğin kavranması zordu. Johannes Kepler (1571–1630) bile bütün yıldızların sadece birkaç kilometre kalınlıktaki ince bir kabuğun içinde yattığını düşündü.

İnsanlık onu dışbükey merceğin altına koyup parabolik aynaya tutunca evren algımız da gelişmeye başladı. Kariyerine Hanoverli piyadelerin bandosunda obuacı olarak başlayıp bir başka Hanoverli, III. George'un himayesindeki bir gökbilimci olarak ün kazanan Sir William Herschel'in (1738–1822) dönemine geldiğimizde evrenin çapı altı bin civarı ışık yılı tutan ve sayısız yıldızdan oluşan bileğitaşı şeklinde bir yıldız kümesine dek çıkmıştı.³ Algılanan çap Eyfel Kulesi inşa edildiğinde büyüdü, bunun nedeni gökbilimcilerin kafaları göklere daha yakın şekilde yükseğe çıkabilmeleri değil,⁴ William Hale adlı bir adamın kuledeki asansörleri inşa edip bu sayede astronomi tutkusunu oğlu George Hale'e (1868–1938) aktarabilecek kadar zengin olmasıydı. Genç Hale Chicago Üniversitesindeki Yerkes Gözlemevinin ilk müdürü oldu. Gözlemevi adını Chicago'nun zengin ve gaddar tramvay patronu ve yolsuzluktan cezaevine girdikten sonra toplumdaki yerini yeniden kazanma umuduyla şimdiye dek ve sonrasında da yapılmış en büyük kırınımlı teleskobun (merceğin çapı 1 metreydi) inşasına para yatırmaya ikna edilen Charles Yerkes'ten alıyordu. 1904'te Hale Los Angeles'ın hemen dışındaki Wilson Dağı Gözlemevi'ne geçiş yaptı. Aynalara inçler ekleyerek uzayda daha büyük ışık yıllarına ulaşabileceğini biliyordu. Burada ilk önce babası 60 inçlik (1,5 metre) bir kırınımlı teleskop sağlamasına yardımcı oldu; ardından John Hooker adlı başka bir işadınının yardımıyla 1918'de 100 inçlik Hooker teleskobu inşa edildi ve bu otuz yıl boyunca dünyadaki en büyük teleskop oldu.

3 Bir ışık yılı, saniyede 300.000 kilometre hızla ilerleyen ışığın bir yılda aldığı mesafedir; yaklaşık olarak bir trilyon kilometre tutar ($9,54 \times 10^{11}$ km).

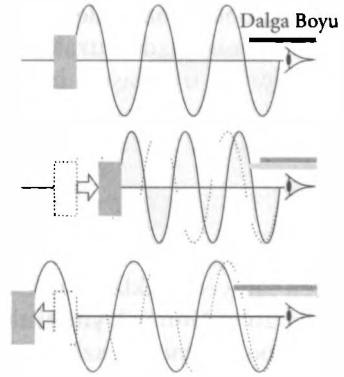
4 Titanlar yıldızları daha iyi izlemek için Galileo'nun parmağının muhafaza edildiği heykele çıkıp bir de Pelion'u Ossa dağının, dağı dağı üstüne bindirirlermiş; fakat ölümlü Galileo'nun "kırılğan camı" yıldızları bize bu serseri tanrıların başarabileceğinden daha yakına getirdi. Bu nedenle Galileo'nun parmağı beynin kas gücüne üstünlüğünün simgesidir.

1919 yılında Hale Oxford'da Rhodes bursuyla hukuk okumuş ama üniversitenin gerektirdiği işlerden sıkılmış olan Edwin Powell Hubble'ı (1889-1953) kendisine katılmaya ikna etti. Hubble çalışmasına astronomların aklını uzun zamandır meşgul eden bazı puslu yıldız beneklerinin (bulutsular) uzaklıklarını belirleyerek başladı. Çok uzaktaki cisimlerin uzaklığının ölçülmesi kolay iş değildir. Hubble çalışmaya koyulduğunda sadece tek bir yol vardı ve bu teknik Harvard College Gözlemevinde çalışan Henrietta Leavitt (1868-1921) tarafından önerilmişti. Kendisi *Cepheid değişkeni* denen ve sarmal galaksilerin kollarında gerçekleşen bir değişken yıldız sınıfının parlaklığı ile değişim periyodu arasında bir korelasyon tespit etmişti. Bir gökbilimcinin Dünya'da ölçtüğü parlaklık yıldızın uzaklığına bağlıdır, uzaklık ne kadar büyükse yıldız o kadar sönük gözükür. Bu nedenle değişken bir yıldızın periyodunu tespit ederek mutlak parlaklığı hakkında bir fikre varabilir ve görünen parlaklığını ölçerek uzaklığını çıkarsayabiliriz. Hubble'ın verdiği sonuçlar hayret vericiydi: Galaksimiz Samanyolu'nun yaklaşık 25 bin ışık yılı çapına sahip olduğunu öğreniyorduk, ama bu bulutsulardan en yakın olanı Andromeda bulutsusu 2 milyon ışık yılı uzaktaydı. Bizim galaksimizin dışında olması gerekirdi; bir başka galaksiydi bu.

Evren algısı eskiden inanılana kıyasla anında büyüdü ve işkenceyle asıldığımız küçük düşürülme askısına bir diş daha atıldı. Sadece gezegenler sisteminin merkezinde olmadığımızı ve Samanyolu'nun bir köşesine atılmış olduğumuzu kabul etmemiz yetmiyor, bizim galaksimizin de var olan çok sayıdaki galaksiden biri olduğu gerçeği açığa çıkıyordu. Daha başka ve daha büyük küçük düşmeler bizi bekliyordu.

Hubble'ın bir sonraki hedefi bu diğer galaksilerin bize yaklaştıkları ya da bizden uzaklaştıkları hızları belirlemek ve bu şekilde evrenin dinamiklerini keşfetmekti. Örneğin gökadarlar rasgele gaz gibi bir şeyin içinde mi koşuşturuyorlardı, yoksa gökyüzünde asılı mı duruyorlardı? Aslında bir hareketin olduğu 1912 yılında Arizona'daki Lowell Gözlemevinde çalışan Vesto (1875-1969) tarafından kanıtlanmıştı. Galaksilerin hareketleri nedeniyle gözlenen renk kaymalarını ölçmüş ve 1924 yılına gelindiğinde de incelediği kırk bir galaksiden otuz altısının bizden uzaklaşmakta

Şekil 8.1 Doppler etkisi hareket eden bir kaynağın yaydığı ve hareket-siz bir gözlemci tarafından alınan ışının (ışık ya da ses) dalga boyunda yaşanan değişikliktir. Üstteki çizimde kaynak hareketsiz ve belli bir dalga boyunda ışınım yayıyor. Ortadaki çizimde kaynak gözlemciye doğru hareket ediyor ve dalga dizisi sıkışıyor, dolayısıyla gözlemci daha kısa bir dalga boyu ya da daha yüksek bir frekans algılıyor (maviye kayma ya da seste daha tiz notalar). Alttaki çizimde kaynak gözlemciden uzağa hareket ediyor, dalgalar hareket yüzünden genişliyor ve gözlemci daha uzun bir dalga boyu ve daha düşük bir frekans algılıyor (kırmızıya kayma ya da seste daha pes notalar).



olduğunu bulmuştu. Slipher çalışmasında *Doppler etkisi* dediğimiz, kaynağın hareketinin neden olduğu dalga boyu değişimini kullanmıştı: Bize doğru olan hareket, algılanan dalga boyunu düşürerek beyazın maviye çalmasına sebep oluyor, bizden uzağa doğru hareket de algılanan dalga boyunu arttırarak beyazın kırmızıya çalmasına sebep oluyordu. Bu etkiyi ses bağlamında gördüğümüz, bize doğru hareket eden bir aracın bizden uzaklaşana göre daha tiz ses çıkarmasına benzetebiliriz. Etki, kaynağın hareketi dalgaların tepelerinin bir arada toplanmasına ya da uzamalarına yardımcı olduğu için ortaya çıkıyor (Şekil 8.1). Kaynağın hızı ne kadar büyükse dalga boyundaki kayma o kadar büyüktür, dolayısıyla kaymaların ölçülmesiyle görelî hız saptanabilir. Dalga boyu artmış ve *kırmızıya kayma* sonucu çıkmışsa, bu durumda kaynak gözlemciden uzağa hareket ediyor demektir. Çoğu galaksinin ışığı kırmızıya kayma gösterir, dolayısıyla bizden uzaklaşmaktadırlar.

Hubble daha da ileri gitti. 1923–1929 yılları arasında geri çekilme hızının bizden uzaklıkla orantılı olduğu ve galaksi ne kadar uzaktaysa, uzaklaşma hızının o kadar büyük olduğu gibi dudak uçuklatan bir sonuca ulaştı. Bu gözlem bugün evrenin genel bir yasası olarak ifade ediliyor:

$$\text{Uzaklaşma hızı} = \text{Hubble sabiti} \times \text{Bizden uzaklık}$$

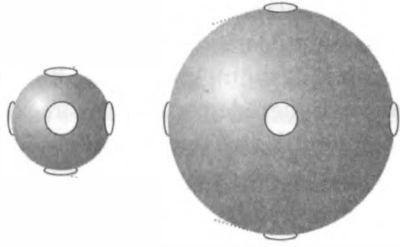
Hubble sabitine göre 10 milyon ışık yılı uzakta bir galaksi bizden saniyede yaklaşık 200 kilometre hızla uzaklaşıyor gibi gözükür, 20 milyon ışık yılı uzakta bir galaksi bizden saniyede yaklaşık 400 kilometre hızla uzaklaşıyor gibi gözükür vb.⁵

Hubble'ın vardığı sonuç, her ne kadar bundan ilk makalesinde bahsetmeyi unutmuş olsa da, evrenin genişlediği idi. Galaksiler lastik bir çarşaftaki bir yere işaret eden birer nokta gibidir. Galaksileri lastik bir balonun yüzeyine saplanmış küçük madeni paralar olarak düşünebilirsiniz: Lastik gerildikçe paralar birbirinden uzaklaşır ama kendileri uzağa ilerlemezler (Şekil 8.2). Bu genişlemenin işaret ettiği sonuçlar müthiştir, çünkü zaman içerisinde geriye doğru izini sürersek bütün paraların birbiriyle çakışık olduğu ve evrenin kendisinin tekil bir nokta olduğu bir ana gelmemiz gerekir. Buna göre *evren bir başlangıca sahipmiş gibi gözükmektedir*. “Gibi gözükmektedir” dedim, çünkü kozmolojide hiçbir şey basit değildir ve özellikle bükülmüş uzayzamanda bu daha da geçerlidir, bu yüzden bu sonucu daha sonra tekrar ele alacağım. Bu aşamada evrenin genişliyor olması gibi muhteşem bir fikrin sonuçlarından birinin, *her şeyin başladığı bir an vardı* çıkarımına izin vermesi olduğunu vurgulayalım. Bu gerçekten nefes kesicidir ve çok çeşitli sorulara kapıyı açar, bunlardan bazılarını bu bölüm de evren gibi geliştikçe açacağız.⁶

5 Hubble sabitinin belirlenmesinde zorluk yaşanmaktadır. Hubble'ın kendisi aşırı bir tahminde bulunmuş ve epey acayip bir biçimde Dünya'nın evrenden yaşlı olduğu sonucuna varmıştır. Şu an kabul edilen değer $71 \pm 7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 'ye yakın bir değerdir ve yaklaşık olarak $22 \text{ km s}^{-1} \text{ Mly}^{-1}$ (1 Mly = 1 mega ışık yılı, 1 milyon ışık yılı) ya da $2,3 \times 10^{-15} \text{ sn}^{-1}$ dir.

6 Sizler bu dipnotu okurken geçen zaman sırasında (diyelim ki şu 10 saniyede) birbirinden 1 milyon ışık yılı uzaktaki iki galaksinin arasındaki mesafe yaklaşık 200 km artacaktır.

Şekil 8.2 Genişleyen evreni kafa canlandırmaya yarayan bir model. Kürenin üzerine yapışmış paralar galaksileri temsil ediyor. Evren genişlerken (kürenin büyümesiyle gösteriliyor) galaksiler birbirinden uzaklaşıyor ama kendileri ilerlemiyor. Bu modele göre paralardan herhangi birinin üzerindeki gözlemci diğer paraları uzaklaşır şekilde görecektir: Galaksilerin geriye çekilmesi evrende özel bir yerde bulunduğumuzun göstergesi değildir.



Bu betimlemenin bazı yönlerini burada ele alabileceğiz, bazı yönlerini ele almaya da yerimiz olmayacak. Teleskoplarımızı yönelttiğimiz her yerde evren genişledikçe galaksilerin bizden uzaklaştığını görüyoruz. Aslında bu tam doğru değil, yakınımızdaki bazı galaksiler (örneğin Andromeda) tehdit edici denebilecek bir şekilde bize doğru hareket ediyor. Bu “yerel” harekete galaksinin denmektedir ve genişleyen uzayda kurulu bir çerçeveye göre hareket anlamına gelmektedir. Galaksileri uzayda dolaşarak birbirlerinin kütleçekimine yanıt veriyor şekilde düşünebiliriz.⁷ Birbirine yakın olan galaksilerde bu hareket kozmik genişlemeye üstün gelebilir, bunu iki madeni paranın lastik bir çarşafta lastik gerilmesine rağmen kaymasına benzetebiliriz.

Bu bağlamda ikinci husus, bizim gözlediğimiz genişlemenin bütün galaksilerin *bizden* uzağa doğru hareket etmesi nedeniyle bizi tüm bu olanların merkezine yeniden yerleştiriyor gibi gözükmesidir. Fakat bu biriciklik bir yanılsamadır, çünkü evrende ne-

7 Bizim yerel grubumuz dahil (Samanyolu, Andromeda ve birkaç küçük parça daha) galaksilerin birçoğu yaklaşık 150 milyon ışık yılı uzaktaki 50 bin trilyon Güneş kütleğinde bir uzay bölgesi olan ve gizemli bir adlandırmayla Büyük Çekici denen uzaydaki bir noktaya doğru akmaktadır. Saniyede sadece 600 kilometre hızla sürüklendiğimize göre oraya ulaşmamız epey bir zaman alacak demektir.

rede durursak duralım, orada da bu bizden uzaklaşmayı görürüz. Balona saplanmış para benzetmesi ne olduğunu gösteriyor: Hangi paranın üzerinde durursak duralım yanımızdaki paraların bizden uzaklaştığını görüyoruz. Bu gözlem, *kozmozolojik ilke* denen, gözlemci nerede yer alırsa alsın evrenin aynı görüldüğünü iddia eden politik doğruculuğun özüdür. Tevazu yerini tekrar alıyor.

İşe koyulmadan önce belirtmemiz gereken bir teknik nokta daha var. Hubble galaksilerin geri çekilme hızını ölçtüğünü düşünürken tam haklı değildi. Kırmızıya kaymayı Doppler etkisi olarak ve dolayısıyla geriye çekilen cismin hızının göstergesi olarak yalnızca bize yakın cisimler için yorumlayabiliriz. Çok uzak cisimlerden gelen ışık, yolculuğuna uzun bir zaman önce başlamıştır; evren o zamandan bu yana genişlemiş ve ışığın dalgaları gerilmiştir. Kırmızıya kaymanın hem yakındaki hem de çok uzaktaki galaksiler için geçerli olan doğru yorumlanması, onun ışığın yayıldığı zaman ile saptandığı zaman arasında evrenin *ölçek değişiminin* bir ölçütü olmasıdır. Dolayısıyla eğer dalga boyu belli bir katsayıyla kırmızıya kaymışsa, o halde yolculuğuna evren o katsayı kadar küçükken başlamıştır. Uzaklığa bakarak evreni ölçeceği şimdikinden daha küçükken olduğu şekliyle görüyor olmamız olağanüstü çarpıcılıkta bir gerçektir.

Galaksilerin hepsi sabit hızlarda hareket etmiş ise, o halde görünür evrenin tümünün tek bir nokta olduğu zamanı bulmak için Hubble sabitini kullanabiliriz. Bu noktaya sonra yeniden döneceğiz, ama başlamak için iyi bir nokta olduğu kesin. Bu temelde yaklaştığımızda evrenin başlangıcının yaklaşık 15 milyar yıl önce olduğunu söyleyebiliriz. Evrenin başlangıcına işaret eden bu olaya 1950 yılında yapılan bir radyo programında Britanyalı gökbilimci Fred Hoyle (1915–2001) tarafından koyulan adla *Büyük Patlama* denmektedir. Hoyle kavramı küçük düşürücü şekilde kullandı,⁸ çünkü evren genişlediğinde yoğunluğun korunmasını sağlamak için maddenin pat diye var olduğunu

8 Hoyle şöyle demişti: “Bu büyük patlama fikri bana başarısız göründü... çünkü kendi galaksimize baktığımızda böyle bir patlamanın olduğuna dair en ufak bir işaret yok.”

savunan kendisinin *durağan evren* kuramına taraftardı. Evrenin bilinen (*durağan evren* kuramında kabul edilen) genişleme hızı, her bir metre-küp uzayda 10 milyar yılda bir yalnızca birkaç hidrojen atomunun pat diye var olmasına gereksinim duyar, dolayısıyla maddeyi yapan her kimse ondan beklenen çok da fazla bir şey değildir. Hatta esneyen uzayın gerilmesinin atomları yarattığını bile düşünebiliriz, dolayısıyla madde yaratımı *a priori* saçma değildir; ama parçacık yaratımı enerjinin korunumu yasasının yadsınması gibi gözükmemektedir ve bu yüzden ne kadar akla uygun gelse de ağızda kötü bir tat bırakmaktadır.

Hoyle'un *durağan evren* kuramına kendisini yakın hissetmesinin nedeni başlangıçta ne olduğu probleminden kaçınmasıydı, çünkü başlangıç yoktu: Evren her zaman vardı ve hep genişliyordu. Daha kafa karıştırıcı bir soru olan "evren var olmaya başlamadan önce ne vardı" sorusuna yanıt verme gerekliliğinden de kaçınıyordu. Fakat sorulardan kaçınması herhangi bir kuramın ortaya atılması için yeterli gerekçelendirme olamaz; hatta bu sadece görünüşte bir basitleştirme değildir, çünkü evrenin her zaman var olduğunu anlamanın aslında bir başlangıç için mekanizma bulmaktan daha zor olduğu tartışmaya açılabilir. Genel olarak bilim insanlarında nedensellik zincirleri, sonsuzluğun geçmişine bakmaktan daha makbul karşılanır.

Hermann Bondi ve Thomas Gold tarafından 1948 ve 1949'da bağımsız olarak yayımlanan makalelerle geliştirilmiş olan *durağan evren* modeli bugün artık bilimcilerin büyük bir çoğunluğu tarafından inandırıcı olarak görülmemekte ve Hoyle'un kendisinde de olduğu gibi sessizce bir kenara bırakılmış durumdadır. Fakat gözden düşeni hemen küçümsememek de gerekir: İleride şu anki düşünüşte, *durağan evren* kuramının gerektirdiği küçük hidrojen atomlarının pat diye var olmalarından daha sık bir şekilde *bütün evrenlerin* bir anda var olabildikleri daha sofistike bir versiyona dönüş yapıldığını göreceğiz.

Aslında elimizde Büyük Patlama modelini destekleyen ve var olduğuna yönelik çok etkileyici bir kanıt olan birazdan açıklayacağımız kozmik arda lan ışımasının ayrıntılı özellikleri dahil çok sayıda veri var. Bugün erken evrenin çok yoğun ve çok sıcak bir evreden geçtiğinden şüphe duyan çok az evrenbilimci var.

Hatta kuram ile gözlemin sıra dışı bir bütünleşmesiyle ve çok büyüğün özelliklerini açıklamak için çok küçük hakkındaki bilgilerimizden yararlanarak bugün evrenin geçmişinin izini doğumundan bir saniyenin çok küçük bir kesir sonrasına dek gayet güvenilir bir şekilde sürebiliyoruz. Hubble'ın astronomik mirası evrenin genişlediğinin deneysel keşfidir, fakat onun entelektüel mirası daha da büyüktür, çünkü biz cücelerin tarihimizin izini neredeyse zamanın başlangıcına dek sürebildiğimizi fark etmemizi sağlamıştır. Bu bölümün kalanında onun bu entelektüel mirasını ele alacak ve bizim Lilliput⁹ laboratuvarlarımızda yarattığımız bilimsel fikirlerin evreni içerecek bir kapsama sahip olduğunu göreceğiz.

Üstün zekâlı bir kimse bir bakışta evrenin genişlediğini görebilir. 1826 yılında Alman gökbilimci ve fizikçi Heinrich Wilhelm Olbers (1758–1840) evrenin genişlediğini bir bakışta gördü, ama gördüğünün bu olduğunu fark etmedi. Kepler'in 1610'da bir çözüm önermesinden bu yana biliniyor olmasına karşın bugün *Olbers paradoksu* adıyla tanınan bir soruyu kamuoyunda gündemleştirdi. Olbers geceleyin gökyüzünün karanlık olmasının kafa karıştırıcı olduğuna dikkat çekti. Siz ve ben eğitilmemiş zihinlerimizle yanıtın çok açık olduğunu düşünebiliriz: Güneş batmıştır. Fakat Olbers eğer evren zaman ve mekanda sonsuzsa, her çizgisel bakış doğrultusunun eninde sonunda bir yıldızda sonlanacağını hatırlattı. Dolayısıyla geceleyin gökyüzü Güneş'in yüzeyi kadar parlak olmalıydı, çünkü gökyüzü gök kubbeyi örten bir Güneş tabakasıydı. Güneşimiz batmış olsa da sayısız çokluktaki diğer güneşler batmamaktadır.

Düşünülmesi gereken iki nokta var. Birincisi ve daha basit olanı, eğer evren sonlu bir zaman önce oluşmuşsa Olbers'in savı yanlıştır, çünkü çok uzak yıldızların ışığının bize ulaşmasına yetecek kadar zaman olmamıştır. Dolayısıyla gökyüzü bir güneş ışığı tabakası değildir ve tabaka yıldızların bizim gece vaktindeki

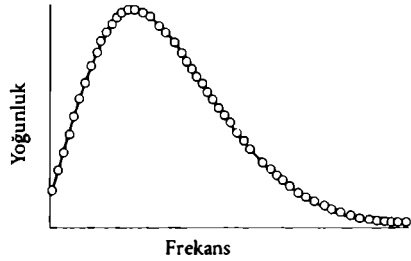
9 Jonathan Swift'in yazdığı, dünya klasikleri arasına girmiş fantastik roman *Gulliver'in Gezileri*'nde geçen cüce halklardan biri –çn.

gökyüzümüze katkıda bulunamayacak kadar uzak olduğu boşluklara sahiptir.

İkinci nokta biraz daha inceliklidir ve sonlu bir evrenin gözlerimize ulaşmasını bekliyor olsak bile ışığın yoğunluğunu daha da azaltmaktadır. Uzağa baktığımızda, ışığın bize ulaşması zaman aldığı için zamanda geriye doğru bakarız. Işık gözlerimize vardığında ne olduğunu değil, ışık ayrıldığında orada ne olduğunu görürüz. Bu kitabı okumak bile geçmişin bir parçasıdır, çünkü kitabın şu anda olduğu haline değil, saniyenin bir milyarda biri (10^{-9} sn, 1 nanosaniye) öncesinde olduğu haline bakıyorsunuz. Spor izleyicilerinin çoğu bir golü atıldığı anda değil, mazide olduğu haliyle, daha kesin konuşursak bir mikrosaniye önceki mazisinde olduğu haliyle görürler. Astronomik açıdan uzak cisimler bize şimdi ulaşan ışığı milyarlarca yıl önce, evrenin sıcaklığı bütün gökyüzü Güneş'in yoğunluğuyla parlayacak kadar yüksek olduğunda yaydılar. Bu kadar uzağa ve zamanda bu kadar geriye bakınca Olbers gibi biz de gökyüzünün ışıkla dolu olmasını bekleriz. Ama o zamandan bu yana evren genişlemiş ve yaklaşık olarak 10 bin derece (10^4 K) olan bir cisimde tipik olarak görülen ışık dalgaları inanılmaz bir katlanmayla gerilmiştir. Nanometrelerle ölçülen görünür dalga boyları, milimetrelerle ölçülen görünmez dalga boyları haline gelmiştir. Bu dalgalar şimdi çok daha soğuk, mutlak sıfırın üzerinde üç dereceye (3 K) yakın cisimlere hastır. O halde geceleyn gökyüzü bir yıldızın yüzeyinin yoğunluğuna yaklaşan bir şeyle parlamaktadır, ama o kadar eski ve gerilmiş bir yıldız ışığıyla parlamaktadır ki gökyüzünün karanlık olduğunu düşünürüz.

Bilim insanları evrenin sıcak Büyük Patlama modeli kuramsal bir ihtimal olarak kabul gördüğünde bu açıklamaya tesadüfen rastladılar. Bu model temelinde tüm uzayı dolduran ışımanın dalga boyları gerildiği için, genişledikçe evrenin sıcaklığının düşmesi gerektiği de öngörülmüştü. Sonuç olarak bir zamanlar kısa olan uzun hale gelir ve evrendeki enerji yoğunluğu düşer. Bu durumda sıcaklığın evrenin ölçeğine ters orantılı olduğu ortaya çıkar, dolayısıyla evrenin büyüklüğü iki katına çıktığında sıcaklığı eski değerinin yarısına düşer. Büyük Patlama'dan kalan ışımanın keşfedilmesi için çaba gösterilmeye başlandı ama bu çabaların

Şekil 8.3 Boş uzayı dolduran ışıma yoğunluğu her dalga boyunda ölçülebilir ve noktalar elde edilen değerleri göstermektedir. Yekpare eğri Planck'ın kara cisim ışıması yasasına 2,728 K bir cisim için öngörülen yoğunluktur.



önüne büyük bir mikrodalga antenine düşen güvercin pisliklerini temizleme işini üstlenmiş iki doktora sonrası öncesi öğrencisi olan Arno Penzias (1933) ve Robert Wilson (1936) set çekti. Tek işleri bu değildi aslında: Telstar ilkel Echo uydu iletişim sistemini değiştirdiğinde boşta kalan bir anteni daha temel bir radyo astronomi için kullanma umuduyla devralmış olan ve aldıkları radyo yayınına bulaşan arka plandaki bir tıslamanın kaynağını araştıran radyo astronomlardı. Dünya kaynaklı bütün olasılıkları, güvercin pisliklerini kazımak ve Manhattan'a arkalarını dönmek dahil eleddikten sonra, ellerinde ışımanın kozmik kökenli olduğu sonucu kaldı. Ateş topunun kalıntısını tesadüfen bulmuşlardı, onun parlak ışıması mikrodalgalara dönüşecek kadar gerilmiş ve elektriksel gürlemesi neredeyse sessiz bir elektronik tıslamaya kadar düşmüştü.

Mikrodalga ardaan ışıması üzerine sonraki yıllarda yapılan çalışmalar onun tam da beklendiği gibi mutlak sıfırın (yani eksi 270 derecenin, Şekil 8.3) 2,728 derece üstünde bir sıcaklıktaki cisimden yayıldığını gösterdi. Bizim Güneş etrafındaki hareketimiz, Güneş'in galaksimizin merkezi etrafındaki hareketi ve bizim yerel galaksi grubumuzun bir bütün olarak Büyük Çekici'ye doğru sürüklenişi, bunlar hesaba katıldığında ışıma hangi yöne bakarsak bakalım aynıdır. Yüz binde bir oranında özdeştir ve sıcak Büyük Patlama fikrinden hoşlanmayanların bunun nereden geldiğine ilişkin yaptığı bir dizi öneriyi boşa çıkaran özelliktedir. Evrenin bir zamanlar son derece sıcak ve son derece yoğun olduğuna hiç kuşku yoktur.

Bu noktada gözlem ile kuramı bir araya getirerek biraz tarih aktarımı yapabiliriz. Evrenin ne kadar madde içerdiğine dair yaptığımız (çoğu yakın zamana ilişkin olan) varsayımlara bağlı olarak onun ölçeğinin zamanla nasıl değişeceğini (Einstein'ın alan denklemlerini, kütleli cisimlerin varlığı koşullarında kütleçekim alanına dair onun geliştirdiği matematiksel tanımları çözme yoluyla, 9. Bölüm) biliyoruz. Hubble sabitinin belirlenişinden şu anki genişleme hızını biliyoruz ve evrenin sıcaklığının ölçeğiyle nasıl bağlantılandığını biliyoruz. Bunu nasıl biliyoruz? Farklı dalga boylarındaki ışımanın yoğunluğu sıcaklığa bağlıdır (7. Bölüm ve Şekil 8.3'teki tartışmamızı hatırlayın) ve dalga boyları evren genişledikçe gerilir, dolayısıyla sıcaklık ile ölçek arasında bir bağıntı vardır. Sıcaklık ile ölçek bağıntısını ölçek ile zaman bağıntısıyla birleştirerek evrenin sıcaklığının zamanla nasıl değiştiğini hesaplayabiliriz.

Bu bağlantıyı daha da ilerletebiliriz, çünkü laboratuvarlarımızdaki kendi deneyimizden sıcaklığın nasıl değişiklik doğurduğunu biliyoruz. Evrenin sıcaklığının, önce kozmik fırın, ardından ocak, sonra buzdolabı şeklinde zamanla nasıl değiştiğini biliyoruz, dolayısıyla evrenin özelliklerinin başlangıcından kısa süre sonra nasıl değiştiğini çıkarsama araçlarına sahibiz. Genel anlamıyla söylersek yükselen sıcaklığın etkisi şeyleri sallayarak uzaklaştırmaktır, sıkıca bağlı olan parçacıklar yüksek sıcaklıklarda hayatta kalırken zayıf şekilde bağlı olan parçacıklar sadece düşük sıcaklıklarda hayatta kalabilirler. Bu prensipten mutfakta da faydalanıyoruz; kızartmak ve haşlamak malzemeleri daha küçük, daha hazmedilebilir, daha güzel kokulu hale getirmeye yararken, dondurmak bozunumla sonuçlanacak tepkimeleri yavaşlatarak bu malzemeleri korumamıza yardımcı oluyor. Evrenin sıcaklığı da yemek pişirme sanatına benzer bir etki doğuruyor, fakat kozmik ocakta pişirdiğimiz malzemeler maddenin kendisi oluyor.

Üstteki paragrafta geçen "kısa süre sonra" yorum gerektiren kaçamak bir deyim niteliğinde. Şu an gözlemleyebildiğimiz evren, *Planck uzunluğu* denen ve bir metrenin 200 milyar trilyon trilyonda biri kadar bir niceliğe eşit ($1,6 \times 10^{-35}$ m, 9. Bölümde tekrar karşımıza çıkacak olan temel bir nicelik) çapta bir bölgenin içinde toplanmış olduğu sırada, şu anki fiziğimiz bocalamakta-

dır. Evren bu kadar sıkışmış olduğunda yaşanan olaylar için bir kuantum kütleçekim kuramına gereksinmemiz var. Bu kuram ortaya çıkmaya başlıyor, ama şu anda o kadar az bir güvenilirliğe sahip ki tarihimizdeki bu kuantum-yontma-taş devrini buradan ayırıp daha sonra ele alacağım. Bizim zaman fosil izimiz *Planck zamanında* cehaletin sisleri içerisinde görünür olmaya başlıyor, yaklaşık olarak başlangıçtan $5,4 \times 10^{-44}$ sn sonra, sıcaklık yaklaşık olarak $1,4 \times 10^{32}$ derecelik Planck değerine sahipken ortaya çıkıyor. Yaklaşık 15 milyar yıl öncesindeyiz: Hafızamızda canlı değil belki ama hayal edemeyeceğimiz kadar da uzakta değil. Bu kadar kısa bir süre içerisinde bu kadar çok şey yaşanmış olması gerçekten çok çarpıcı. Belki piskopos Ussher gibi Kutsal Kitap'tan dakik bir analizle İÖ 23 Ekim 4004, öğlen, tam öğle yemeği sırasında¹⁰ şeklinde kesin bir tarih veremiyoruz ama, evrenimizin evrim dinamiklerini anladıkça bizim başlangıç tespitimizin de kesinliği artıyor ve yakında başlangıcı bir milyon yıllık bir sapma aralığına falan indirmeyi umut edebiliyoruz.

Başlangıçla ilgili yanıtlamamız gereken bir nokta daha var. Bazen Büyük Patlama'nın *nerede* gerçekleştiği soruluyor. Yanıtı son derece basit ve kesindir (zaten iyi yanıtlar hep böyledir): *Her yerde* gerçekleşti. Evren bir şeyin *içerisine* patlamadı ve "büyük patlama" ifadesinin bir patlama izlenimi vermesi aslında talihsiz bir isim olduğunu da gösteriyor. Büyük Patlama bütün uzayı doldurdu: Her yerde gerçekleşti.¹¹ Evrenin daha önce bir nokta olması da ille gerekmiyor. Evren yolculuğuna eğer sonsuza dek genişleyecek şekilde (tekrar kendi üzerine çökmek üzere) başladıysa, o halde yaratılış anı dahil *her zaman* verili bir bölgenin dışında o bölgenin içine oranla daha fazla kütle olmuş demektir. Yani eğer evren sonsuza dek genişlemek üzere kurulmuşsa, "açık" ise, o halde zaten *her zaman* sonsuz olmuştur. Dolayısıyla eğer bizim şu an etkileşimde bulunabildiğimiz evren, *görünür evren* (bizden her yöne doğru yaklaşık 15 milyar ışık yılı genişleyen evren, bize şu an ancak bu kadar uzaktaki yaratılışın ışığı ulaşabilmekte) bir zamanlar sonsuz derecede küçük bir noktanın içerisinde top-

10 Sık sık ayın 26'sı sabah 9'da denilerek yanlış alıntılanır; bkz. <http://www.merlyn.demon.co.uk/critdate.htm>.

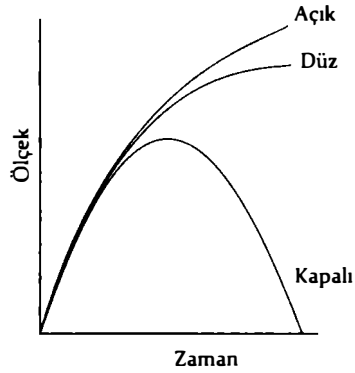
11 Belki de "explosion" (İng. dışı doğru patlama-çn.) yerine "plosion" (İng. salt patlama-çn.) sözcüğü daha uygun olurdu.

lanmış olsa bile, bu noktanın dışarısında yine sonsuz bir bölge olacaktır. Ancak ve sadece evren gelecekte uzak bir zamanda bir Büyük Çöküş yaşama anlamında “kapalı” ise (genişleme hızına ilişkin deneysel kanıtlar toplandıkça giderek daha az muhtemel görülen bir olay), bütün evrenin başlangıçta tek bir noktada toplanmış olduğunu düşünmek doğru olur.

Evrenin genişlemesinin nasıl ifade edildiğini de anlamamız gerekiyor. Bundan sonra ne muhtemelen her zaman sonsuz olan evrenin boyutlarından ne de şu an yaklaşık 15 milyar ışık yıllık bir yarıçapa sahip ama daha önce daha küçük olan görünür evrenin boyutlarından bahsedeceğim; onun *ölçeği* hakkında konuşacağım. “Ölçek” derken şu an birbirlerinden ım ayrılmış olan iki nokta arasındaki mesafeyi bağlantılandıran katsayıyı kastediyorum. Dolayısıyla ölçek 100 olduğunda bu iki nokta arasında 100 metre olacaktır; ölçek bir bölü bir milyar (10^{-9}) olduğunda iki nokta birbirinden bir metrenin milyarda biri kadar uzaktır (10^{-9} m). Einstein’ın alan denklemleri bu ölçek katsayısının zaman bağımlılığını çeşitli evren modellerinde hesaplamak üzere uyarlanabilir. Gerçekçi denebilecek ilk sonuçlar tifodan ölmeden kısa süre önce 1922 yılında Rus matematikçi, uçak pilotu, balon pilotu ve meteorolog Aleksandr Aleksandrovich Friedmann (1888–1925) tarafından bulundu. Bunlar *Friedmann denklemleri* olarak bilinmektedir (Şekil 8.4). Aynı denklemleri 1925’te Belçikalı rahip Abbé Georges Lemaître (1894–1966) de bulmuştu; kendisi bunların zamanda geriye doğru izini sürüp bizim bugün Büyük Patlama dediğimiz, onunsa “kozmetik yumurta” adını verdiği şeyi bulan ilk kişiydi.

Evren bilimciler bugün evrenin ne açık ne de kapalı, düz olduğuna inanıyorlar. Düz bir evren, ölçeğinin sonsuza dek genişlemesi anlamında açık evrene benzemektedir, ama genişlemesi ağır ağır yavaşlamakta ve ölçeği sonsuzluğa yakınsarken sonsuz yavaş hale gelmektedir. Düz bir evrende, aynı açık evrendeki gibi, şu an aralarında 1 metre mesafe olan iki noktanın en sonunda uzaklaşma mesafesi açısından herhangi bir sınır yoktur. Düz olmanın göstergelerinden biri de, açık evrende olduğu gibi, evrenin her zaman uzanım bakımından sonsuz olmuş olması ve bu nedenle Büyük Patlama’nın sonsuz bir uzay hacminde her yerde

Şekil 8.4 Bir Friedmann evreninin geçmişi. Evren belirli bir yoğunluktan azına sahipse, "açık" olacak ve sonsuza dek genişleyecektir. Evren belirli bir yoğunluktan fazlasına sahipse, "kapalı" olacak ve başlangıçtaki genişleme evresinden sonra tekrar küçülerek "Büyük Çöküş"e uğrayacaktır. Evren tam olarak kritik yoğunluğa sahipse, sonsuza dek genişleyecek ama zaman sonsuzluğa yakınsarken durmaya doğru kayacaktır.



Mevcut ölçümler evrenin kapalı olmadığı fikrine güç veriyor. Evrenin açık ve yakınlarda bir hızlanma evresine girmiş olduğunu destekleyen yeni gözlemler kanıtlar var.

gerçekleşmiş olmasıdır. İnsanlar evrenin başlangıçta çok küçük olduğunu söylerken, ölçeğin ilk başta aşırı derecede küçük olduğunu ve şimdi 1 metre uzakta olan iki noktanın o zamanlar birbirinden metrenin çok çok küçük bir kesri kadar uzakta olduğunu söylemek istiyorlar (ve söylemek istiyor olmaları gerekir). Devasa bir miktar çok küçük bir bölgeye sıkıştırılmış olduğunda bunun çok yoğun olduğunu anlayabilirsiniz; aslında bu sudan yaklaşık olarak 10^{97} kat daha yoğundur. Her yer bu yoğunlukta idi, sonsuz bir bölgedeki her yer bu yoğunlukta idi. O zaman da acayip büyük bir evren vardı, her zaman vardı ve her zaman olacak.

Kimi zaman insanların kavramakta zorlandığı noktalardan biri de, evrenin ölçeği zamanla artıyor olsa da, bunun içerdiği nesnelerin daha büyüdüğü anlamına gelmemesidir. Ne bizler ve ölçüm aletlerimiz ne de bir galaksi içerisindeki yıldızlar arasındaki mesafeler zaman geçtikçe genişlemez. Bazen kafa karıştırıcı olabilen bu hususu anlamamanın çeşitli yolları var. En basiti şu: Genişlemeyi betimleyen Friedmann denklemlerinin maddenin bütün bir evrende ortalama yayılmış olarak görüldüğü, galaksilerin de uzaydaki yerlere işaret eden varsayımsal noktalar olarak görüldüğü bir modele dayandığı görüşünü kabul edeceksiniz. Ölçeğin genişlemesi yalnızca bu "ortalama evrene" karşılık gel-

mektedir ve uzayda yer alan küçük sistemlerin davranışına karşı kayıtsızdır. Aynı varlığa ulaşmanın bir başka yolu da şudur: Eğer iki nokta, örneğin bir galaksideki iki yıldız birbirlerine çekici bir kuvvetle bağlanmışlarsa, bu durumda evrenin genişlemesi söz konusu kuvvete baskın gelmez ve noktalar ne kadar uzun beklersek bekleyelim aynı mesafede kalır.

Bu şaşırtmacalı ama önemli konuda düşünmenin daha sade bir yolu da Friedmann denklemlerinin bize iki noktanın birbirinden nasıl uzaklaşacağını *ilk başta birbirlerinden uzaklaşıyor olmaları şartıyla* söylediğini düşünmektir. Bu biraz ilk başta ne hızda ilerlediğini bildiğimizde bir topun alacağı mesafeyi nasıl hesaplayacağımızı söyleyen Newton'ın hareket denklemlerine benzemektedir. Top durağansa, ne kadar beklersek bekleyelim aynı yerde kalacaktır. Benzer biçimde eğer uzayda iki nokta (kafanız ve topuklarınız) ilk başta birbirlerinden uzaklaşmıyorlarsa, ne kadar beklersek bekleyelim hep aynı görelî konumlarda kalacaklardır. Klasik fizikte durağan bir top başka bir yere gittiğinde ne kadar geriliyorsa, biz de evrenin genişlemesiyle o kadar geriliyoruz.

Bu noktalara dikkat çektikten sonra şimdi tarihimizle hesaplaşabiliriz. Planck zamanında maddeyi bir arada tutan tüm kuvvetlerin (6. Bölümde bahsettiğimiz kütleçekim kuvveti, elektrozayıf ve yeğîn kuvvetler) aynı yeğînliğe sahip olduğu, ama evren soğuyarak Planck sıcaklığının altına düştüğünde kütleçekim kuvvetinin diğer ikisinden ayrıldığı varsayılmaktadır. Bu ikisi aynı yeğînliklere sahip olmaya ve kütesiz bozonlarla yayılmaya devam etmiştir. Sonra çağlar geçmiş, hiçbir şey olmamıştır. Kesin konuşmak gerekirse elektrozayıf ve yeğîn kuvvetler Planck saatinin 10 milyar tıklamaması boyunca, Patlama'dan saniyenin milyar trilyon trilyonda 1'i (10^{-33} sn) diyebileceğimiz bir süre sonrasına dek bu eşit yeğînliklerini muhafaza ettiler. Bizim insan hayatını kolaylaştırmak üzere tasarlanmış hantal saatlerimizin tıklamalarını kullanmak yanıltıcı olur; evren çok genç, çok sıcak ve çok yoğunken yaşanan olayların tartışılmasında belediye binasındaki saatlerin tıklamaları uygun olmaz. Evrenin ilk baştaki ge-

nişlemesi doğal birimlerle, Planck tıklamalarıyla ölçüldüğünde başlangıçta son derece (Valium almış cıvık mantar gibi) yavaştı; bu bakış açısından bakıldığında biz hantal, mecalsiz devler göz açıp kapayıncaya kadar diyebileceğimiz bir sürede nasıl bu kadar çok değişimin gerçekleşebildiğini anlayabiliriz.

Bu muazzam zaman (10 milyar Planck tıklaması, bizlerin bir saniyenin 1 milyar trilyon trilyonda 1'i dediğimiz bir süre) geçtikten sonra sıcaklık yeğın kuvvetin elektrozaıf kuvvetten ayrılmasına yetecek ölçüde düştü, bundan böyle bu soğuk evrende bu ikisi bir daha hiç ilişkili gözükmeyeceklerdi. Evrendeki olaylar bir kez daha askıya alınmış gibiydi. Evren genişlemiş ve sıcaklığı düşmüştü, ama bu olağanüstü tembel dünyada fark edilebilir bir şeylerin olması için neredeyse sonsuza dek (kesin söylersek Planck'ın saati 10^{30} kere tıklayana dek) beklemek zorunda kaldık. Bu beklemeyi bir saniyenin on trilyonda biri (10^{-13} sn) olduğu için yine göz açıp kapayıncaya kadar geçen bir süre olarak düşünmeye eğilimli olabilirsiniz, ama bu erken evrendeki olayların müthiş yavaşlığı konusunda yanlış bir izlenim edinmenize neden olur ve bu kadar kısa sürede nasıl herhangi bir şey olabilir diye düşünürsünüz. Bu ana dek evrenin ölçeğı 10^{15} Planck uzunluğuna ulaşarak inanılmaz bir biçimde genişlemiştir. Elbette sonraki çağlara daha uygun olan birimlerle ölçüldüğünde bu 1 metreden yalnızca 10^{-20} m kadar bir uzaklaşma olduğu için bunun çok küçük olduğunu düşünüyoruz ama tarlalarda kullanılan birimler bu değerlendirmeye için hiç uygun değildir ve çok aldatıcı olur. Evren böylece 10 bin trilyon dereceye (10^{16} K) dek soğudu ve bu soğukta yönsüz parçacıklar (belki de Higgs bozonlarıydılar) W ve Z ayar bozonlarına yapışarak onlara kütle verdiler ve böylelikle erişimlerini sınırlandırarak zayıf kuvveti elektromanyetik kuvvetten ilelebet ayırdılar. Evren artık kuvvetlerin birbirlerinden sonsuza dek farklılaşarak ayrı kimlikler edinebilmelerini sağlayacak kadar soğuktu.

Hâlâ ortada madde olarak tanımlayabileceğimiz bir şey yoktu: Sıcaklık hâlâ olağanüstü yüksekti ve ısıl hareket kuvvetlerin etkisiyle bir araya gelebilecek her şeyi sallayarak parçalıyordu. Cehennem yangınından sıcaklık düşünce billurlaşıp dışarı çıkan ilk madde formları nükleonlardı (protonlar ve nötronlar) ve ku-

arkların yeğın kuvvet tarafından bir arada tutulmasıyla oluştular. Bu kaynaşma sadece sıcaklık 10 trilyon derecelik (10^{13} K) olağüstü bir soğuşa indiğinde gerçekleşebilirdi. Soğuk mu dedim? Planck ölçeğinde mutlak sıfırın sadece 10^{-19} Planck derece üzerinde olduğı için aslında epey soğuk sayılır. Elbette bizim gündelik sıcaklık ölçeğimizle feci bir sıcaktır, ama söz konusu ölçek bizim dünya üzerinde sahip olduğumuz hava durumunu aktarmak için icat edilmiştir ve temel değildir, bu kadar temelse hiç değildir.

Şimdi temel birimler cinsinden konuşma ısrarımı bırakıp evrenin evriminin bu aşamasında Planck'ın doğal birimlerinden çok daha pratik oldukları için tarla birimlerine yeniden döneceğim. Fakat geleneksel birimlerde göz açıp kapayıncaya dek geçen zamanın aslında ölçülemez denebilecek uzunlukta çağlar anlamına geldiğı de aklınızın bir köşesinde bulunsun. Bize kısa görünen şey doğal, temel birimlerde sayısız olayın art arda yaşanması anlamına gelebilir. Ses hızında hareket eden bir merminin bir atom çekirdeğinin enini aşması yüz trilyon trilyon (10^{26}) Planck tıklamasıyla sonsuzluğa benzer bir süre tutar.

Başlangıçtan bir saniye sonra nötrinolar maddeden ayrıştılar (sallanarak kendilerini özgürleştirdiler). Bir daha asla onunla gözle görülür biçimde etkileşime geçmeyecek ve o andan itibaren evrende neredeyse engelsiz şekilde uçacak, uzayda serbest şekilde hız yaparak neredeyse mükemmel saydamlıkta kristal kürelermişcesine gezegenlerin içerisinden geçeceklerdi. Nötrinolarla, neredeyse spinli çeşnili kütesiz parçacıklar la gören gözlerle sahip olsaydık, sadece arada bir hayaletlerin gölgesine rastladığımız dünyanın boş olduğunu düşünürdük.

Nötrinolar ilk ayrıştıklarında sıcaklıkları sayesinde evrene damga vurdukları ve evrenin genişlemesinin sürmesi onları daha az soğutacağı için ilk düşünüşte nötrino göklerinin foton göklerinden daha parlak olmasını bekleyebiliriz. Ama nötrino ardalanı mutlak sıfırın 2 derece üstünden biraz az sıcaklığıyla aslında mikrodalga ardalanından daha soğuktur.¹² Nötrino göğünün daha soğuk olmasının nedeni çeşitli olayların, özellikle de elektronların karşı-parçacıkları pozitronlarla çarpışmasının

12 Nötrino ardalanının sıcaklığının foton ardalanındakinden $(\frac{4}{11})^{1/3}$ kat farklı olması beklenmektedir, bu da foton ardalanının 2,73 K sıcaklığıyla karşılaştırıldığında onun 1,95 K sıcaklığına sahip olması demektir.

fotonların sayısını ve mikrodalga göğünün parlaklığını ve bu nedenle de sıcaklığını artırmış olmasıdır.

Başlangıçtan üç dakika sonrasında sıcaklık 1 milyar dereceye düşmüştür. O kadar soğuktur ki (10^{-23} Planck derecesinde) bu arktik koşullarda nükleonlar bile birbirine yapışarak döteryumu (ağır hidrojen, bir protona yapışmış bir nötrondan oluşan bir çekirdeği vardır) ve helyumu (iki proton ile iki nötron birbirine yapışmıştır) oluşturabilmektedir. Yapılan hesaplamalara göre sıcaklığın düşmeye devam etmesiyle evrenin bu çağının sonunda yaklaşık olarak yüzde 23 helyum, yüzde 77 hidrojen (birleşmemiş protonlar) ve birazcık daha ağır elementlerden de çok az bir miktar (örneğin sırasıyla üç ve dört protona sahip lityum ve berilyum ve dayanmayı ve protonları birbirine yakın tutmayı başaran birkaç nötron) ortaya çıkmıştır. Helyumun çokluğu nötrino türlerinin sayısına kritik biçimde bağlıdır ve dörtten daha büyük bir sayıyla uyusmaz. 6. Bölümde gördüğümüz gibi bu kısıtlamayla uyumlu olduğu bilinen üç nötrino çeşnisi vardır. Belki de daha önemlisi çok büyüğün (bu örnekte evrendeki helyum bolluğunun) çok küçüğün araştırılmasından doğan fikirlerin sonucu olduğunu görebiliyor olmamızdır. Bilim sahasında güven aşıl原因an şey de çok büyük ile çok küçükten doğan bilginin bu karşılıklı uyumluluğudur.

Bundan sonra çağlar boyunca hiçbir şey olmuyor. Evrenin bileşimi, tarla birimleri ile söyleyebileceğimiz bir yüz bin yıl boyunca hemen hemen aynı kalıyor. Evren bu süre boyunca genişlemeye ve soğumaya devam ediyor ama bir plazma, elektron denizinde yüzen bir çekirdek sürüsü olarak kalıyor. Bu haliyle evren parlak biçimde sıcak olsa da bugün gördüğümüz Güneş gibi opak değildir, çünkü ışık bu tür bir ortamın içerisinde sadece kısa mesafeler katedebilir. Aynı nedenle Güneş opaktır, saydam bir top değildir.¹³ Bir foton Güneş'in merkezinden yüzeyindeki özgürlüğüne ulaşana kadar yaklaşık 10 milyon yıllık yorucu bir yolculuk geçirir. Bir saniyenin her bir kesirinde soğurulur ve yeniden yayılır, önce bir yönde sonra diğer yönde ilerler. Işık ancak bu bataklık şeklindeki plazmadan ayrışıp da boş uzaya girdiğin-

¹³ Metaller de aynı nedenle opaktır. Onlar da bir elektron deniziyle çevrili çekirdeklerden oluşur, erken evrenden farkı çekirdeklerin düzenli bir dizilişte olmasıdır.

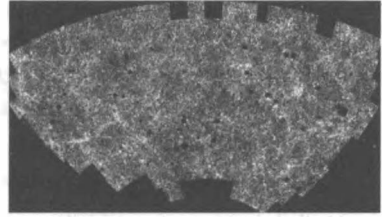
de, coşkuyla ışık hızında uçup gidebilir. Güneşin merkezi bugün ölmüş olsa, ışığı daha bir 10 milyon yıl boyunca yayılmaya devam eder. Erken evrende de ışığın neredeyse içinden geçilemez, parlak plazmanın içerisinde tırnaklarıyla kazıya kazıya, milim milim ilerlediği benzer koşullar vardı.

Birden, bundan yüz bin yol sonra gök bulutlu bir yaz günündeki gibi aniden aydınlandı: Evren geçirgenleşti ve ışık yolculuk özgürlüğü kazandı. Gökyüzü aydınlandığında görülecek pek bir şey yoktur; hatta henüz yıldızlar oluşmamış olduğu için görülecek hiçbir şey yoktur, ama bu tarihimiz açısından hayati bir andır. Göğün bu aydınlanmasında kutup soğuğu 10 bin dereceye (10^4 K) dek düştü ve bu donma koşullarında sonunda elektronlar çekirdeğe yapışma olanağı elde etti. Plazma yoğunlaşarak nötr atomlara evrildi, daha önce özgürken şimdi yakalanan elektronlar o kadar etkili ısıma saçamamaya başladı ve ışık boşluktan engelsizce geçebildi.

Maddeye olan esaretinden kurtulan elektromanyetik ısıma (ışık) şimdi 10 bin derecede bugünkü Güneş'in yüzeyine benzer şekilde parlak biçimde sıcaktır ve etrafımızdaki her şey bu yakıcı parlaklıkla doludur. Bu karanlık olmayan gecede, Kepler'in mesajını ileten Olbers'i mutlu edecek şekilde her yer fotosferdir. Evren genişlemeye devam ettikçe bu ışık gerinerek bugün etrafımızı saran mikrodalga ardalana dönüşür. Daha önce gördüğümüz gibi mevcut gökyüzü hâlâ yanan kızgın bir fırındır ama sıcaklığı mutlak sıfırın 2,7 derece üstüne dek düşmüştür. *Kozmik ardalın ışıması* mikrodalga bölgesinde doruğa ulaşır: Onu görmemiz, gözlerimizin yardımına radyo teleskopları koşup saptayıcılarımızı dokunup geçen dalgaların hafif tıslamasını dinlemediğimiz müddetçe mümkün değildir.

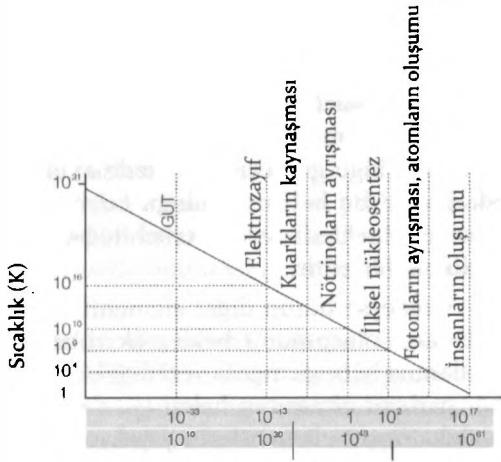
Sonunda evrende atomlar oluşur. Öyle çok bol olmadıkları gibi fazla çeşitliliğe de sahip değildirler. Bugün var olan madde nin ortalamasını alıp bütün evrene yaysaydık, bu durumda bir metrekübe sadece bir hidrojen atomu düşerdi. Büyük Patlama'nın hemen ardından gelen bu çağda ortaya çıkan elementler yalnızca hidrojen (bol miktarda), helyum (bol miktarda ama hidrojen den az) ve diğerleriyle karşılaştırıldığında azıcık bir miktar

Şekil 8.5 Galaksilerin Dünya'dan bakıldığında görülen dağılımı. Her nokta bir galaksinin yerini temsil etmektedir. Dağılımın tekdüze olmadığına dikkat edilmelidir: Uzun galaksi çizgileri ve ortalama galaksi sayısından daha az galaksiye sahip dev bölgeler vardır. Bu ayrışıklıklar ilksel evrendeki yoğunluk dalgalanmalarının devasa şekilde büyümüş kalıntılarıdır.



da lityum ve berilyumdur. Artık üç dakikayı geride bırakmış olan evren inanılmaz تنها ve ilkel bir yerdir.

Bir milyar yıl daha böyle olmaya devam edecektir. Fakat evren olağanüstü bir çeşitlilik potansiyeline sahiptir ve bu potansiyel ağır ağır gerçekleşmeye başlamıştır. Daha sonra ele almayı unutmamak zorunda olduğumuz nedenlerden dolayı ilksel evren mutlak düzlükte değildi. Bazı bölgelerde hidrojen atomları ve helyum atomlarından oluşan ilksel gaz ve ileride ele alacağımız evrenin gizemli kara maddesi diğer yerlerden biraz daha yoğundu: Dağılımında hafif dalgalanmalar vardı. Evren yaşlandıkça daha yoğun bölgelerdeki gaz kütleçekimin etkisiyle yoğunlaşmaya başladı. Bu yerel yuvarlı bölgeler oluştuğunda ve gaz sıkışık hale geldikçe sıcaklaştı. Bir süre sonra o kadar sıcak hale geldiler ki hidrojen atomlarının çekirdekleri büyük bir kuvvetle çarpıştılar ve enerji salarak kaynaştılar. *Nükleer füzyon* başlamıştı, yıldızlar parlamaya başladı ve galaksi dediğimiz yıldız kümeleri patlayarak hayat kazandı. Dalgalanmaların daha yoğun bölgelerine işaret ettikleri için galaksilerin dağılımı rastlantısal değildir: Yıldız kümeleri ve büyük boşluklar, kaplam olarak yüz milyonlarca ışık yıllık bir ölçekte uzanmaktadır (Şekil 8.5). Bu muazzam örüntü evrenin başlangıcına işaret eden dalgalanmaların büyütülmüş halidir; yoğunluklar birkaç Planck uzunluğundaki ölçeklerinden bugünkü muazzamlıklarına dek esneyerek uzamışlardır. Evrenin



Zaman (saniye ve Planck tıklaması cinsinden)

Şekil 8.6 Evrenin ömrü boyunca yaşanan olayların zaman ölçeği. Şişme dönemindeki sıcaklık halen tartışma konusudur ve grafikte varsayılan zamana doğrusal bağlılık kelimenin gerçek anlamıyla yorumlanmamalıdır. GUT devrinden sonra yeğin kuvvet elektrozayıftan ayrılmakta; elektrozayıf devirden sonra zayıf ve elektromanyetik kuvvetler birbirinden ayrılmaktadır. Anılan sıcaklıklar elektromanyetik alanın sıcaklığıdır ve insanlar elektromanyetik alan çok daha soğuk olmasına karşın yerel çevre 300 K'ya yaklaştığında oluşmuştur.

bu aşamaya ulaşması 15 milyar yıl almıştır, ama bizim ilgisiz (bir küçük gezegenin bir küçük yıldız etrafında kaç kez dönmüş olduğu neden önem taşısın ki?) insan birimlerimizle bakıldığında hayli kısa bu dönem Planck'ın daha temel saatindeki zaman akışında muazzam büyüklüktedir ve en az 10^{61} tıklama eder (Şekil 8.6).

Kadim yıldızlar hidrojenден oluşmaktadır, fakat nükleer füzyon sürecinde hidrojen tüketirken yeni elementleri oluştururlar. *Nükleosentez* dediğimiz elementlerin oluşumu başlamış ve evren daha çeşitli hale gelmeye başlamıştır. Evrenin hayatının çok erken döneminde, daha yıldızlar oluşmadan önce elementlerin oluşmasına *ilksel nükleosentez* denir. Fazla uzun sürmemiş olmasının nedeni döteryum (bir nötron yeğin kuvvetli tırnaklarıyla bir protona tutunur), helyum (iki proton ve iki nötron nispeten kararlı bir düzendedir) vb çekirdeklerin protonlara ardı ardına

nükleon eklenmesiyle oluşmuş olmasıdır. Ne var ki beş ve sekiz nükleonla kararlı çekirdek olmaz, dolayısıyla bu aşamada darboğaz oluşur ve çarpışmaların sonucunda daha ağır çekirdeklerin oluşması zorlaşır. Bu aşamada en bol oluşan element helyumdur, o sırada da şimdi olduğu gibi evrenin yüzde 23'ünü kaplar, geri kalan da hidrojenidir. Bu helyum bolluğu Büyük Patlama kuramından öngörülebilmektedir ve deneysel doğrulanması kuram açısından güçlü bir destektir.

Evrendeki neredeyse bütün diğer elementler gün yüzü görmek için yıldızların oluşumunu beklemek zorundaydı. Burası nükleer fizik alanına iyice girmenin yeri değil, sadece yıldızların -Güneş dahil- parlıyor olmasının halen (ya da en azından yaklaşık sekiz dakika önce) elementlerin yapılıyor olduğuna işaret ettiğini söylemekle yetinelim. Gökbilimci Arthur Stanley Eddington (1882-1944) yıldızların yakıtının hidrojen çekirdeklerinin çarpışması ve kaynaşarak helyum oluşturmaları sonucunda serbest bırakılan enerji olduğunu söyleyen ilk kişidir.

Yıldızlar, gökte salınan kızgın sıcak maddeden oluşmuş ve rahatça nükleer füzyon geçiren dev küreler olmalarından da tahmin edilebileceği üzere çok tehlikeli cisimlerdir. Hızlı ateşlenip ağır ağır sönen çakmaklar gibi sorunsuzca yanmazlar. Yıldızın derinliklerindeki kabuklarda gerçekleşen nükleer tepkimeler, bu kabukların büyümesi, küçülmesi, çökmesi ve yıldızın dış katmanlarını kopartıp uzaya üfleyen enerji atımlarıyla dolu şiddetli bir öyküleri vardır.

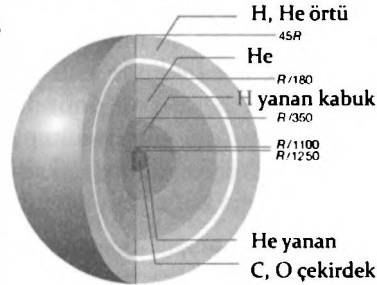
bir gaz bulutu olarak başlar. Bu bulutun kendisini kütleçekim etkisi altına sokup sokmayacağı yoğunluk, sıcaklık, kütle gibi bir dizi etmene bağlıdır. Belirli bir sıcaklık ve yoğunlukta yıldız oluşturabilecek en küçük gaz kütlesine, yıldızların oluşumu üzerine çalışmalar yaparak kuramlar geliştirmiş astrofizikçi James Jeans'in (1877-1946) adından yola çıkılarak *Jeans kütlesi* denir. Yayılmış bulutlar, sahip oldukları düşük yoğunlukla tipik olarak kütleçekim çökmelerine karşı dayanıklıdır ve yıldız oluşturmaz. Fakat yoğun bir bulut çökecektir ve hidrojen ve helyumdan oluşan tipik bir bulut için Jeans kütlesi yaklaşık on yedi Güneş büyüklüğündedir. Ne var ki bulut kendi üzerine çökerken yoğunluğu artar, Jeans kütlesi düşer ve tek bir dev

yıldız oluşturmak yerine bulutun küçük bölgeleri de kütleçekim çökmesine uğrayabilir ve böylece bulut parçalanarak daha küçük yıldızlardan oluşan bir yıldız kümesi oluşturur. Güneş'in ancak onda biri kadar kütleli potansiyel yıldızlar çekirdek tepkimelerinin başlamasına yetecek kadar sıcak olmaz ve ölü doğarlar: Asla parlamazlar. Güneş'ten yaklaşık doksan kat daha kütleli potansiyel yıldızlar da kararsızdır: Salınıma girer ve parçalanırlar. Dolayısıyla bütün yıldızlar bu iki sınır arasında kütlelere sahiptir.

Kaderinde yıldız oluşturmak olan gaz (esasen hidrojen ve helyumdur) ortak bir merkeze doğru düşüşe geçer. Atomlar düşerken birbirlerine sürtünür ve bu çarpışmalar sıcaklığın artmasına neden olur. Çöken buluttaki sıcaklık artışında öyle bir aşamaya gelinir ki çekirdekler büyük bir şiddetle çarpışarak erir ve helyum oluşturur, helyum çekirdekleri de birbirine çarparak daha ağır elementleri oluşturur. Güneş'ten yaklaşık olarak yüzde 20 daha kütleli yıldızlarda sıcaklık daha da yükseğe çıkabilir. Yaklaşık 20 milyon derecenin üzerinde parçacıklar protonların başarıyla karbon, azot, oksijen gibi daha yüksek yüklü çekirdeklere çarpabileceği kadar hızlı hareket eder ve yakalanınca da dışarıya enerji salarlar.

Yaklaşık olarak sekiz Güneş'ten daha büyük yıldızları şiddetli bir gelecek bekler. Bu devlerde sıcaklık o kadar çok artar ki (yaklaşık 3 milyar dereceye kadar) "silikon yanması" gerçekleşir, yani helyum çekirdekleri silikona yakın çekirdeklerle birleşebilir ve daha ağır elementleri oluşturarak, nihayetinde demir ve nikel oluşturana dek periyodik tabloda ilerler. Bu iki element tüm elementler içerisindeki en kararlı çekirdeklere sahiptir ve nükle-

Şekil 8.7 Yaklaşık beş Güneş kütleli tipik bir yıldızın karbon-oksijen çekirdeğiyle kırmızı dev aşamasına yaklaşırken sahip olduğu iç yapı. Anlaşılır olması için iç kabukların etki alanları yüzeye oranla arttırılmıştır (beyaz çizgi ölçek değişimine işaret etmektedir).



er füzyon yoluyla enerji salımı durur. Bu aşamada yıldız soğana benzer bir yapıya sahiptir, en ağır elementler demirden çekirdeği oluştururken daha hafif elementler sırasıyla onun etrafındaki kabuklarda yer alır (Şekil 8.7). Aktarılan bölümlerin her birinin süresi yıldızın kütlesine kritik şekilde bağlıdır. Güneş'in yirmi katı kütleyle sahip bir yıldızda hidrojen yakma çağı 10 milyon yıl sürer, ardından onun yerini merkezdeki helyum yanması alır ve bir milyon yıl sürer. Bunun ardından yakıtlar çekirdekte çok ciddi bir hızla yanar. Bu aşamada karbon yanma 300 yılda tamamlanır, oksijen 200 gün sürer, demirle sonuçlanan silikon yanma evresi ise bir haftada biter.

Artık yaklaşık 8 milyar dereceye ulaşan çekirdekteki sıcaklık o kadar yüksektir ki ışıınım fotonları, demir çekirdeklerini patlatıp proton ve nötronlarına ayırmaya ve böylece nükleosentezin başarması milyarlarca yıl süren çalışmasını bozup geriye almaya yetecek kadar enerjik ve çoktur. Bu adımla enerji çekirdekten ayrılır ve çekirdek aniden soğur. Çekirdeğin yapısı artık korunamaz hale gelir ve çekirdek çöker. Çekirdeğin dış kısımları serbest düşüştür ve çökme hızları saniyede neredeyse 70 bin kilometreye ulaşabilir. Bir saniye içerisinde Dünya büyüklüğünde bir hacim çökerek Londra kadar kalır. Bu fevkalade hızlı çöküş yıldızın daha dıştaki kısımlarının ayak uyduramayacağı kadar hızlıdır, dolayısıyla kısa süre sonra yıldız, dış kısımları çökmüş olan çok küçük çekirdeğin üzerinde asılı kalmış oyuk bir kabuk haline gelir.

Çöken iç çekirdek küçülür, ardından dışa doğru atılarak çekirdeğin dış kısımlarından geçecek olan nötrinolardan oluşmuş bir şok dalgası yollar. Bu şok dışarı iletlediği ağır çekirdeklerin daha da yanmasına sebep olarak çekirdeğin dış kısmını ısıtır ve enerji kaybeder. Dış çekirdeğin fazla kalın olmadığı durumlarda, başlamasından 20 milisaniye sonra şok çekirdeğin üzerinde büyük bir kemer şeklinde asılı duran yıldızın dış kısımlarından dışarı çıkmayı başarır ve önündeki yıldız malzemesini devasa bir küresel tsunami gibi dışa iter. Yüzeye ulaşınca da, bir milyar Güneş parlaklığıyla yıldız galaksisini bir *II tipi süpernova* olarak (Şekil 8.8)¹⁴ ışığa boğar ve yıldız malzemesini uzaya dağıtır.

14 I. Tip süpernovaları daha sonra ele alacağız.



Şekil 8.8 II. Tip bir süpernovanın kalıntıları (Vela kalıntısı). Bu süpernova yaklaşık 11 bin yıl önce gerçekleşti ve maddenin (yıldızın içerisinde oluşan elementlerin) evrene yayılma biçimini görebiliyoruz. Vela (Yelken) Samanyolu'nun güneyinde parlak bir takımyıldızdır; eskiden Argo Navis, İason'un gemisi takımyıldızının bir parçası olduğu düşünülürdü. Farklı süpernova tiplerinin ayırt edilmesi çok zordur.

Bir yıldızın ölümü evrene hayat verir. Yıldız patlamasının ardından sıkıştırılmış çekirdek, nötronlardan oluşan son derece yoğun, pürüzsüz ve küçük bir cisim olan *nötron yıldızına* dönüşür, hatta eğer yıldızın ilk baştaki kütlesi yaklaşık yirmi beş Güneş kütlesinden daha büyükse, ışığın bile kaçamayacağı kadar sert bir kütleçekim çekmesine sahip bir bölge olan *kara delik* halini alır. En azından kısa vadeli olarak bundan da önemli olan şarapnel parçalarıdır, çünkü yıldızın içerisinde ilksel hidrojen ve helyumdan pişip kavrulan elementler bu yolla galaksiye saçılır. Bu elementler yeni nesil yıldızların yaratılmasında kullanılabilir. Bazıları da toz şeklinde toplaşır, toz toplaşarak taş halini alır, taş kayalara, kayalar da toplaşıp gezegene dönüşür. Konuksever bir yıldızın etrafında Dünya'nın Güneş etrafında olması gibi oluşan gezegenler bugün yaşamın yapıtaşları açısından zengindirler ve en az bir yerde kesin biçimde, çok sayıda yerde de neredeyse kesin biçimde var olan yaşam da kendi büyük kozmik ve küçük yerel geçmişini keşfetme becerisini kazanmıştır (1. Bölüm). Bizleri yıldız ışığı yarattı:¹⁵ Kozmik şiddetten ağır ağır bilim, sanat ve haz doğdu.

Şimdi yeniden başlangıca dönelim. Tarihimizin Büyük Patlama'yla açıklanması büyük başarılar elde etti. Buna dayalı öngörüler gözlemlerin yapılabildiği alanlarda niceliksel olarak

¹⁵ "İnsan yıldız tozudur" diyecektim aslında ama bu o kadar çok yerde söylendi ki bu harika ifadeye dipnotta yer vermek daha uygun düştü. Sanırım ilk söyleyen Nigel Calder'di.

gözlemle uyumlu çıktı ve genel olarak bu tarih okumasının doğru olduğundan pek az şüphe duyuluyor. Fakat kuramda bir dizi zorlukla da karşılaşılıyor ve tartışma tümüyle kapanmış değil.

Birincisi “evrenin genişlemesi”nin aslında birbirine görelî olarak hareket eden iki noktanın zaman geçtikçe daha uzaklaşacağı anlamına geldiğini görmüştük. Aslında kuramın tüm söylediği şey, eğer iki nokta şu anda hareket ediyorsa bunların daha sonra da hareket ediyor olacağı. Kuram içerisinde ilk başta bunların neden hareket ettiklerine ilişkin hiçbir açıklama yok!

İkincisi evrenin farklı parçalarının birbirleriyle iletişime geçmek için zamanları olmaması gerçeğine rağmen evren olağanüstü bir biçimde düzgün. Bu hususu anlayabilmek için görünür evren içerisinde iki noktanın biz ortada olmak üzere zıt yönlerde birbirinden 15 milyar yıl uzakta olduğunu düşünün. Işık her iki noktadan bize ulaşmak için gerekli zamana yeni sahip olmuştur, ama ikisinin arasında 30 milyar yıl olduğu için ışık bu iki nokta arasında yolculuk etme zamanına sahip olmamıştır. Hesaplamayı dikkatle yaparsak gökyüzü, ışık hızında sinyal değişimi yapma zamanı bulamamış olan her biri yaklaşık 1°lik açıyla yüz bin küçük parçaya bölünmüş olarak düşünülebilir. O halde niçin gökyüzü nereye bakarsak bakalım hemen hemen tam olarak aynı sıcaklıkla (2,7 derece) bu kadar düzgündür? Buna *ufuk problemi* denir; daha önce temasta bulunmadıkça iki sıcak demir bloğu aynı sıcaklığa sahip olmaz, aynı şekilde evrenin her bir parçasının bir anlamda doğrudan ufkunda yer alan bölgelerle bir biçimde iletişim kurabilmesi gerekir, aksi halde şu anda gözlemlenen evren bu kadar düzgün olmazdı.¹⁶

Üçüncüsü evrenin şeklinde bir acayiplik vardır. Aslında şekli iki kere acayıptır. Bir acayiplik evrenin *tam da* sonsuza dek genişleyecek şekilde görünmesini sağlayan, *neredeyse* tam olarak gerekli madde miktarına sahip olmasıdır. Bu ölçüt evrenin hemen hemen *kritik yoğunluğa* sahip olduğu şeklinde ifade edilir. Diğer acayiplik evrenin tam da doğru miktarda maddeye sahip gibi gözükmemesidir: Evrendeki madde miktarına ilişkin yapı-

¹⁶ Daha net ifade edersek bir noktanın ufkı, ışığın ona evrenin şu anki yaşı içerisinde yolculuk etmiş olabileceği mesafede bulunur. 10⁻⁸ sn yaşındaki bir evrende bir noktanın ufkı 3 metre uzaklıktadır.

lan son tespitler, kritik yoğunluğun yaklaşık olarak yüzde biri kadar çıkmaktadır.¹⁷ Gözlemlenen yoğunluk ile kritik yoğunluk arasındaki farkın evren genişledikçe arttığına ve şu ana dek, başlangıçtan 15 milyar yıl sonrasında bu farkın devasa biçimde katlandığına inanmamız için çok iyi kuramsal nedenler var. Örneğin evren bir saniyelikken eğer fark 10 bin trilyonda bir (10^{-6}) ise, şimdi fark sadece on ila yüz kat değil, olağanüstü olacaktır. Ne kadar geriye gidersek, gereklilik o kadar sıkıdır. Yoğunluğun şu anki kritik değerinin yakınlarında bir yerde olabilmesi için, Planck saatinin bir tıklamasından sonra farkın 10^{60} 'da 1'den daha fazla olmaması gerekir! Bu rakamlar yoğunluğun evren doğduğunda tam olarak kritik değerinde olduğuna ve o zamandan beri aynı değerde kaldığına güçlü bir biçimde işaret ediyor. Bu hayret verici gerekliliğe *düzlük problemi* denmektedir ve daha genel bir nitelikteki *ince ayar* probleminin parçasıdır. İnce ayar problemi evrenbilimcilerin aklını karıştırmaya devam ediyor; içlerinden daha duygusal bir mizaca sahip olanların aklına da, yoğunluğun ilk başta tam da kritik değerde olmasından birisinin emin olması gerektiği ve bütün diğer parametrelerin de evrenin ilk baştaki tanımlanışında belirli, özel ve sonucunda (bizim için) faydalı değerlere atanmış olmak zorunda olduğunu getiriyor.

Bununla bağlantılı bir sorun da, tam da bu kritik yoğunluğun kritik değerine ulaşmak üzere olduğu devirde canlı olabileceğimizi bulmanın fazlasıyla şaşırtıcı olmasıdır. Yoğunluğun her zaman ve şimdi de tam olarak kritik değerinde olması çok daha olasıdır.¹⁸ Durum böyleyse, o halde ölçülen yoğunluk kritik yoğunluktan ciddi derecede az olduğu için, buradan evrendeki maddenin hepsini saptamamış olduğumuz sonucu çıkar. Galaksilerin döndüğü hızdan çıkardığımız bu sonucu destekleyici başka kanıtlar da vardır; buna göre yıldızları sayarken gördük-

17 Yoğunluk kritik yoğunlukta $\Omega = 1$ olmak üzere Ω (omega) parametresi cinsinden gösterilir. $\Omega > 1$ olduğunda evren kapalıdır, $\Omega < 1$ olduğunda açıktır. $\Omega = 1$ olduğunda düzdür. Ölçeği sonsuzluğa yakınsarken genişleme hızı azalarak sıfıra doğru gider.

18 Eğer yoğunluk ilk başta kritik değerdeyse, bu durumda ilk başta $\Omega - 1 = 0$ 'dır ve o'nun ne kadar büyük olursa olsun herhangi bir katsayıyla çarpımı $\Omega - 1$ 'in bütün diğer zamanlarda 0'a eşit olmasına neden olur ve bu yüzden şimdi dahil her zaman $\Omega = 1$ 'dir.

lerimizden daha fazla madde içermektedirler ve yoğunluğa dair şu anki tahminler buna kritik değerin en az yüzde 20'sini ekler. Bu *kara madde* nedir ve nerededir? En basit yanıt eski, ölü yıldızların enkazlarından oluşmasıdır. Kara maddenin biçimi bu olsaydı, Güneş büyüklüğünde her bir yıldız için Jüpiter büyüklüğünde en az binden fazla cismin olması gerekirdi. Arı kovani misali bu tip cızırtıyı bir kere olsun duymamız gerekmez miydi? Bu isimler en azından bir ada sahipleri ki bu varolma açısından ilk adım sayılabilir bazen: Bunların her birine *massive astrophysical compact halo object* kelimelerinin başharflerinden yola çıkılarak MACHO denmektedir; *büyük kütleli sıkı halo cisimleri*. Alternatif açıklama da tahmin edilebileceği üzere *weakly interacting massive particle* ifadesinin kısaltması WIMP, *zayıf etkileşimli büyük kütleli parçacıklar*'dır. Bunlar maddeyle o kadar zayıf biçimde etkileşimde bulunan parçacıklardır ki onları ancak kütleçekimsel çekmeleri ya da zayıf etkileşimleri üzerinden saptayabilmemiz olasıdır. Bir zamanlar nötrinin kütle sahibi olması şartıyla buna aday olduğu düşünüldü, ama bugün bu pek muhtemel görülüyor, çünkü nötrinolar galaksiler ölçeğinde neredeyse tamamen serbest biçimde yolculuk ediyor ve çok daha büyük ölçeklerde aşırı fazla yapıya sebep oluyorlar. Daha egzotik bir aday da bilinen parçacıkların henüz keşfedilmemiş, olduğu varsayılan, spekülatif, süpersimetrik eşleri olan *sparçacıklar* denen bir dizi süpereş çeşidi (6. Bölüm). Çözüm ne olursa olsun, evrende en bol bulunan madde biçimini henüz saptayamamış olmaları gerçeğinin, bilim insanları açısından ayaklarını yere sağlam basmaya yönelen bir düşünce olduğu açık.

Büyük Patlama'nın dördüncü sorunu bugün etrafta herhangi bir "manyetik tek kutup" var gibi görünmemesidir. Kuzey ve güney kutupları olan çubuk mıknatısları hepimiz biliriz. *Manyetik tek kutup*, bu kutuplardan birinin diğeri olmadan var olmasıdır; elektrik yükünün manyetik karşılığıdır. Eğer elektrik ve manyetizma tek bir kuvvetin iki ayrı yüzü ise, neden manyetik tek kutuplar her zaman çift şeklinde olur ve hiçbir zaman elektrik tek kutuplar gibi ("yükler") yalnız bulunmazlar? Büyük Patlama modelinde başlangıçtaki çalkantılı olayın basıncı o kadar büyüktür ki uzayzamana birçok bozukluk (sıyrıklar, yaşlar, kırışıklıklar, kötü hizalanmış parçalar) kazandırır, noktaya benzer sıyrıklar da

manyetik tek kutuplardır. Büyük Patlama kuramına göre tek kutupların bildiğimiz maddeden daha çok olması öngörülmektedir; ama bir tane, tek bir adet bile bulunmamıştır.

Beşinci sorundan daha önce de bahsetmiştik: Galaksilerin yüz milyon ışık yıllık bir ölçekte boşlukların etrafında kümelmiş olduğu Şekil 8.5'te gösterdiğimiz evrenin büyük ölçekli yapısı. Bu yapının ilksel evrenin, ölçeğinin bugünkü gözlemlenebilen evrenin sonsuz küçük bir noktadan biraz daha fazla olduğu zamandaki öbekliliğinin çok çok büyütülmüş bir versiyonu olduğunu görmüştük. Peki nokta neden ilk başta öbekliydi ve neden zaman içerisinde bugün bulduğumuz şey haline gelen öbekliliğe sahipti? Bu problem Büyük Patlama kuramının erişiminin tamamen dışındadır. Onun içerisindeki en büyük cisimlerin nereden geldiği hakkında hiçbir fikrimiz olmadan evrenimizi anladığımızı iddia edemeyiz!

Bu beş problem (genişlemenin kaynağı, ufuk problemi, düzlük problemi, kayıp tek kutup problemi ve büyük ölçekli yapının varlığı) çok ciddidir. Öte yandan Büyük Patlama kuramı diğer yönlerden elinizin tersiyle itilemeyecek kadar da başarılıdır. Üstelik deneyler gerçekten de evrenin çok sıcak bir aşamadan geçtiğini ve o zamandan beri genişlemekte olduğunu onaylamaktadır. Yanıt Büyük Patlama'nın ilk anlarında gerçekleşen olaylarda, şu ana kadar bahsi geçenlerden önce (ama mutlak başlangıcın halen bu tarafında) yaşanan olaylarda yatıyor olmalıdır. Şu an daha çok tutulan kuram şişme kuramının bir türüdür.

Şişme (enflasyon) normal bir genişleme değildir. Şişme çok hızlı bir genişlemedir. Şimdiye dek "çok" ifadesini fazla sık kullanmadığımı, italik haliyle "çok" kelimesini ise hemen hiç kullanmadığımı fark etmiş olmalısınız. Bu örnekte ışık hızından da büyük bir hızda genişlemeyi anlatmak istiyorum. Aslında bundan da çok bir hızı anlatmak istiyorum. Işığın hızından daha hızlı gerçekleşen bir şey sizi kaygılandırmasın: Işık hızından hızlı genişleme kavramında özel bir güçlük yok, çünkü bu genişleyen uzayın ölçeği; burada uzayda sinyal iletimini ele almıyoruz. Şişme senaryolarında (hepsi tek bir fikrin etrafında dönen bir dizi senaryo var) başlangıçtan yaklaşık 10^{-35} sn sonra bir şey (bundan birazdan bahsedeceğiz) devreye giriyor. Ardından olaylar geliş-

yor. Bundan sonraki her 10^{-35} sn'de bir, evrenin boyutları ikiden fazla katlanıyor¹⁹, bu ikiden fazla katlanmalar böyle devam ederek şişme yaklaşık olarak 10^{-32} sn'de devreden çıkana dek sürüyor: Bu sürede ikiden fazla katlanma 100 kez yaşanıyor. Bunun ne anlama geldiğini bugünkü terimlerle düşünelim. İlk baştaki büyüklüğü 1 cm olarak alalım. İkiden fazla katlanma sonucunda 2,7 cm olduk. İki adet yaşandı, 7,4 cm oldu. Üçüncüde 20 cm. Onuncuda 220 metreye ulaştık. Yirmide 4853 kilometre oldu. Ellide 5480 ışık yılındayız (hatırlayın, bunu 5×10^{-34} saniyede başardık). İki adet daha ikiden fazla katlanma galaksiyi kapsar. Birkaç adet daha sonra yerel bir grup. 100 ikiden fazla katlanmanın ardından ilk baştaki cisim 10^{43} kat büyümüştür. Bazı şişme versiyonlarında büyüme bundan da büyüktür; 10 üzeri trilyon kat, yani $10^{1.000.000.000.000}$. Bu, 10^{-32} sn'de gerçekleşmesi muazzam, gerçekten muazzam bir büyümedir!

Şimdi biraz sakinleşebiliriz. Şişmeyi insan birimleriyle vererek bilinçli olarak dramatize ettim. Öte yandan temel birimler cinsinden düşünmenin daha iyi bir biçim olduğunu sizler de fark etmiş durumdasınız. Bu daha temel bakış açısından yaklaşıldığında şişme daha rahat ele alınabilir. Önce şu ilk başlanan 10^{-35} sn'yi düşünelim. Bu devreye girme süresi aslında çok uzun bir süredir, zira yüz milyon Planck tıklamasına karşılık gelir (üç yıl yaklaşık olarak yüz milyon saniye eder, bu yüzden zamanı daha iyi kavrayabilmek için bunu üç yıl olarak düşünün). Devreye girmeye hazırlanan şeyin -her neyse artık- kaynak toplamak için bol zamanı vardı. Onu izleyen ikiden fazla katlanma dönemine gelince: Bu da her bir zaman dilimi için yine hiç acelesi olmayan bir yüz milyon tıklama (bir başka "üç yıl") demektir ve hiç de öyle zıvanadan çıkmış bir çılgınlık taşımaz.

Şimdi şişmenin Büyük Patlama modelindeki problemleri nasıl çözdüğünü görelim. Ufuk problemi çözülür, çünkü bugün ışık hızında birbiriyle temas etmekten uzak, temas edemeyecek kadar uzak noktaların hepsi aslında ilk başta birbirlerine aşırı şekilde yakındı ve birbirleriyle iletişime geçmek için bol bol zamana sahipti. Başka bir ifadeyle söylersek, şu anki görünen evrenimizin tümü, iletilerin bir uçtan diğer uca yolculuk etmek

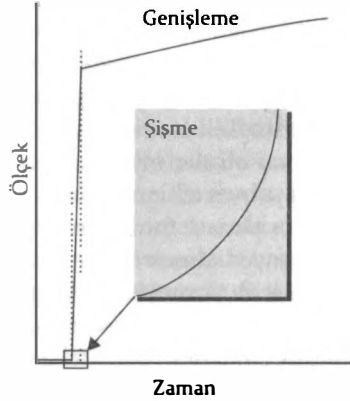
19 "İkiden fazla katlanıyor" derken e-katlanmayı; katsayı olarak $e = 2,718...$ ile çarpılarak yaşanan bir artışı kastediyorum.

ve türdeşlemesini gerçekleştirmek için gereken zamana sahip olabildiği kadar küçük bir bölgede toplaşmış haldeydi. Düzlük problemi çözülür, çünkü kırışık bir balon şişirilince yüzeyi nasıl düzleşirse aynı şekilde şişme ilk baştaki bükülmeleri de düzlemtedir. Tek kutup problemi çözülür, çünkü tek kutuplar ilk başta var olsalar bile, şu anda bizim evren bölgemizde yaklaşık olarak yalnızca bir adet bulunur ve henüz fark edilmemiş olması şaşırtıcı olmaz. Burada madde olmasının nedeni şişmeden sonra oluşuyor olmasıdır, öte yandan tek kutuplar şişmeden önce oluşmuş ve şişmeyle uzağa gitmiştir. Vurgulanması gereken son nokta, eğer şişme gerçekse o halde evren bizim şimdiye dek düşündüğümüzden çok daha büyüktür ve bizim görebildiğimiz (ve de görebileceğimiz) var olanın yalnızca çok çok küçük bir parçasıdır. Şişmeyle beraber küçük düşmemiz de artmaktadır.

Halen şişmenin nasıl başladığını cevaplayabilmiş değiliz. Ayrıca yeni bir problemimiz daha var: Nasıl sona erdi? Neden şişme 10³³ sn'den sonra sıfırı tüketti? Şişme fikri ilk kez 1917 yılında Hollandalı astronom ve matematikçi Willem de Sitter (1872-1934) tarafından ortaya atıldı. Boşluk (vakum) bir enerjiye sahipse, bu durumda şişmenin gerçekleşeceğini fark etmişti. Boşluğun enerji sahibi olması üzerine öyle fazla düşünmemekte fayda var: Bizim "boşluk" olarak değerlendirdiğimiz şey nihayetinde keyfidir ve boş uzay mutlak hiçlik şeklinde düşünülmemelidir. Boşluğun *şişme alanı* adı verilen bir alanla dolmuş olduğunu düşünebiliriz. Şişme alanını düşünmenin gayet ilkel denebilecek yollarından biri evreni bir pilin elektrotuna bağlı şekilde düşünmektedir; bu durumda her yerde diyelim ki 12 voltluk düzgün bir voltaja sahip olacaktır. Bu voltaj bizim yapabileceğimiz hiçbir deneyle saptanabilir olmayacaktır ve buna *sahte vakum* deriz. Ardından pil bağlantısını kestiğimizi ve evrene boşalttığımızı düşünün, bu durumda 12 voltluk boşluk sıfır voltluk bir *gerçek vakum* halini alacaktır. Vakumun her iki türü de bize aynı görünür ama farklıdır.

Bu fikirler biraz garip olduğu için daha geniş bir bağlamda ele alınmaları faydalı olabilir. Birincisi kimyacıların çok uzun bir süre, elle tutulur bir görünümü olmayan bir şey kimyasal özelliklere nasıl sahip olabilir düşüncesiyle, havayı üzerinde çalışılacak

Şekil 8.9 Şişen evren. İlk başlangıcından kısa süre sonra evrenin ölçeği devasa bir hızda, 10^{-35} saniyede bir yarıçapının katlanmasından da hızla artmaya başlar. Şişme döneminde büyüklük yönünden üssel bir büyüme yaşansa da, bu dönem 10^{-32} saniye sonra sonlanır. O andan itibaren genişleme çok daha tembelcedir ve Şekil 8.4'te gösterilen senaryolardan birine karşılık gelir.



bir şey olarak düşünmemeleri ilgi çekicidir. Aynısını biz de boşluk için düşünebiliriz. Bilim tarihi giderek daha az üzerinde giderek daha çok çalışılması yönünde ilerliyor gibi görünüyor: Havanın şimdilerde modası geçti, fizikçilerin dikkatleri çeşitli vakumlar üzerine odaklanmış durumda ve büyük olasılıkla evrenin fiili başlangıcıyla ilgili kuramlar oluşturma aşamasına geldiklerinde de mutlak olarak hiç olan üzerinde çalışmak zorunda kalacaklar. Kimbilir belki de mutlak hiçin özelliklere sahip olduğunu ve aynı zamanda farklı biçimler alabileceğini keşfedeceğiz!²⁰

Ele almamız gereken soru, vakumun enerji sahibi olmasının hızlı şişmeyle nasıl sonuçlandığıdır. Mekanizma pozitif geri beslemeye benzetilebilir. Önce evren genişledikçe daha fazla vakum yaratıldığını, ardından da eğer vakum enerji sahibiyse evrenin toplam enerjisinin arttığını belirtelim. Friedmann denklemleri içerdiği enerji arttıkça evrenin genişleme hızının arttığını gösteriyor, dolayısıyla genişledikçe genişleme hızı artar. Genişleme hızının evrenin ölçeğiyle doğru orantılı olduğu ortaya çıktığına göre, bu durumda ölçek zaman karşısında üssel olarak artar. Üssel değişiklikler çok hızlı şekilde büyür, dolayısıyla şişme alanı var olduğu müddetçe giderek daha hızlı bir şişme gerçekleşir (Şekil 8.9).

²⁰ Tümüyle şaka yapmıyorum. Evren eğer mutlak hiçten doğduysa, o halde büyük olasılıkla bir şeyin nasıl mutlak hiçten, *ex nihilo* gelebildiğini irdelememiz gereken bir aşama da gelecek. Günün birinde bilimcilerin tamamen hiç uğruna çalışmaları gerekecek.

De Sitter'in modelinde yaşanan sorun şişmeyi durdurmanın hiçbir yolunun olmamasıydı. Şişme sonsuza dek devam etti, bunun sonucunda madde ve ışının hepsi seyrelerək çabucak sıfırı buldu ve geride boş bir evren kaldı. Deneyim bunun aksini göstermektedir, bu yüzden onun şişme modeli ıskartaya çıkarılarak unutuldu. Fakat 20. yüzyılın sonlarında şişme kavramı entelektüel faaliyetin birbirinden ayrı iki sahasında, birbirinin iletişiminin ufku dışındaki iki yerde yeniden dirildi. Bu faaliyet alanlarından biri 1979 yılında o zamanki SSCB'de Alexei Starobinsky'nin, bir başka Rus, Erast Gliner'in 1965'te ortaya atmış olduğu fikri geliştirmek için genel görelilikten çıkan fikirleri kullanmasıyla doğdu. Ufkun öte tarafında, ABD'de Alan Guth manyetik tek kutupların istenmeyen yaratılışı problemini parçacık fiziğın bir problemi olarak düşünüyordu ve 1981 yılında benzer bir fikre ulaştı.

Şişme modelinin bu ilk türündeki ana fikir, onu suyun donarak buzu oluşturmada görülen hal değişimine benzer biçimde bir "faz geçişı" şeklinde düşünmekti. Evren şişerken soğur ve mutlak sıfıra dek de soğuyabilir, dolayısıyla genişleme muazzamdır. Fakat sahte vakumun çökerek gerçek vakum oluşturduğu ve dev miktarda enerji serbest bıraktığı bir an gelir. Bu geçişı kafada canlandırabilmek için sahte vakumu sanki hiçbir şey yokmuş gibi görünen saydam bir ortam gibi, örneğın sıvı su olarak düşünün. Evrenin şişmiş hali süper-soğutulmuş su gibidir: Donma noktasından çok daha düşük bir sıcaklıktadır ama sıvı olarak kalmıştır. Su aniden donduğunda, su molekülleri daha düşük enerjili bir düzenlemeye girerek, örnekte buza dönüşerek rahatlarak "gizil ısı"sını serbest bırakır. Süper soğutulmuş sahte vakum da benzer şekilde aniden gerçek vakuma çöker, böylece şişme alanının enerjisinin hepsini serbest bırakır, evrenin sıcaklığını yükseltir ve şişmenin sonlanmasını sağlar. Bu noktadan itibaren devreye Büyük Patlama senaryosu girer ve evren çok daha acelesiz bir biçimde genişler.

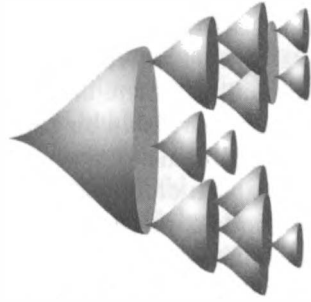
"Eski" şişme senaryosunun özü budur. İsimden de çıkartılabileceğınz gibi bunun yeni bir versiyonu da vardır. Eski modeldeki sorun, enerji salınmasının evreni yeniden ısıtması ve bunun sonucunda şişme döneminin sonunda şişmeyle ortadan kaldırılması için çok geç kalınan çok sayıda kusurun (tek kutuplar)

ortaya çıkmasıdır. Şişmenin gerçekleştiği ve sona erdiği hızla ilgili başka sorunlar da doğdu. Örneğin evren erken halindeyken, şişme devreye girmeden önce çökecekti. “Yeni” şişme senaryolarından biri bu problemleri çözmektedir.

Umut veren senaryolardan biri 1982’de Andrei Linde’nin ortaya attığı ve kendisi ve başkalarınca o zamandan bu yana geliştirilen *kaotik şişme* modelidir. Şişme alanında yüksek sıcaklıkta bir faz geçişine gerek duyulmamaktadır. Bunun yerine şişme alanının keyfi değerde (daha önceki benzetmemizle, istenen bir voltajda) var olabildiği soğuk bir evren vardır ve eğer alan yeterince büyükse şişme gerçekleşmektedir. Bir süre sonra alan ağır ağır gerçek vakuma karşılık gelen bir duruma yuvarlanmakta (voltaj yavaşça boşalmakta) ve şişme zarıfça sona ermektedir. Şişme döneminden *zarıf çıkış* denen bu şeye eşlik eden sıcaklık artışı, faz geçişi modelinden çok daha azdır. Dolayısıyla çok daha az kusur (tek kutuplar yoktur) üretilmekte, ama halen içerisinde bulunduğumuz standart Büyük Patlama dönemini başlatmaya yetecek kadar sıcaklık da üretilmektedir. Bu senaryoda doğan yoğunluk dalgalanmaları galaksilerin dağılımına ve ayrıca şu an gözlemlenen kozmik ardalan ışımasındaki küçük dalgalanmalara tam olarak sebep olacak düzeyde görünmektedir. Şişme kuramları oldukça spekülatif olmasına ve yazıldığında da nitelik yönünden ilkel yaradılış mitlerine fazla benzemesine karşın, matematiğe sıkı şekilde bağlıdır ve içerisinde bulunduğumuz dönemde deneysel olarak sınanabilir öngörülerde bulunmaktadır. Evrenin kökeninin araştırılması bilimin hayalperest uygulamasının zirvesidir ama sınanabilir olduğu için yine de bilimdir.

Kaotik şişme kuramının eğlenceli sonuçlarından biri, manyetik tek kutuplar dediğimiz nokta kusurları yok etmek bir yerde dursun, şişmenin aslında onları da şişirmesi ve şişme etraflarında durduğunda bile bu nokta kusurların genişlemeye devam etmesidir. Nokta kusurlar, yeni bir evrenin doğumunun tohumları olarak iş görebilir. Bu elbette hiper kozmik boyutlarda olduğu için küçük düşmelerin en büyüğü sayılabilir: Bu evren gibi sayısız başka evren daha var olabilir. Bizler görünen (ve harika) evrende önemsiz bir yerdeki önemsiz (ama harika) bir galakside önemsiz bir yerdeki önemsiz (ama harika) bir yıldızın yakınındaki önem-

Şekil 8.10 Şişme modellerinden birinde, var olan bir evren, bizim evrenimizin tıpkı şimdi yapar görüldüğü gibi, hemen şişiveren yepyeni evren tomurcukları oluşturabilir. Bu evren yaklaşımı, tüm bir evrenler sisteminin fiili yaratılış anını zamanda epey geriye doğru yerleştirir, çünkü bizler çok sayıda başka evrenin soyundan gelen önemsiz bir evrende



yer alıyor olabiliriz ve eğer bu öteki evrenlerdeki zaman da toplanabilirse, en eski evren, gerçekten ilk baştaki evren trilyonlarca yıl önce oluşmuş olabilir. "Bu öteki evrenler nerede" sorusunun olası yanıtlarından biri, bunların aramızda olmasıdır: Uzayzamanı eğer birbirine yakın gözüyle baktığımız noktalardan oluşmuş olarak düşünürsek, bu durumda öteki evrenlerin de aynı noktalardan faydalandığı spekülatif olarak düşünülebilir, ama onlara farklı bir biçimde bağlantılı gözüyle bakarsak, bu durumda bu evrende bir milimetre küp yer tutan noktalar, öteki bir evrenin bütün bir uzayzamanına dağılmış da olabilir.

siz (ama harika) bir gezegenin sakinleri değiliz yalnızca, üstüne üstlük bu evren her biri kaplam açısından sonsuz olan sayısız başka evren içerisinde (çokluevrenler) önemsiz bir evren belki de.

Ayrıca evrenimizin zamanın başlangıcına yakın olmasına da gerek yok; trilyonlarca, sayısız dala ayrılan bir ağacın dallarından biri olabilir (Şekil 8.10). Bizim Büyük Patlama'mızın 15 milyar yıl önce gerçekleştiğini söyleyebiliyor olsak da, ilk ve özgün evrenin başlangıcı aslında bundan çok çok daha önce olabilir, belki de umarız öyle değildir ama bilimsel tahayyülün sınırlarının dışında bile olabilir.

Tekrar dönmemiz gerekecek iki büyük soru daha var. Biri neden evrenin (son söylenenler ışığında çokluevrenler içerisinde bizim evrenimizin) bu kadar orantısız olduğu. Diğeri de evrenin neden üç boyutlu olduğu.

Birinci olarak neden karşı-maddeden çok madde var? Bir olasılık uzakta bir yerlerde karşı-madde galaksileri olmasıdır. Henüz birini görmemiş olmamız kozmolojinin diğer alanlarında gördüğümüz üzere bize pek ket vurmuyor ama bu tür galaksilerin varlığına ilişkin bir kanıt da yok. Gerçekten de galaksiler arası uzay, hidrojen atomlarıyla dolu olduğu için (tamam, dolu demek biraz abartı oldu ama çok var) karşı-madde galaksileri bunların içerisinde sürüklenirken bu atomların yokoluşundan doğan yoğun ışımayı görmemiz gerekirdi. Böyle bir ışıma gözlemlenmedi, dolayısıyla gerçekten de madde karşı-maddeden çokmuş gibi görünüyor. Daha kesin ifade edersek, eğer başlangıçta madde ve karşı-madde eşit bolluktaysa, bu durumda birbirlerini yok ederlerdi ve elimizde sadece yokoluşun yarattığı ışımanın fotonları kalırdı. Gerçekteyse bir milyar fotona bir parçacık düşüyor, bu yüzden başlangıçta parçacıkların karşı-parçacıklara hafif bir sayı üstünlüğü olmak zorunda. Bu nasıl ortaya çıkmış olabilir?

Rus fizikçi ve muhalif Andrei Sakharov (1921–1998) 1965'te temel kuralları ortaya attı, ama bunların uygulanması için gereken mekanizmayı oluşturma konusunda fazla ilerleyemedi. Ona göre üç şart yerine getirilmeliydi. Hadronların (örneğin protonların) leptonlara (örneğin pozitronlara) dönüşebilmesi anlamında²¹ hadron sayısının korunmasını sağlamayan süreçler olması gerektiği, bunlardan ilkiydi. İkincisi CP simetrisinin çiğnenmesi gerekir (C yük eşlenikliğinin, P paritenin kısaltmasıdır; bkz. 6. Bölüm). Üçüncüsü olaylar dengeden kaçınılmasına yetecek kadar yavaş gerçekleşmeliydi: Belli bir anda gerçekleşecek bir dengesizliğin evren hızla kendi geleceğine evrilirken donmuş şekilde kalması gerekiyordu.

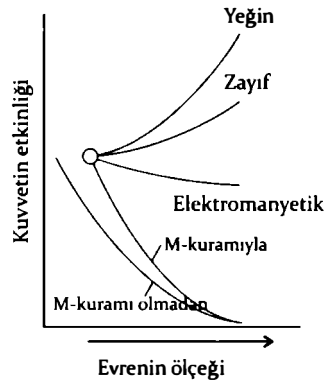
Varsayımsal (6. Bölümde bahsettiğimiz gibi GUT'lar da denen) büyük birleşik kuramların hadronlar ile leptonlar arasındaki ayrımı ortadan kaldırdığını, dolayısıyla yeterince yüksek sıcaklıklarda (simetri kırınımı parçacıklar arasında ayrımlar yaratmadan önce) hadronlar ile leptonların birbirine dönüşebildiğini artık biliyoruz. Dönüşümü bir hadronu lepton olmaya

21 6. Bölümde hadronların yeğin kuvvetle etkileşime geçen, leptonlarınsa geçmeyen parçacıklar olduğunu görmüştük. Hadronlar kuarkları ve onlardan oluşan parçacıkları kapsar; leptonlar elektronları ve nötrinoları içerir.

güdüleyen bir tür kuvvet tarafından meydana getirilmiş olarak düşünebiliriz. Nasıl bütün kuvvetlerde bir aracılık varsa, bu dönüşümler de ayar bozonları alışverişi aracılığıyla sağlanmaktadır. Henüz tam teşekküllü bir GUT formüle edilmemiş olduğu için, bu kuvvet taşıyıcı parçacıkların özellikleri hakkında fazla bir şey bilmiyoruz ve bunlara şimdilik *X ayar bozonları* demekle yetiniyoruz. Fakat bir hadron ile bir lepton arasındaki geçişi bir *X* başardığı için, bunun bir pozitron ve bir karşı-aşağı kuarka bozunabileceğini de biliyoruz. Benzer şekilde *X*'in karşı-parçacığı, bir karşı-*X* de bir elektrona (pozitronun karşı-parçacığı) ve bir aşağı kuarka bozunabilir. Bu bozunumların hızları hafif farklı olsaydı, başlangıçta eşit sayıda *X* ve karşı-*X* var olmuş olsa bile, madde ve karşı-maddede küçük bir dengesizlik sonucu doğabilirdi. CP ihlalinin devreye girdiği yer bu tür süreçlerin hızlarını hafifçe bozabildiği için işte burasıdır. CP ihlalinin geriye doğru ilerleyen bir sürecin zamanda ileriye akan bir süreçten ayırt edilemez olması anlamına gelen zaman tersinirliği değişmezliğinin bozulmasına karşılık geldiğini ve evrenin zamandaki bu orantısızlığının da aslında saptanmış olduğunu görmüştük. Şu anda maddenin karşı-maddeden fazla olmasının evrenin bu orantısızlığının bir göstergesi olduğuna inanılıyor. Evren neden orantısız, kimse bilmiyor. Belki de sadece bizim evrenimiz orantısızdır: Çokluevren (eğer bir adetse) bir bütün olarak baştan sona simetrik olabilir.

Geriye uzayın neden üç boyutlu olduğu sorusu kaldı. Muhtemel bir açıklamanın ilk ipuçları sicim kuramından gelmeye başladı. Bu bölümde bir dipnotta değinmenin haricinde sicim kuramı konusunda dikkat çekici bir biçimde sessiz kaldık, bunun nedeni henüz büyük oranda spekülatif olması. Fakat sicim kuramının evrenin ortaya çıkışının çok erken evrelerine ilişkin bazı yanıtlar verdiği görülüyor (ki maddenin temel bir kuramında bu olmak zorunda) ve buna göre evrenin en erken, ilk anı bir parçacık patlaması değil, bir sicim patlaması: Anlayacağınız bir ırmık helvası değil de, spagetti patlayışından bahsediyoruz. Örneğin çok erken zamanlarda ve bu nedenle çok yüksek sıcaklıklarda, simetri kırınımı yaşanmadan önce bütün kuvvetlerin aynı etkinliğe sahip olduğunu görmüştük. Bu tam doğru değil, çünkü hesaplamalar doğru yapıldığında çok erken evrende, Planck saatinin ilk tıklamasında kütleçekim, yağın ve elektrozayıf kuv-

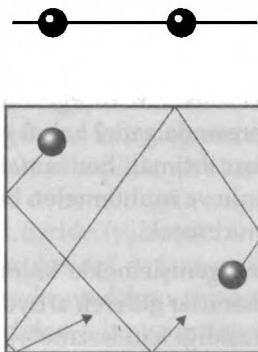
Şekil 8.11 6. Bölümde Büyük Patlama anına (ve sıcaklığına) yakınsarken temel kuvvetlerin ortak bir değerde birleştiklerini görmüştük. Bu tam olarak doğru değildir, çünkü aralarında çok kısa sürelerde çok küçük bir fark vardır. Bu uyuşmazlık sicim kuramına başvurulduğunda ortadan kalkıyor gibi görünüyor.



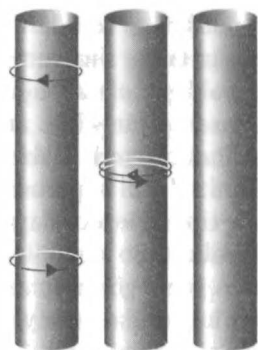
vetlerin etkinlik açısından tam olarak örtüşmediği ortaya çıkmış durumda (Şekil 8.11). Fakat sicim kuramı oyuna dahil olduğunda bu küçük uyuşmazlık ortadan kalkıyor ve kuvvetler doğdukları anda tam olarak eşit oluyor.

Sicim kuramının çok enteresan özelliklerinden biri evrenin, bunlardan altısı bir Calabi-Yau uzayına sarılmış olmak üzere, on uzamsal boyuta (zaman da eklenince on bir) sahip olduğunu ve sicimlerin bu uzaylardaki çok boyutlu deliklerden geçtiğini ileri sürmesidir. Sicimleri bir yönde sarılmış, karşı-sicimleri de aksi yönde sarılmış olarak düşünebiliriz. Bir sicim ile karşı-sicim karşılaştıklarında yok olurlar, dolayısıyla on boyutlu uzayı karşılaştıkları yerde birbirini yok eden sicimler ve karşı-sicimlerle kıvrılmış olarak düşünebiliriz. Karşılaşmadıkları yerlerde de sicimler, tıpkı bir kâğıt bobinin etrafına sarılan gerçek sicimler gibi, uzayın açılmasını engelliyorlar.

Şimdi yeni bir olguya geliyoruz. Tek boyutlu bir uzayda, yani abaküs teli gibi bir ortamda, bir nokta ile onun karşı-madde zıttının, başka bir noktanın, aynı yönde tam olarak aynı hızda ilerlemedikleri sürece, karşılaşmaları ve yok olmaları kesindir. İki boyutta, bir bilardo masası örneğinde olduğu gibi, iki noktanın buluşması çok daha az olasıdır (Şekil 8.12). Noktalar yerine sicimler ile karşı-sicimlerin buluşmasını düşünmeye çalıştığımızda, *boyutsallığın üçten büyük olmaması şartıyla* buluşmalarının daha olası olduğu ortaya çıkar. Bu üç boyuta sarılı duracak şekilde düşünebileceğimiz sicimler ve karşı-sicimlerin birbirlerini



Şekil 8.12 Bir boyuta hapsolmüş iki parçacığın (en üstteki çizimde görülen tel üzerindeki iki boncuk gibi) tam olarak aynı hızlara sahip olmamaları şartıyla, eğer hareket ediyorsa buluşmaları kesindir. Ne var ki iki boyutta (alttaki çizimde görülen bilardo masasındaki toplar gibi) buluşma olasılıkları büyük oranda azalır.



Şekil 8.13 Yukarı doğru sarılmış bir boyutta hareket eden bir sicim ve bir karşı-sicim olmak üzere iki sicim buluşacak, yok olacak ve boyutu açılmaya açık bırakacaktır. Sicim kuramına göre sicimlerin de, bir boyuttaki nokta parçacıklar gibi üç boyutta buluşmaya meyilli olduğunu gösteren ipuçları vardır. Kalan boyutlar hapsolmüştür, dolayısıyla yalnızca üç boyut açılarak bildiğimiz evrenin boyutsallığını sağlamaktadır.

yok etmeye ve ilgili boyutları açılmalarına olanak sağlayarak serbest bırakmaya meyilli oldukları anlamına gelir (ve şimdilik bu sadece ilginç olmakla sınırlı bir anlamdır) (Şekil 8.13). Yani üç boyut açılır ve geriye kalanlar açılmaya zaman bulamadan evren bir sonraki evresine, muhtemelen şişme evresine geçer ve altı boyutu sonsuza dek hapis halde bırakır.

Geçmiş bir kenara bırakalım artık, acaba gelecekte neler olacak? Büyük ihtimalle sonsuz olan geleceğimizi sonlu gibi gören geçmişimize oranla daha kısa ele alacağım. Genel mutaba-

kat bir geleceğimizin olduğu şeklinde: Görmek için can atıyor olsak da bunun biraz uzun bir gelecek olduğunu belirtmeliyiz. Başlangıç noktası olarak evrenin kapalı olduğunu alayım ki gelecekte bir çöküş olmasın: Evren şu anda sonsuz ve ölçüğü sonsuza dek genişleyecek. Bu evrenbilimciler arasında genel kabul gören yaklaşım gibi görünüyor. Yanlış olmaları ihtimali her zaman var elbette, bu durumda evren şu anda sonlu ve muhtemelen birkaç trilyon yıl sonra bir Büyük Çöküş’le sona erecek.

Evren büyük olasılıkla sonsuza dek genişlemekle kalmıyor, genişleme hızının arttığı yönünde de kanıtlar giderek artıyor. Bu keşif evren için çok büyük bir anlam taşıdığı için kozmoloji (evrenbilim) dünyasında deprem etkisi yarattı. Hubble’ın galaksilerin uzaklığını belirlemek için Cepheid değişkenlerini kullanmış olduğunu hatırlayalım. Alternatif bir yaklaşım da standart mum olarak bir *la tipi süpernova* kullanmaktadır. *la tipi* süpernova, yakın bir ikili sistemdeki bir beyaz cüce, yaklaşık olarak Güneş’in kütesine ama Dünya’nın büyüklüğüne sahip bir yıldız ani bir nükleer tepkime geçirmek için komşusundan yeterli malzemeyi aldığı anda oluşur. Daha önce bahsettiğimiz *II tipi* süpernovalarından farklı olarak (çekirdek çökmesi), *la tipi* süpernovaların yoğunluğu oldukça yüksek derecede düzenlidir. Bu nedenle tıpkı Cepheid değişkenleri gibi standart mum işlevi görürler ve algılanan yoğunluklarını bizden uzaklıkları hakkında karar vermek için kullanabiliriz. Bir başka avantaj da süpernovaların Cepheid’lerden çok daha parlak olmasıdır, dolayısıyla onları çok daha uzaktaki cisimlerin araştırılması için kullanabiliriz.

1998 yılında bir dizi uzak *la tipi* süpernovanın, eğer evrenin genişlemesi yavaşlıyorsa ya da hatta sabit hızda gidiyorsa bile, olması gerektiğinden daha soluk olduğu keşfedildi. Kanıtların kalıcı olması şartıyla, burada vakuma atfedilebilecek enerjiye şu anda değer açısından çok düşük olsa da biraz şişme dönemine benzer tarzda bir katkı olmak zorunda. Bu katkıya *kozmojik sabit* deniyor. Hatırlanırsa bu ilk olarak Einstein tarafından kütleçekim çekmesini dengelemek ve evrenin çökmesini durdurmak amacıyla ortaya atılmış, daha sonra Hubble’ın sonuçlarını öğrenince kendisi bunu “en büyük gafım” olarak nitelendirerek bir kenara bırakmıştı. Şimdi Einstein’ın “en büyük gafım” diye kabul

edip koyduğu teşhisin aslında daha büyük bir gaf olduğu gide-
rek daha fazla açığa çıkmaya başladı.²² Hızlanmaya neden olan
gizemli enerjiye *kara enerji* deniyor, daha hayalperest bir ifadeyle
ironik biçimde tekrar Aristoteles'e kulak vererek *beşinci töz* de
diyebiliriz. Sıfır değeri taşımayan bir kozmolojik sabitin varlı-
ğından yola çıkılarak oluşturulan senaryolardan birine göre yeni
şişme dönemi bugün zaten başlamış durumda ve evrenin hızlan-
ması ileride (yaklaşık bir milyon trilyon trilyon yıl ya da 10^{30} yıl
kadar ileride) devasa oranlara ulaşacak. Doğruysa galaksimizin
ve Andromeda'nın toplam enkazı içerisinde neredeyse mutlak
denebilecek bir yalnızlığın ani hücumunu deneyimleyeceğiz. Bu
üssel şekilde hızlanan genişleme aşamasının diğer olaylar gerçek-
leşmeden önce başlamayacağını varsayacağım, ama bu da hiçbir
biçimde kesin değildir.

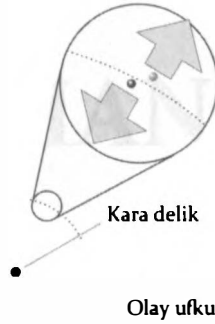
Güneş pek yakında, yaklaşık 10 milyar yıl sonra sönecek. Şişip
yarıçapı Dünya'nın yörüngesini bile aşan bir kırmızı dev halini
alacak, dolayısıyla konuya basit yaklaşırsak Dünya'nın yörün-
gede bir kül artığı haline gelmesini bekleyebiliriz. Dünya, et-
rafındaki çok seyreltik güneş maddesinin içerisinde kuvvetle
atıldığı bir sürüklenme yaşayacak ve yaklaşık olarak elli yıl içe-
risinde döne döne Güneş'in içerisindeki ölümüne kavuşacak.
Başarılarımızdan geriye bir tek hafif bir Güneş kirliliği kalacak:
Kirliliğe yeni bir katkıdan başka bir şey olmayacağız. "Basit
yaklaşırsak" demiştim. Şişerek bir kırmızı deve dönüşme ve
şimdikinden yüz kat daha parlak hale gelme sürecinde Güneş
uzaya birçok malzeme püskürtecek ve böylece daha az kütleli
hale gelecek. Fazla kilolarından kurtulmuş Güneş'in gezegenler
üzerindeki kütleçekim çekmesinin azalmasının sonucunda
Dünya'nın yörüngesi genişleyecek ve belki de yanıp kül olmak-
tan kurtulmamıza yetecek kadar uzağa gidecek; hatta içerideki
komşumuz Venüs bile belki kaçabilir. Bu arada Güneş şu anki
değerinin yaklaşık yarısı kadar bir kütleyle sahip bir *beyaz cüce*
olarak kalacak. Küçük yıldızlardan daha kısa hayatları olan bü-
yük yıldızların hayatları da nötron yıldızları ya da kara delikler
oluşturarak dramatik biçimde sonlanacak.

22 Einstein'ın gaflarından bahsederken onun muhteşem katkılarını ka-
ralama amacıyla değilim: Bu gaflar bile muhteşemdi ve aynı gafları
yapabilecek bir entelektüel güce sahip olmayı çok isterdim.

Tıpkı insan toplumlarının insanlık yaşadığı müddetçe yaşayabilmesi gibi, galaksiler de yıldızları yaşadığı müddetçe yaşayabilir. Yıldız oluşum ve evriminin, yıldızların galaksilerine yaptıkları madde geri dönüşümünün dinamiklerine dayalı olarak yıldız oluşumu çağının yaklaşık bir yüz trilyon yıl (10^{14} yıl) sonra sona ermesi bekleniyor. Bundan çok önce, bugünden yaklaşık 6 milyar yıl sonra Andromeda Samanyolu'na çarptığında ya da en azından teğet geçtiğinde küçük bir yerel zorlukla karşılaşılacak ama sonuçta kozmik ölçekte bu fazla önem taşımayan bir olay diyebiliriz. Yıldız oluşumu sonlandığında galaksilerin az buçuk kara delikle beraber hemen hemen eşit miktarda bir beyaz cüce ve *kahverengi cüce* karışımı içereceğini bekleyebiliriz (kahverengi cüceler, tutuşmak için yeterli kütleyle sahip olmayan soğuk başarısız yıldızlardır, bunun için kütlelerinin Jüpiter'in kütlesinin yaklaşık olarak seksen katından daha az olması gerekir). Bu kahverengi cüceler çarpışır, birleşir ve ateş almaya yetecek kadar kütleli hale gelirken aslında çok yavaş bir yıldız oluşumu devam edebilir. Beyaz cüceler de çarpışacak ve bütünleşerek daha büyük devler oluşturacaktır. Kara delikler de yıldızlara eklenecek ve yaklaşık olarak yüz trilyon trilyon yıl (10^{26} yıl) sonra galaksilerin merkezlerinde var oldukları düşünülen kara delikler yıldızlarını yalayıp yutacaklar. Kütleleri Güneş'in yaklaşık 10 milyar katı olan bu dev kara delikler, daha önceki çağlarda galaksilerden uçup gitmiş yalnız yıldızları mideye indire indire evrende köpekbalıkları gibi dolaşacak. Bu yıldızlar eğer beyaz cüceyse, nükleer tepkimeleri çoktan bitmiş olacak, ama protonları 10^{35} yılda bozunduğu için belli belirsiz bir ışıma yayacaklar. Bu ışımanın yoğunluğu o kadar düşük olacak ki şunu fark etmeniz zor olacak: Yakıtını proton bozunumundan alan tipik bir beyaz cüce 400 wattlık bir lamba parlaklığına sahip olacak.

Kara delikler ölür. 1974 yılında uzaybilimci Stephen Hawking'in varlığını öngördüğü *Hawking ışıması* nasıl düşünülebilir, aktaralım. Vakum (ya da boşluk; bu kelimenin anlamından şüphe duymayı öğrendik şimdiye kadar) anlık varoluş kazanan, kaynar bir parçacık ve karşı-parçacık köpüğüdür. Bir kara deliğin ufkunda, hiçbir şeyin kaçamadığı uzay bölgesinin sınırlarını belirten deliği çevreleyen yüzeyde varlık kazanan bir parçacık-karşı-parçacık çiftini düşündüğümüzde, bir parçacık kendisini uf-

Şekil 8.14 Kara deliklerin kütle kaybederek küçüldüğü Hawking ışımasının oluşumunun resimli bir gösterimi. Kara delik Schwartzchild yarıçapında bir ufukla çevrilmiştir ve buradan ışık dahil hiçbir şey dışarı kaçamaz. Fakat bir parçacık-karşı-parçacık çifti (bir elektron ile bir pozitron gibi) ufukta oluşursa, karşı-parçacık ufkun içerisinde, parçacık ufkun dışarısında oluşmuş halde bulunabilir. Bu parçacığın kaçmasına ve bu yolla kara deliğin kütlesini azaltmasına olanak sağlar. Bu ışımanın yoğunluğunun kara cisim ışımasının ayırt edici özelliklerine sahip olduğu, keza sıcaklığının kara deliğin kütlesiyle ters orantılı olduğu ortaya çıkmıştır.



kun içerisinde oluşmuş, eşiyse dışarıda oluşmuş bulabilir (Şekil 8.14). Bunun sonucunda bir parçacık yakalanır, eşiyse kaçır. Kaçan parçacık deliğin bölgesinden enerji götürür, böylece deliğin kütlesi azalır. Bu süreç çok yavaştır. Bir galaksi kütlesine sahip bir kara delikte bunun yaklaşık 10^{98} yılda olmasını bekleyebiliriz. Bu nedenle yaklaşık olarak 10^{100} yıl sonra evren elektromanyetik ışıma, elektronlar ve pozitronlardan oluşacaktır. Bir süre sonra elektronlar ve pozitronlar karşılaşacak, birbirlerini yok edecek ve elektromanyetik ışımaya bozunacaktır. Büyük Patlama'nın parlaklığı nasıl gerilerek evrenin mikrodalga ardaan ışımasına dönüşmüşse, evren genişlemeye devam ettikçe kâinattaki ışımanın dalga boyları da gerilecektir.

Evren sonsuz hale gelirken, dalga boyları da sonsuz hale gelecek. Başarılarımız, amaçlarımız, varlığımızdan geriye kalan tüm izler silinecek, geriye ölü düz uzayzaman kalacak. Yine de bizim sonumuz başlangıcımızla aynı değildir. Başlangıçta hiçbir şey yoktu, mutlak anlamda yoktu. Sondaya tamamen boş uzay olacak. Bu yüzden uçsuz bucaksız kasvetin iki ucu arasındaki canlı faaliyet aralığında hayatta olduğumuz için mutlu olmalıyız.

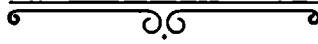
9 UZAYZAMAN

EYLEM SAHNESİ



BÜYÜK FİKİR

Madde uzayzamanı bükmemektedir



Uzay ve zaman, içerisinde yaşadığımız koşullar değil, bizim bunları düşünme yöntemlerimizdir.

ALBERT EINSTEIN

Her şey nerede oluyor? Etrafımıza baktığımızda yanıt basit gibi görünüyor. Uzayın içerisinde varız ve zamanın içerisinde eylemde bulunuyoruz. Paki ama uzay ne, zaman ne? Burada da içgüdülerimiz hazır bir cevap sunuyor bize. Uzayı bir sahne olarak düşünüyoruz; belki maddi olmayan bir sahne, ama yine de bir sahne olarak düşünüyoruz. Peki ya zaman? Zaman ardışık eylemleri birbirinden ayırıyor, zaman şimdiki anı geçmiş ile gelecek arasında sürekli yer değiştiren bir sınır olarak kavramamıza izin veren bir evren özelliği. Başka bir ifadeyle uzay, eşanlı olayların dolaşıklığını ortadan kaldırıyor; zaman öngörülemeyen geleceği değiştirilemeyen geçmişten ayırt ediyor. Uzay ve zaman birlikte olayları belirli yerlere düzenli bir dizilimle dağıtıyor, böylece on-

ları anlaşılır kılıyorlar. Bilim zamanın varoluşundan kaynaklanıyor; çünkü bilimin ana kaynağı, *nedensellik* (bir olayın onu takip eden olaylara etkisi) esasen olayların zaman içerisinde geçerek sistematik şekilde birbirini izlemesi demek: Şimdi *buysa*, şu zamanda *şu* oluyor.

Fakat uzay ve zamanın bu ve buna benzer şekilde yorumlanması gerçek bilgiden ziyade duyguya yakın bir şeydir. Bu tür yorumlar bir bilimcinin son noktası olmaktan çok, bir felsefecinin başlangıç noktası olmaya daha yatkındır. Bu bölümde göreceğimiz üzere *şu* anki uzay ve zaman kavrayışımızın gelişimi, dünyanın bir sahne, bir eylem sahnesi olduğu şeklindeki içgüdüsel görüşün gelişmiş bir biçimidir; fakat yakın zamanda yaşanan gelişmelerle bu yaklaşım çözülmeye başlamıştır. Kimi bilim insanları bugün bu bölümde bile akla gelmeyen büyük bir fikrin keşfedilmek üzere olduğunu düşünmektedir.

Hikâyemiz insanın eylem sahnesi olarak kavrayacağı Dünya'nın yüzeyini ölçmeye girişmesiyle başlıyor. Aslında Dünya'yı değil, toprağı ölçmeye başladılar ki daha sonra yaşanacak olanlar bunun mantıklı bir karar olduğunu gösterdi. Gerçekten de bilimsel yöntemin bir özelliği de hırsın başarılabilmesi makul görünenle sınırlanmasıdır: Bilim kolay şeyleri azar azar ısırarak beslenir, büyük soruları tek bir lokmada hazmetmeyi denemez.

Bir şeyi anlamanın yolu gözlem, özellikle de ölçüm dediğimiz niceliksel gözlem türü ile mantık dediğimiz sistematik düşünme tarzının birleştirilmesinden geçer. İleride *şu* anki eylem sahnesi anlayışımıza yol açacak olan ilk adımlar, Babillilerin ve Mısırlıların ölçümleri, Yunanların da mantığı sağlamasıyla atıldı. Babil-lilerde işlemler vardı ama ispatlar yoktu; Yunanlar kanıtlamayı getirdi. Örneğin Babilliler dik açılı üçgenin kenarlarının karelerinin toplamının hipotenüsün karesine eşit olduğunu Yunanlardan bin yıl önce biliyordu, fakat bu bağıntının bütün dik açılı üçgenler için geçerli olduğunu kanıtlamak, biz Pythagoras deyip geçsek de muhtemelen bir matematik kolektifi olan grup sayesinde, Yunanlara düştü. İşlemler bilginin ve uygulamanın temelidir ama kanıtlar onun içyüzünün kavranmasını geliştirir ve derin bir kavrayışın elde edilmesine götürür.

Bir dizi önemli ders içerdği için Pythagoras'ın teoremi üzerinde biraz duracağım. Hatta şu anki uzay ve zaman anlayışımızın bir dizi özelliğinin Pythagoras (, yak. MÖ 500), Eukleides (Öklit, yak. MÖ 300) ve Pergalı Apollonius'un (yak. MÖ 200) çalışmalarında öngörüldüğünü göreceğiz. Aslında bu bireyler hakkında hiçbir şey bilmiyoruz ve haklarında anlatılanların çoğu ölümlelerinden yüzlerce yıl sonra yazıldığı için söylenenlere de güvenemeyiz. Yine de olağanüstü düşünceleri bir şekilde günümüze ulaşmıştır ve bize boş uzayın özelliklerine dair içgörü ve kanıt yönünden tam bir hazine sunmaktadır.

Bir kıssayla başlayalım ve Mezopotamya'nın eski fatihi Hammurabi'nin bundan 3500 yıl önce meseleye nasıl yaklaşmış olabileceği konusunda bir hayal kuralım. Hammurabi'nin dünyasında yaşanan birçok aksaklıktan biri de diyelim ki kuzey-güney yönündeki mesafelerin metre cinsinden, doğu-batı yönündeki mesafelerinse yarda¹ cinsinden ölçülüyor olması olsun.

Hammurabi'nin yerölçümcüleri yeni fethettiği tarlaları ölçerken vergilendirmeye ilgili esrarlı bir nedenden ötürü köşegenlerin ve kenarların uzunluklarını ölçmek için ölçüm birimlerini bu yöntem uyarınca kullandılar. Tahmin edebileceğiniz üzere Hammurabi, yerölçümcülerinin raporlarında yazan sayılar arasında mantıklı bir uyuma şahit olmadı. Örneğin kuzey-güney yönünde hizalanmış bir tarlanın kenarları 120 metre ve 130 yarda, köşegeniyse 169 metreyken, başka bir doğu-batı hizalı tarlanın kenarlarıysa 131 yarda ve 119 metre, köşegeni 185 yardaydı. Hammurabi şakınlığa düşmüştü, çünkü iki tarla da aynı gözüküyordu.

Günün birinde aklına parlak bir fikir geldi. Eski birim standartlarını geçersiz ilan edip bundan sonra uzaklıkların metre cinsinden raporlandırılmasını emretti. Hummalı bir çalışmanın ardından yerölçümcüleri yeni bir kenar ve köşegen listesi oluşturdu. Artık ölçümlerinin daha çok işe yaradığı kolayca görülüyordu. Aynı gibi görünen iki tarlanın kenarları 120 m ve 119 m,

1 ABD, Birleşik Krallık ve İngiliz Milletler Topluluğu ülkelerinde kullanılan ve değeri 0,9144 m'ye eşit uzunluk ölçüsü birimidir –çn.

köşegenleri de 169 m'ydi.² Aynı birimleri kullanarak ölçümlerinin hepsini düzene sokmasıyla Hammurabi şekli yönlenmeden ayırmıştı: Aynı şekle sahip bütün cisimler yönlenmelerinden bağımsız olarak aynı boyutlara sahipti.

Hammurabi, krallığının ölçü bilimini düzenlemede daha da ileri gitti. Krallığındaki bütün tarlalar aynı boyutlara sahip değildi ve ölçümcüleri metreyle ifade edildiğinde bile gözlerine rasgele gözüken kenar ve köşegenlere sahip tarlalarla dolu bir liste sunmuştu. Örneğin zengin bir köylü kenarları 960 m ve 799 m, köşegeni 1249 m olan bir tarlaya sahipken, başka bir fakir köylü kenarları 60m ve 45m, köşegeni 75m olan bir tarlaya sahipti. Bizim hayal ürünü ama zeki Hammurabimiz yeni bir *eureka* anı yaşadı. Boyutları ne olursa olsun bütün tarlalarında kenarların uzunluklarının karesi alınır ve bunlar toplanırsa, çıkan sonucun köşegenin uzunluğunun karesine eşit olduğunu gördü. Yerölçümcülerinin topladığı bütün ölçümler, köşegenin uzunluğuna *uzaklık* dersek, şu formüle uyuyordu:

$$\text{Uzaklık}^2 = \text{kenar}_1^2 + \text{kenar}_2^2$$

Cimri bir hükümdar olarak artık ölçümcülerine tarlaların sadece kenarlarını ölçmelerini emrederek zaman ve maaş tasarrufu yapabiliirdi, çünkü köşegenlerin uzunluklarını kendisi çıkartabiliyordu. Hatta krallığın tuhaf birimlerini kullanmakta ısrar ettiklerinde bile köşegenin uzunluğunu hesaplayabiliyordu. C yardayı metreye çevirmek için gereken katsayı, krallığın büyük saygı gösterilen temel sabitlerinden biri olmak üzere³ şöyle yazabilirdi:

$$\text{Uzaklık}^2 = (C \times \text{kenar})^2 + \text{kenar}^2$$

Artık Hammurabi'ye atfettiğimiz bu bol formüllü, verimli, vergili söylenceyi bir kenara bırakabiliriz. Formülünü dünyevi hedeflere oturtmasından da önemli olan şey, aslında onun Me-

2 Bu sayıları ve bunların altındakileri yaklaşık olarak MÖ 1700 tarihli Babil tabletli *Plimpton 322*'den aldım.

3 $C = 0.9144$ m yard ¹ olduğunu da kayda geçelim. Hammurabi'nin bilimcileri metre çubukları ile yardaları dikkatle karşılaştırarak C 'yi saptamak için çok zaman harcamaktaydı. Hammurabi bunun zaman kaybı olduğunu düşündü ve bundan sonra C 'yi bu değerle *tanımlamaları* emrini verdi ve aslında yardayı (bugün yaptığımız gibi) metre cinsinden tanımlamış oldu.

zopotamya'da bir şekilde uzay özelliklerini özetleyen bir ifadeyi tanımlamış olmasıdır. Vedalar dönemi (MÖ 500 civarında) rahiplerinin karmaşık adak işlemlerini anlatan *Salvasutras* adlı eseri kaleme alan adını bilmediğimiz Hintli de formülü biliyordu, çünkü Brahma rahipleri güvenilir biçimde tasarlanmış ve inşa edilmiş dikdörtgen sunaklara gereksinim duyuyorlardı. Keza yaklaşık olarak MÖ 200'de başlayan Erken Han döneminde derlenen *Jiuzhang suanshu*'yu [Matematik Sanatı Üzerine Dokuz Bölüm] yazan Çinli de biliyordu.

İki nokta arasındaki uzaklık için özel bir formülün var olması *geometrinin* var olması, onun içerisinde var olabilen noktalar, doğrular, düzlemler ve hacimler cisinden bir uzay betimlemesinin var olması demektir. İçerisinde bulunduğumuz uzayın geometrisini tanımlamak için formülü tanımlamamız gerekir. Hammurabi'nin Mezopotamya uzayının geometrisini tanımlaması için iki adım gerekir. Önce çeşitli koordinat eksenlerindeki birimleri birleştirmesi gerekmiş, ardından iki nokta arasındaki uzaklığı veren formülü bulması gerekmiştir. Hindistan'da ve Çin'de aynı *C* değeri ve aynı formül geçerli olduğu için, buradan Hindistan ve Çin'deki uzayın Mezopotamya'daki uzayla aynı geometriye sahip olduğu sonucu çıkar. Hammurabi'nin formülünün sadece Mezopotamya'da değil evrende (ya da en azından onların düşüncesine göre evrende diyelim) her yerde geçerli olduğunun *kanıtı* Pythagoras ve okulu tarafından sağlanmış olabilir, ama bunu sadece kullanmak dışında bir şey yaptıklarına dair de güvenilir kanıtlara sahip değiliz. Teoremin kanıtını bulmak için bundan 2300 yıl önce yazılmış ve o günden bugüne basılı olarak elimize ulaşmış Eukleides'in *Stoikheia*'sına [Öğeler] gitmemiz gerekir, ama Eukleides'in kanıtının ilk olduğunu varsaymak için de bir neden yoktur.

Eukleides "aksiyomlar" adını verdiği beş basit ve bariz görünen önermeyle, Hammurabi'nin formülünü çıkarımlamak dahil, uzayın özelliklerini özetleyebildiğini buldu. Bu gerçekten müthiş bir başarıydı. Bundan 2000 yıl önce yaşıyor olsaydım Eukleides'in aksiyomlarını bilimin büyük fikirlerinin içerisine eklerdim, çünkü bunlar küçük bir kusur haricinde büyük fikir olma ölçütlerinin gereğini yerine getirmektedir: Basitler, ama sınırsız

zenginlikte sonuçlara sahipler. Elbette bahsettiğim kusur (içerisinde bulunduğumuz uzayın kusurlu bir betimlemesi olmaları anlamında) yanlış olmalarıdır; fakat şu an bu ayrıntıyı göz ardı edip Eukleides'e hak ettiği saygıyı göstermeliyiz.

Eukleides uzay betimlemesini şu beş noktada topladı:

1. *Herhangi iki nokta arasında bir doğru çizilebilir.*
2. *Bir doğru her iki yöne doğru sınırsız olarak uzatılabilir.*
3. *İstenen merkez ve istenen yarıçapta bir çember çizilebilir.*
4. *Bütün dik açılar birbirine eşittir.*
5. *Bir doğru ve bu doğrunun üzerindeki bir nokta verildiğinde, ilk doğruya paralel olarak bu noktadan geçen **yalnızca bir** doğru çizilebiliriz.*

(Önergeleri biraz basitleştirdiysem de özünü muhafaza ettim.) Beşinci aksiyom *paralel postüla* olarak bilinmektedir. Matematikte şimdiye kadarki önermelerin hepsinden daha çok üzüntüye sebep olmuştur diyebiliriz, çünkü diğerlerine uymayan karmaşık bir görünüme sahiptir ve daha basit diğer dört aksiyomdan kanıtlanabilir olması gerektiğini baştan çıkarıcı bir biçimde sezdirir. Ne var ki bu aksiyomu diğerlerinden çıkarsamak için nice ömürler boşa harcanmış, başarılı olunamamıştır. Bugün diğer aksiyomlardan bağımsız olduğunu ve paralel postülanın yerini alabilecek kabul edilebilir kusursuz geometriler kurulabilmesinin mümkün olduğunu biliyoruz. Şunun gibi:

5'. *Bir doğru ve bu doğrunun üzerindeki bir nokta verildiğinde, ilk doğruya paralel olarak bu noktadan geçen **hiçbir** doğru çizemeyiz.*

Hatta şunun gibi:

5''. *Bir doğru ve bu doğrunun üzerindeki bir nokta verildiğinde, ilk doğruya paralel olarak bu noktadan geçen **sonsuz sayıda** doğru çizilebiliriz.*

Eukleides'in paralel postülasını kullanan uzay tanımına *Öklit geometrisi* denmektedir; alternatif postülalara dayanan tanımlara da *Öklit-dışı geometriler* denmektedir.

Şimdilik Öklit geometrisiyle devam edelim, çünkü bu bizim içerisinde yer aldığımız uzaya kesinlikle uyuyor gibi görünüyor. Eukleides'in on üç kitabı beş aksiyomdan olağanüstü sayıda özellik çıkarsanabildiğini gösteriyor ve gerçek ölçümlerle karşılaştırılınca da bu özelliklerin geçerli olduğu görülüyor. Aksiyomların, özelde de paralel postülanın sonuçlarından biri de I. Kitap'ın sonunda kanıtlanan Pythagoras'ın teoremidir. Dolayısıyla bizim *uzaklık* konusundaki efsanevi Hammurabi formülümüzün varlığına Eukleides'in beş aksiyomunda örtük olarak işaret edilmektedir ve Hammurabi'nin geometrisi de aslında Eukleides'indir.

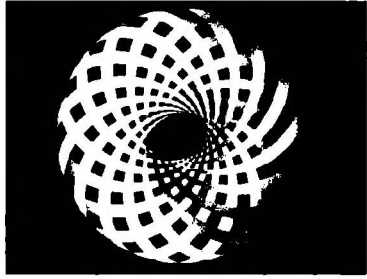
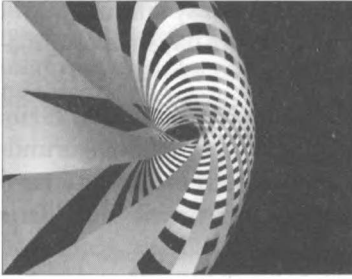
Şu ana dek bir düzlemin, düz bir iki boyutlu bölgenin Öklit geometrisini bir kâğıt yaprağının yüzeyi gibi ifade ettik. Ne var ki hepimiz yukarı-aşağı iniş çıkışın olduğu üç boyutlu bir uzayda yer aldığımızı biliyoruz ya da bildiğimizi düşünüyoruz. Pythagoras'ın teoreminin ek kenarın uzunluğu da eklenerek üç boyuta genişletilmesi zor değildir:

$$\text{Uzaklık}^2 = \text{kenar}_1^2 + \text{kenar}_2^2 + \text{kenar}_3^2$$

Burada durmamız da gerekmez. Matematikçiler genelleştirme yapmaya doymak bilmez bir tutkuyla bağlıdır ve Öklit geometrisi de genelleştirmeye uygun bereketli bir topraktır. Çoğumuz alışkın olduğumuz üç boyutun ötesinde bir şeyi hayal edemiyor olsak da, bu tür uzayların özelliklerinin formül kullanımıyla ifade edilmesi kolaydır. Bu nedenle dört boyutlu bir Pythagoras, bir 4-Pythagoras şöyle yazacaktır:

$$\text{Uzaklık}^2 = \text{kenar}_1^2 + \text{kenar}_2^2 + \text{kenar}_3^2 + \text{kenar}_4^2$$

Üçten çok boyutlu uzayları düşünmenin entelektüel eğlence dışında fazla bir anlamı yok diye düşünürseniz yanlış yaparsınız. İleride örneğin boyutlar arasında geçişler yapma becerisinin dünyanın yapısını anlamada değerli bir yöntem olduğunu göreceğiz. Dahası bizim gerçek dünyamızda sadece üç boyut olduğundan emin olabilir miyiz, yoksa bir şekilde bizden saklı duran birkaç (hatta daha çok) boyut daha olabilir mi? 8.

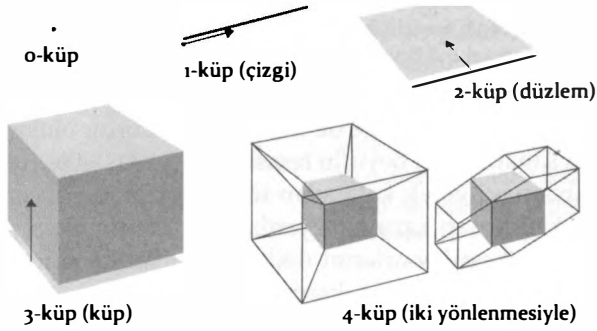


Şekil 9.1 Grafik görüntü ve canlandırmalar sayesinde hiperuzaydaki cisimlerin şekillerine ilişkin bazı ipuçları elde edilebilir. Buradaki düz bir torusun dört boyutta dönmesinin canlandırılmasından alınan iki sahnede önce üç boyutlu bir izdüşüm alınarak ardından iki boyuta indiriliyor.

Bölümde emin olamayacağımızı görmüştük; belki de bir zaman boyutunun yanı sıra on uzay boyutunun içerisinde yer alıyor da olabiliriz.

Üç boyutun ötesini hayal edemediğimizi iddia ettim. Bu tam doğru değil. Daha yüksek boyutlu geometrileri çalışarak ömrünü geçirmiş kimi insanlar üç boyutta var olmayıp dört boyutta var olan bağlantıları kestirebildiklerini iddia ediyor, ayrıca dört boyutlu dünyalardan üç boyutlu dilimleri gösteren büyüleyici bilgisayar görüntüleri de yapılmış durumda (Şekil 9.1)⁴. Sizden de aynısını yapmanızı istemeyeceğim ama bundan sonra konuşacaklarımıza hazırlık olması bakımından dört boyutlu görüntülere bir aşinalık yaratmak da gerekiyor. Bunun için 13. yüzyılın sonu, 14. yüzyılın başlarında yaşayan ve üç boyutu iki boyutta ifade etmeye başlayan Giotto di Bondone ve Piero della Francesca gibi İtalyan ressamların önderlik ettiği entelektüel devrimin yolundan ilerleyerek 18. yüzyılın sonunda *Géométrie descriptive* (1798) adlı eserinde buna matematiksel temele yerleştirilmiş bir perspektif ekleyen Comte de Pélouse unvanlı Gaspard Monge'dan (1746–1818) bahsetmeliyiz. Ardından biraz daha ilerleyip dört boyutlu sahnelerin üç boyutlu projeksiyonların iki boyutlu resmedilişiyle nasıl gösterilebildiğini bilmeliyiz. Bunlar kulağa

4 Dönen bir hiperküpün canlandırılmış, stereoskopik bir görüntüsü burada bulunabilir: <http://dogfeathers.com/java/hypercube.html>.



Şekil 9.2 Önceki küp yeni, dik bir yöne hareket ettirilerek farklı boyutlarda küpler yapılabilir. Burada bir 0-küpten (bir noktadan) oluşturulan bir küp ailesi görüyoruz. Bir çizgi (1-küp) noktanın bir yöne doğru sürüklenmesiyle elde edilir, bir düzlem (2-küp) bu çizginin dik bir yönde sürüklenmesiyle elde edilir, bildiğimiz olağan bir küp (3-küp) bu düzlemin yeni bir dik yönde sürüklenmesiyle elde edilir. Kübün sonuçta ulaşılan iki boyutlu gösterimini nasıl yorumlayacağımızı öğrenmiş olduk. Son olarak dört boyutlu bir hiperküp de (4-küp) 3-küpün yeni bir dik yöne doğru daha sürüklenmesiyle oluşturulur. Biz insanlar ortaya çıkan grafiğin nasıl yorumlanacağını henüz öğrenmedik: Hiperküpün iki farklı yönlenmede döndürülmesiyle elde edilen iki görüntüyü gösteriyorum.

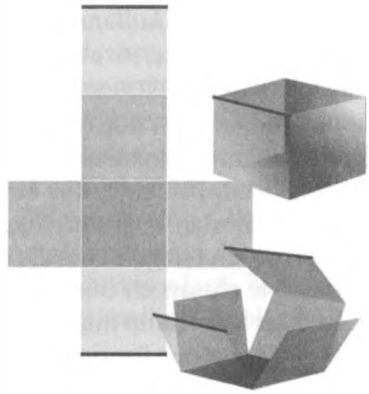
biraz karmaşık gelebilir, çünkü ömrü boyunca düz bir dünyaya hapsedilmiş olan bir karıncaya yukarı-aşağı yönlerde düşünmesi için hayal gücünü kullanmasını söylemeye benzemektedir. Fakat düşünsel olarak karıncalardan daha donanımlı olduğumuz için biraz ilerleme göstermemiz beklenebilir.

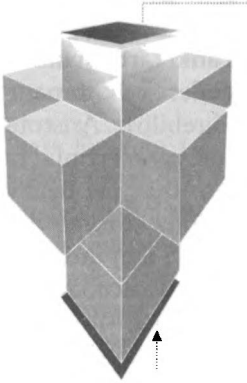
Sıfır boyutlu bir küp (0-küp) bir noktadır. 0-küpü kurşun kalemle yazılan bir nokta olarak düşünün, bu durumda bir boyutlu bir küp (1-küp) kalemin düz bir çizgi boyunca hareket ettirilmesiyle oluşturulan doğrudur (Şekil 9.2). İki boyutlu bir küp (2-küp), 1-küpün (çizgi) ilkinde dik olan yeni bir boyuta doğru sürüklenmesiyle oluşan bir düzlemdir. Tüm bunlar bizlerin imgelemi ve zeki bir karıncanın imgeleminin yol göstericiliğinde iki boyutlu bir kâğıt parçası üzerinde rahatlıkla yapılabilir niteliktedir. Üç boyutlu bir küp (3-küp) gündelik yaşamdan bildiğimiz küp bir

2-küpün, bir düzlemin dik bir yönde sürüklenmesiyle oluşturulur. Bu adımın tahayyülünde bizim için bir sorun olmasa gerekir, ama bir karınca üçüncü bir dik yönün nasıl olabileceğini göremediği için şaşıracaktır. Bir 3-küpün bir 2-sayfada, normal bir kâğıt sayfasında gösterilmesinde de herhangi bir sorun olmayacaktır, zira artık sanattaki iki boyutlu temsillere o kadar aşinayız ki fazla çaba harcamaya gerek kalmadan temsili çizimin şifresini çözebiliriz. Akıllı karışan karıncaya yardım etmek için şunu yapabiliriz. 3-küpün bazı kenarlarını dikkatle keserek onu açar ve düz şekilde yayarız (Şekil 9.3), karıncaya 3-küpün köşeler bir araya getirilerek nasıl yapıldığını söyleriz. Karıncanın benim çizerek işaretlediğim köşelerin nasıl bitişik olabildiği konusunda akıllı karışık olacaktır yine, ama en azından 3-küple neyin kastedildiği konusunda bir sezgiye sahip olacak ve belki de bizim 3-küpümüzün iki boyutlu temsillerini yorumlamaya bile başlayabilecektir; karıncanın yorumları belki de kendisine bir altıgen gösterdiğimize yemin edeceği komik anları da içerecektir.

Artık bildiklerimiz dört boyutlu bir küpü (4-küp) inşa etmeye yeter. Matematikğin büyük bir kısmı benzetme yoluyla ilerler. Nasıl 1-küp inşası için 0-küpü ve diğerlerini de aynı şekilde, 4-küpü yapmak için de 3-küpü (bildiğimiz küpü) ilk üç boyuta dik bir yönde sürükledik. Şu anda *bizler* de şaşırmış karıncalar durumundayız, çünkü üç boyutlulara dik bir yönü kafamız almıyor.

Şekil 9.3 Üç boyutlu uzayda olağan bir küp, komşu kenarlarının yapıştırılmasıyla yapılmış hac şekline benzer altı kareden oluşan bir şekil, uzun şeridin katlanması ve koyu çizgilerle işaretlenmiş kenarların birleştirilmesiyle elde edilebilir. Kâğıda dik boyutun koyu kenarların birleştirilmesi için kullanılabildiğini görmek bizim için kolay, ama iki boyuta hapsedilmiş bir varlık için zordur.





Şekil 9.4 Şimdi bir adım daha ilerliyor ve üç boyutlu bu sekiz küple (biri kesişme noktasının içinde saklı kalıyor) komşu yüzleri yapıştırarak bir hiperküp elde ediyoruz. Koyu yüzeylerle ve noktalı çizgilerle gösterilen iki yüzü de birbirine yapıştırmamız gerekecektir. Üç boyuta hapsedilmiş varlıklar olarak bunun nasıl başarılabilildiğini üç boyut içerisinde görmek zordur, dört boyutta kolaydır.

Yine de tıpkı karıncanın üçüncü bir boyutu kavrayamamasında olduğu gibi, biz de düşünsel bir sıçrama yaparak bu boyutun var olduğunu kabul edebilir ve (aynı karınca gibi) benzetme yoluyla anlamaya çalışabiliriz. Şekil 9.2’de gösterilen 4-küpün iki boyutlu görüntüsünü anlamamıza yardımcı olması için, küplerin yüzlerinden bazılarını kesip üç boyutta önümüze serecek bir hipervarlık bulabiliriz (Şekil 9.4). Bir 3-küp nasıl altı 2-küp şeklinde açılıyorsa, bir 4-küp de sekiz 3-küpe açılır (3-küplerden biri üstteki kesişmenin merkezinde gizlenmektedir).⁵ 4-küpün yüzünü oluşturan sekiz 3-küpten nasıl yapıldığını kafanızda canlandırmak için bunları birbirine yapıştırılmış olarak düşünüyoruz. 2-karıncalara benzeyen biz 2-okurlar, tıpkı üç boyutla sorun yaşayan 2-karıncalar gibi, örneğin işaretli iki yüzün nasıl birleştirilebileceğini kavramayı olanaksız buluyoruz. Bir 4-okur olsa hiç sorun yaşamazdı.

3. Bölümde gördüğümüz üzere 17. yüzyılda Isaac Newton (1643-1727) Galileo’nun gözlemlerini geliştirerek Eukleides’in istikrarlı uzay betimlemesine bu uzaydan geçen bir hareket betimlemesini ekleyince Öklit geometrisi tamamlanmış oldu. Newton

5 Salvador Dali ne yaptığını biliyordu. Piero della Francesca’nın *Flagellation of Christ*’ı (tahminen 1460) ile Dali’nin *The Crucifixion: Corpus hypercubicus*’u (1954) arasındaki fark göstermeye uğraştığımız ilerlemeyi yansıtmaktadır.

böyle yaparak bizi parçacıkları düz çizgilerden iterek uzaklaştıran ve farklı hızlarda hareket etmelerine neden olan bir etkiyle, kuvvet yaklaşımıyla tanıştırmış oldu. Şu anki tartışmamız bağlamında Newton'ın katkısını başarılı denebilecek ilk zamanı uzayla birleştirme denemesi olarak değerlendirebiliriz. Aristoteles de denemişti, ama yolların belirlenmesinde geometrinin taşıdığı önemi anlamadığı için başarısız olmuştu: Dünyevi deneyiminden yola çıkarak kuvvetlere parçacıkların düz çizgiler üzerinde düzgün şekilde hareket etmeyi sürdürmeleri için ihtiyaç duyulduğunu düşünmüştü. Öte yandan Newton parçacıkların izlediği yolların belirlenmesinde geometrinin gücünü anlamıştı. Kuvvet kavramını, düz bir çizgide istikrarlı hareket olarak anladığı doğal yolculuktan *sapmaları* ifade etmek için kullandı.

Newton açısından, ondan 2000 yıl önce Aristoteles'te olduğu gibi, uzay ve zaman mutlaktı; uzay sahnedeki bütün aktörlerin paylaştığı hareketsiz bir platform, zamansa hepsi için ortak tıklayan bir parametreydi:

*Mutlak uzay, doğası gereği dışsal hiçbir şeyle bağıntısı olmadan her zaman benzer ve hareketsiz kalır... Mutlak, gerçek ve matematiksel zaman, kendinde bir şey olarak ve yine doğası gereği dışsal hiçbir şeyle bağıntısı olmadan düzenli şekilde akar.*⁶

Benim için bugün Salıysa, herkes için Salıdır ve benim için bir saat geçtiyse, herkes için bir saat geçmiştir. Bir gözlemci için iki noktanın arası 1 km ise, o halde bütün gözlemciler için o iki noktanın arası 1 km'dir. Diğer bir deyişle uzay sabit, mutlak bir sahnedir ve zaman evrensel bir akışa sahiptir.

Uzaktan etkime kavramı, bir yıldızın uzaktaki bir gezegenin yolunu daireye benzer bir şekilde dolandırabilmesi son derece kafa karıştırıcıydı. Newton da bunu kendi kuramının bir kusuru olarak gördü, ama becerileri konusunda pragmatik bir yaklaşıma sahipti ve bu muammanın çözümünü başkalarına bıraktı: O dışlayan biriydi, bir lokmada yutan biri değil. Bilmeceyi neredeyse

6 *Principia*, tam adıyla *Philosophiae naturalis principia mathematica* [Doğa Felsefesinin Matematiksel Prensipleri, 1687].

tek başına çözen kafa Einstein oldu ve bu bölümün geri kalanında onun ne kadar büyük bir başarı elde ettiğini göreceğiz.

Albert Einstein (1879–1955) uygarlığı ileriye taşıdı ve bunu iki adımda yaptı. Bir adımda uzayı zamana Newton'un yaptığı denemeden çok daha yakın bir tarzda bağladı. Bunu yaparken Newton'ın mutlak uzay ve zaman algısını yıktı ve evrensel tıklamayı sildi attı. İkinci adımda Newton'ın en büyük başarılarından birini, bir kuvvet olarak evrensel kütleçekim kavramını geçersiz kıldı, tasfiye etti. Büyük muammalar sık sık tasfiyeyle çözülür ve bilimcilerin kendi kavramları dahil çok önemli kavramların çökmesinden hoşlanmaları icap eder.⁷ Bu iki adımı atarken Einstein'a eşlik edeceğiz. İkinci adım, daha büyük olanı ilki olmadan atılamazdı ve nerede, neyin içinde, ne zaman yer aldığımızı gerçekten anlamak istiyorsak eğer, onun ilerlemesinin gerisinde kalmamak zorundayız.

Einstein'ın ilk başarısı *özel görelilik* kuramıydı. Özel görelilik kuramı insanların düzgün, ivmesiz, görelî hareket içerisindeyken yaptığı gözlemlerin betimlemesidir. Einstein'ın temel yaklaşımı, düzgün hareket halinde olan insanların, pencereden dışarı bakmadan, hareket edip etmediğinin saptanmasının olanaksız olduğuuydu. Einstein vardığı bu sonucu *eylemsiz çerçeveler denktir* ifadesiyle kısa ve öz bir şekilde belirtti. “Eylemsiz çerçeve” düzgün hızda, düz doğruda hareket eden bir platformdur. Galileo 17. yüzyılın başlarında, kendisini durgun bir denizde bir geminin kapalı penceresiz bir kamarasında yolculuk ederken hayal ederken aynı fikre ulaşmıştı: Düşünebildiği hiçbir deney geminin hareket edip etmediğini saptayamıyordu. Eylemsiz çerçevenin daha modern bir örneğini bulmak için düzgün uçuştaki bir uçağın bir kamarasının içerisinde gerçekleştirilen deneyleri düşünebiliriz: Dış dünyayla hiçbir referans sağlayamadığımız koşullarda, hareketi saptayabilmemiz mümkün olmaz. Galileo ile Einstein ve arala-

7 İdeal bir dünyadan söz ediyorum elbette. Karşı karşıya gelselerdi Newton'ın Einstein'a karşı nazik davranacağını hiç sanmıyorum. Newton çağdaşlarından çok azına karşı nazikti; dürüst oldukları açık olanlar dahil hiçbir bilim insanına da nazik davranmadı; entelektüel devrilmeler, boşa düşürülmeler kişiler hayattayken hiç hoş karşılanmaz.

rındaki iki yüzyıl arasındaki en can alıcı fark, Einstein'ın elektrik, manyetizma ve hareket eden cisimlerin dinamiği (sarkaçlar vs) hakkında bilgiye erişebiliyor olmasıydı.

Einstein'ın eylemsiz çerçevelerin denkliği fikrinin önemini anlamak için, gelin sizin ve benim, her ikimizin de ders kitabı yazdığımızı varsayalım. Ben kendimi bir dizi deney yaptığım bir laboratuvar da durağan bir durumda görüyorum; siz kendinizin bana doğru düz bir çizgi üzerinde göreceli olarak saatte 1.000.000.000 km'lik bir hızla (km/h; bu hız ışık hızının neredeyse yüzde 93'üne karşılık gelir ve Dünya'nın çevresini dolaşması yaklaşık 0,14 sn sürer) hareket ettiğinizi düşünüyorsunuz. Kitaplarını başkalarının çalışmalarını derleyerek oluşturan diğer yazarların aksine bizler bütün klasik deneyleri kendimiz gerçekleştirmeye karar verdik; Galileo'nun eğik Pisa kulesinden topları bırakması, Faraday'in elektromanyetik indüksiyonu keşfi, Michelson ve Morley'nin esir içerisindeki hareketi kanıtlamak için başarısız uğraşları vs. Einstein'ın yaklaşımına göre siz bana göreceli olarak 1.000.000.000 km/h hızla hareket ediyor olmanıza rağmen her ikimiz de esasen aynı kitabı yazarız. Sözcüklerimiz elbette farklı olur ama öğrettiğimiz fizik arasında bir farklılık olmaz. Ders kitaplarımızı değiştirsek siz benimkini, ben sizinkini kullanabilirim. Ders kitaplarımızın denkliği fiziğin bütününe doğru genişler, sadece hareket eden parçacıklara değil (Galileo), elektriğe ve manyetizmaya da (Einstein).

Şimdi en önemli noktaya geldik. Fizikteki birçok denklem, özellikle de elektriği ve manyetizmayı tanımlayanlar ışık hızına, c 'ye⁸ dayalıdır. Problem de budur. Elektromanyetizma konusundaki bölümlerimde kullandığım ifadeler c 'nin benim laboratuvarımda ölçtüğüm belirli bir değerini gerektiriyor. Sizin kendi bölümünüzde kullandığınız ifadeler de belirli c değerini kullanıyor ve benim sizin fizik kitabınızdan ders anlatabilmem için sizin ölçtüğünüz c değerinin benim ölçtüğüm c değeriyle tam olarak aynı olması gerekiyor. Başka bir deyişle siz c 'yi ölçerken bana göreceli olarak 1.000.000.000 km/h hızda hareket etseniz bile, be-

8 Bilimciler c 'nin değerini ölçmek için az zaman harcamadı. Fakat bugün, Hammurabi'nin C 'si gibi, o da net şekilde *tanımlandı* ve şu değere sahip: $c = 299.792.458 \text{ m s}^{-1}$. Işık hızı artık ölçtüğümüz bir nicelik değil.

nimle tam olarak aynı değeri ölçüyorsunuz. Sizin ders kitabınızın benimkiyle uyumlu olması yalnızca bu şekilde mümkün olabilir.

Farklı eylemsiz çerçevelerde farklı hızlarda hareket eden (siz ve ben) gözlemcilerin aynı ışık hızını ölçmesi olgusu uzay ve zaman anlayışımız açısından derin sonuçlara işaret ediyor. Örneğin evrensel eşzamanlılık kavramını ortadan kaldırıyor ve sadece bir sahne olarak uzay kavramını geçersizleştiriyor. Bu sonuçlar inanamamızın öğretildiği her şeyi çöpe attığı için doğa anlayışımızı düzeltmemiz açısından hayati bir andır. Nedenleri daha eksiksiz görebilmeyiz.

Bana göre bu kadar hızlı hareket etmenize rağmen aynı c değerini ölçmeniz nasıl mümkün olabiliyor? Bir çözüm, sizin mesafe ve zaman ölçümlerinizin benimkilerden farklı olmasıdır. Örneğin ölçü cetvelleriniz benimkilerden kısaysa ve saatleriniz daha yavaş işliyorsa ikimiz aynı olguyu gözlemliyor olsak bile, siz benimkilerden farklı değerleri raporlaştırırsınız. Bu nedenle bir ışık ışınına benimkinden 1.000.000.000 km/h daha hızlı ilerleyen bir lambadan yayılma yoluyla verdiğiniz “itme” belki de sizin uzay ve zaman algınızdaki değişimler tarafından ortadan kaldırılmış olabilir. Anlayacağınız sizin hareketinizin ışığın hareketine sağladığı itme, bu algı değişimi tarafından tümünden götürülmüş olabilir. Bu tür değişikliklerin varlığı İrlandalı fizikçi George Fitzgerald (1851–1901) ve Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz (1853–1928) tarafından birbirlerinden bağımsız olarak ortaya atılmıştı ve Fitzgerald–Lorentz büzülmesi olarak bilinmekteydi. Einstein’ın başarısı onların *ad hoc*⁹ varsayımlarını, bunların uzay ve zaman geometrisinin sonuçları olduğunu öne sürerek, daha sağlam, daha derin bir kuramsal temele oturtmasıdır.

Einstein meselenin özünü yakaladı. Bu şekilde ifade etmemiş olsa da, Hammurabî’nin yerölçümcülerinin zaman baskısı altında olduğunu ve ölçümelerini tarlalarda koşma koşma yaptıklarını hayal etmiş olabilir. Fakat aynı tarlalarda farklı hızlarda hareket eden yerölçümcüler farklı köşegen uzunlukları raporlaştırmış

9 (Lat.) amaca özel; bir kuramın geçerliliğini desteklemek üzere kurama ilave edilen varsayımdır –çn.

olabilirdi ve farklı yerölçümcülerin hareket ettikleri hıza ve yöne bağlı olarak farklı değerler rapor ettiği Hammurabi'nin *uzaklık* formülü artık işe yaramazdı. Bir aydınlanma sıçramasıyla kurgusal Hammurabi'miz ve gerçek Einstein'ımız uzaydaki bir noktanın yerini belirtmenin artık yeterli olmadığını söylediler: Yerölçümcüler o andan itibaren hem noktanın bulunduğu yeri hem de kendi saatlerine göre kayıt ettikleri zamanı rapor etmek zorundadır. Bu ikili ölçüme *olay* diyoruz. Einstein asıl "değişmez" in, hızından bağımsız olarak herkesin kabul edebileceği rakamın iki olay arasındaki *aralık* olduğunu ileri sürdü. Uzayda (belirli bir yerölçümcü tarafından ölçüldüğü haliyle) *uzaklık* tarafından ayrılmış ve zamanda (aynı yerölçümcü tarafından ölçüldüğü haliyle) zaman tarafından ayrılmış iki olay arasındaki aralık, *uzaklık* daha önce kullandığımız ifade kullanılarak hesaplanmak üzere, şu şekilde tanımlanır:

$$\text{Aralık}^2 = (c \times \text{zaman})^2 - \text{uzaklık}^2$$

İki olayın uzamsal yerleri arasında sizin ölçtüğünüz uzaklık benim ölçtüğümden daha küçük olduğu ama aralık aynı olduğu için, $(c \times \text{zaman})^2 - \text{uzaklık}^2$ farkının korunabilmesi için, iki olay arasındaki zaman da daha küçük olmalıdır. Diğer bir ifadeyle zaman sizin için benim için aktığından daha yavaş akmaktadır.¹⁰ Her birimizin ölçtüğü zamana *kişisel zaman* denir: Ben sizin kişisel zamanınızın benim kişisel zamanımdan daha yavaş geçtiğini düşünürüm. Siz benim size göreli olarak hareket ettiğimi düşündüğünüz için, siz de benim kişisel zamanımın sizinkinden daha yavaş geçtiğini düşünürsünüz.

Einstein'ın ortaya attığı fikir uzay ve zaman algımızda çok ciddi bir değişim gerektirir. Birincisi evrensel eşzamanlılık kavramını ortadan kaldırmaktadır: Farklı eylemsiz çerçevelerdeki gözlemcilerin iki olayın eşanlı olup olmadığı konusunda anlaşması artık mümkün değildir. Bu sonucun ne anlama geldiğini anlamak

10 Ayrıntıya girmeye gerek yok ama tam olması için ekleyelim: Uzay geminizin uzunluğunun *uzunluk* olduğunu biliyorsanız, o halde benim ölçtüğüm uzunluk, *hız* sizin bana ışık hızının belirli bir oranı şeklinde ifade edilmiş görelî hızınız olmak üzere, $\text{uzunluk} \times (1 - \text{hız}^2)^{1/2}$ olur. 100 km/h'te $(1 - \text{hız}^2)^{1/2}$ çarpanı 1'den yaklaşık 100 trilyonda bir oranında farklılaşır, dolayısıyla Hammurabi aceleci yerölçümcülerinin ölçümlemlerini yaptığı hız konusunda hiç kaygılanmasa yeridir.

için sizin 100 m olduğunu bildiğiniz bir uzay gemisinde olduğunu varsayalım. Benim yanımdan 1.000.000.000 km/h hızla geçiyorsunuz. Uzay gemisinin iki ucunun bulunduğu yeri belirli bir anda not ediyorum ve birbirlerinden yalnızca 38 m ayrı olduklarını buluyorum. İki olay (iki ölçüm) arasındaki zaman ayrılığı eşanlı oldukları için sıfırdır, dolayısıyla aralarındaki aralık benim ölçtüğüm uzamsal ayrılıkla aynıdır ve bu 38 m'dir. Siz uzay geminizin 100 m uzunluğunda olduğunu biliyorsunuz, dolayısıyla aralığın aynı olması için iki olay arasında *sizin ölçtüğünüz* zaman sıfır olamaz. Hatta siz benim iki ölçümüm arasındaki zamanın 0,31 mikrosaniye (0,31µsn) olduğunu düşünüyorsunuz! Kısacası siz iki olayın aynı anda olduğunu düşünmüyorsunuz. Düzgün görelî hareket içerisindeki iki gözlemci hangi olayların eşanlı olduğu konusunda anlaşamadıkları için eşzamanlılık kavramının güvenilirliği kaybolmuş oldu. Başka bir ifadeyle Newton'ın mutlak uzay ve zaman anlayışı sona erdi.

Ortak anlayışımızdaki ikinci değişiklik uzay ve zamanın iç içe geçmesidir. Öncelikle aralık ifadesinde biraz temizlik yapalım. Hammurabi'nin doğu-batı ve kuzey-güney ölçümlerini aynı birimlerle ölçüme çevirerek Mezopotamya'nın betimlenişinin basitleşmesine yardımcı olması gibi, biz de uzay ve zaman ölçümlerini aynı birimlere çevirerek uzay ve zaman betimlememizi sadeleştirebiliriz. İstedikimiz şekilde değiştirebiliriz ama gelin, zaman ölçümlerini ışığın o sürede ilerlediği uzaklık olan "ışığın ilerlediği metre" cinsinden, *c* ile çarparak yapalım. Bu şekilde 1 sn 300.000 km olarak rapor edilecektir, çünkü ışık 1 sn'de bu kadar uzağa gidebilir ve "1 m zaman" da geleneksel birimlerle 3×10^{-11} sn'ye (30 pikosaniye, bir saniyenin 30 trilyonda biri) eşittir. Saniyeleri sayan kolunuzdaki saate baktığınızda, her tıklamayı yeni bir 300.000 km'yi gösterir şekilde düşünün. Tüm bu konuşma temizlik içindi, böylece aralık tanımı şu hale geldi:

$$\text{Aralık}^2 = \text{zaman}^2 - \text{uzaklık}^2$$

Hammurabi de aynısını yapmış, *uzaklık* tanımını, $(C \times \text{kenar}_1)^2 + \text{kenar}_2^2$ iken yerölçümcülerinin kenar_1 'i metre cinsinden rapor etmelerini isteyerek $\text{kenar}_1^2 + \text{kenar}_2^2$ şeklinde basitleştirmişti.

Şimdi çok önemli bir noktaya geldik. Pythagoras'ın uzaklık teoremindeki uzaklık formülünün iki boyutlu uzayın geometrisini özetlemesi ama üç ve daha çok boyuta genişletilebilmesi gibi, Einstein'ın *aralık* formülü de zamanın üç uzay boyutuna dik bir dördüncü boyut olarak görülmesi gerektiğini güçlü biçimde önermektedir. Bu düşüncenin kökeninde Herman Minkowski'nin (1864–1909) 1907'de işaret ettiği şu nokta yatar:

Bundan böyle tek başına uzay ve tek başına zaman gölgelere dönüşerek yok olmaya mahkûmdur ve bu ikisi ancak bir tür birleşmeyle bağımsız bir gerçeklik edinebilir.

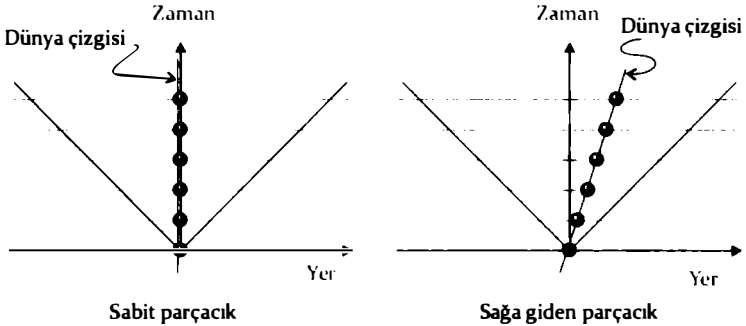
Uzay ve zamanın birleşmesine bugün *uzayzaman* denmektedir.

Dört boyutlu uzayzamanı dört boyutlu uzayla karıştırmamamız gerekir, çünkü geometrileri çok farklıdır: 4-uzayda *uzaklık* $t^2 + x^2 + y^2 + z^2$ ile bulunurken, 4-uzayzamanda onun benzeşimi olan *aralık* $t^2 - (x^2 + y^2 + z^2)$ ya da $t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ ile bulunur. Bu açıdan 4-uzay ile 4-uzayzamanın farklı *metrik imzalarına* sahip olduğunu söyleriz; 4-uzayın metrik imzası (*uzaklık* ifadesindeki işaret örüntüsü) (+, +, +, +) iken, uzayzamandaki *aralığın* metrik imzası (+, -, -, -)'dir. Zamanın ruhu ya da en azından tanımı hakkında bir fikriniz oluşmaya başlamıştır sanırım: Metrik imzadaki farklı işarete, -'nin yerine +'nın gelmesine karşılık gelen koordinattır. Uzayzamanın metrik imzasının (+, +, -, -) olduğu bir dünya iki zaman boyutuna sahip olurdu, dolayısıyla “bugün” iki tarihle belirtilirdi. Daha yüksek boyutlu uzayzamanları düşünmemiz gerekseydi, örneğin metrik imzası (+, -, -, -, -) olan beş boyutlu bir uzayzamanı, ilk koordinatın zaman olduğunu hemen saptayabilirdik; 8. Bölümde daha yüksek boyutlu uzayzamanlarla karşılaştık ve eklenen boyutlardan birinin uzay mı zaman mı olduğuna karar verme temelimiz işte budur. Bu bölüm boyunca uzayzaman dediğimizde metrik imzası (+, -, -, -) olan dört boyutlu uzayzamanı kastediyor olacağız.

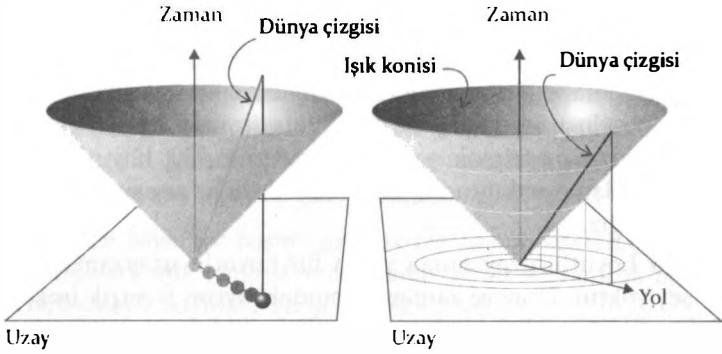
Minkowski geometrisi denen uzayzaman geometrisinin anlaşılmasının tek başına uzay geometrisinden daha zor olduğunu itiraf etmek durumundayım. Fakat şimdi aktaracaklarımın onun bazı özellikleri ve tek başına uzaydan farkları hakkında size bir

fikir vereceğini umuyorum. Aktarılabacaklarda esas önemli olan malzeme değil, o yüzden kafanız biraz karışırsa kaygılanmayın: Devam edin. Bu tür bir şey üzerine düşünme konusunda özgüven kazanmanız için öncekiyle aynı donanımı kullanacağım: Dört boyutlu uzay hakkında bir fikir edinmek için boyutların sayısını sırayla artırmak nasıl işe yaradıysa, dört boyutlu uzay-zamanı anlamaya doğru ilerlemek için de daha az sayıda boyutla başlayacağız.

Sıfır boyutlu uzayzaman ya da bir boyutlu uzayzaman diye bir şey yoktur. Uzay ve zaman arasındaki ayrım (metrik imzayla ifade edildiği şekliyle) yalnızca elimizde iki boyutlu uzayzaman (2-uzayzaman), yani bir uzay boyutu ile bir zaman boyutu varsa anlamlıdır. Üstelik 2-uzayzaman bir eksen uzayı, diğeri zamanı veren şekilde düz bir çizimle gösterilebilir (Şekil 9.5). Çizimdeki çizgiler parçacığın dünyadan geçerken izlediği çeşitli yolları göstermektedir ve bunlara Minkowski'nin taktığı isimle *dünya çizgileri* denmektedir. Dikey bir dünya çizgisi sabit bir parçacı-



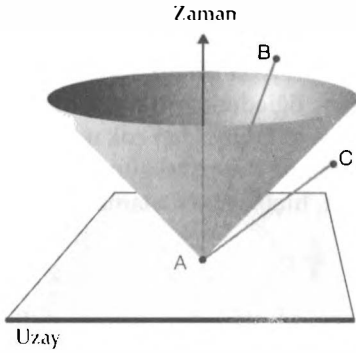
Şekil 9.5 Bir parçacığın dünya çizgisi, zamanın arttığı koşullarda onun konumunun izidir. Soldaki çizim sabit bir parçacığı göstermektedir. Zaman arttıkça aynı yerde kalır, dolayısıyla dünya çizgisi dikeydir. Sağdaki çizim aynı parçacığı düzgün hızla sağa doğru hareket ederken göstermektedir, dolayısıyla zaman arttıkça yeri daha da sağa kayar. Bu nedenle dünya çizgisi sağa eğimlidir. Her iki çizimdeki 45°'lik çizgiler 1 m'lik ışık ilerleme zamanında 1 m ilerleyebilen ışığın dünya çizgisidir. Hiçbir şey ışıktan hızlı ilerleyemez, dolayısıyla hiçbir şey bu açıdan daha eğimli bir dünya çizgisine sahip olamaz.



Şekil 9.6 İki boyutlu uzayda parçacığın bir düzlemin üzerinde hareket etmesi serbestken, dünya çizgisi soldaki çizimde gösterilen koninin içerisinde bir yerde bulunur. Koni ışık konisidir, bir ışık atımının dünya çizgileri de başlangıç noktasından başlar. Hiçbir dünya çizgisi koninin dışında yer almaz, çünkü bu ışıktan daha hızlı bir harekete karşılık gelirdi.

ğın geçmişidir: Parçacık zaman artarken uzayda aynı noktada kalır. Hafifçe sağa yatmış bir dünya çizgisi ağır ağır sağa hareket eden bir parçacığa karşılık gelir, çünkü zaman arttıkça parçacığın bulunduğu yer sağa doğru kayar. 45° açılıya sahip bir dünya çizgisi sağa doğru ışık hızıyla hareket eden, 1 m'lik ışık ilerleme zamanında (alıştığımız birimlerle söylersek bir saniyenin 30 trilyonda birinde) 1 m mesafe kateden bir parçacığa karşılık gelir. Bu çizgi bir parçacığın olabilecek en hızlı hareketini temsil etmektedir, çünkü hiçbir şey ışıktan daha hızlı hareket edemez ve yalnızca kütesiz parçacıklar (örneğin fotonlar) bu hıza ulaşabilir. Mümkün olan bütün dünya çizgileri sola 45° açı yapan çizgi (ışık hızında sola doğru hareket eden bir parçacık) ile sağa 45° açı yapan çizgi (ışık hızında sağa doğru hareket eden bir parçacık) arasında yer alırlar.

Şimdi iki uzay boyutu ve bir zaman boyutu olan 3-uzayzamanı geçiyoruz (Şekil 9.6), zaman arttıkça parçacığın iki uzamsal boyutta (düzlemde herhangi bir yere) hareket etmesi serbesttir. Hiçbir parçacık ışık hızından daha hızlı hareket edemediği için, olası dünya çizgilerinin hepsi yarı açısı 45° olan koninin içerisinde-



Şekil 9.7 Işık konisi, olayları nedensel açıdan bağlantılı olanlar ve olmayanlar olarak ayırır. Bir olay A'da gerçekleşirse ışık konisi içerisindeki olayları, örneğin B'yi etkileyebilir; fakat ışık konisinin dışında yer alan olayları, örneğin C'yi etkileyemez, çünkü sinyal A'dan C'ye gidemez.

de yer alır. Bu koniye tepe noktadayken olayın *ışık konisi* denir, çünkü ışık hızında hareket eden ışığın dünya çizgileri bu konilerin yüzeylerinde yer alır. Bir noktadan başlayan çembersel bir ışık atımı hayal edebiliriz: Zamanla beraber, düzlemdeki halkalarla gösterilen ve ışık konisi üzerindeki farklı zamanlarla resmedilen şekilde yayılmaktadır.

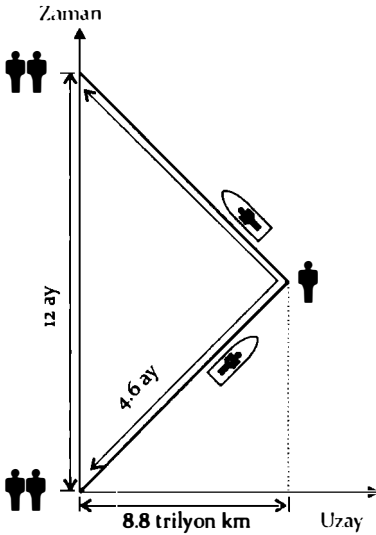
4-uzayzamana döndüğümüzde olaydan başlayan bir koninin herhangi bir anda koniden alınan dilimlerin (küre şeklinde ışıma atımlarını temsil eder şekilde) üç boyutlu küreler olduğu, dört boyutlu bir versiyonunu düşünmeliyiz. Bu beni de aştığı için, bunu kâğıt üzerinde gösterebiliyor gibi bir havaya girmeyecğim. Şansımıza sadece Şekil 9.6'daki iki uzamsal boyuttaki atımlar için verilen ışık konisi çizimini anlasak da yeterli oluyor.

Bir ışık konisi, olayları iki kategoriye ayırır. Örneğin A'da ve B'de gerçekleşen olayları düşünelim (Şekil 9.7). B, A merkezli ışık konisinin içerisinde yer aldığı için A'dan gelen sinyaller B olayını etkilemeye yetecek kadar bol bir zaman içerisinde B'ye ulaşabilir. Şimdi de A ve C olaylarını düşünelim. A'daki olay C'deki olayı etkileyemez, çünkü C noktası A merkezli ışık konisinin dışında yer almaktadır, dolayısıyla A'dan gelen hiçbir sinyal herhangi bir etki yaratmaya yetecek sürede C'ye ulaşamaz. Bu durumda A ile B'nin (ve ışık konisinin içerisinde ve üzerinde yer alan bütün noktaların) *nedensel olarak bağlantılı* olduğunu, ama A ile C'nin (ve ışık konisinin dışında yer alan bütün olayların) olmadığını söyleriz. Nedenselliğin bilimin can damarı olduğuna dikkat çekmiştik, bu

yüzden ışık konisinin uzayzamanı nedensel olarak bağlantılı olan ve olmayan olay bölgelerine ayırması evren kavrayışımız açısından inanılmaz bir önem taşır. Örneğin A'da gerçekleşen olayın, isterseniz bu Dünya'nın geçen Pazar öğleden sonra yok olması olsun, Colayı üzerinde, bu da diyelim ki Dünya'dan çok uzaktaki bir yıldızın yörüngesindeki bir gezegende Pazartesi günü kozmik tarih hakkında verilen bir ders olsun, hiçbir etkisi olamaz.

Bu son aktarılanlar mantığımıza çok da aykırı gelmeyebilir, çünkü çizdiğimiz çizgiler ve koniler olağan uzayın özelliklerini andırmaktadır. Şimdi Öklit uzayı ile Minkowski uzayzamanı arasındaki esas farka geldik ve bu sezgisel olarak anlaşılması en zor özelliktir. Uzayda doğru, iki nokta arasındaki en kısa mesafedir. Uzayzamanda ve onun garip Minkowski geometrisinde bir doğrunun iki olay arasındaki *en uzun* aralığa karşılık geldiği fikrine alışmak durumundayız. Şimdi aktaracağımız Castor ve Pollux hakkındaki öykü bu noktayı açıklamamıza yardımcı olacak.

Castor'un evde kaldığını varsayalım. Onun dünya çizgisi dikey ve yirminci doğum gününden yirmi birinci doğumgününe gerilerek uzanıyor. Pollux yirminci doğum gününü kardeşiyle birlikte kutluyor ve hemen ardından Castor'ın 12 ay sürdüğünü düşündüğü bir yolculuğa çıkıyor, yıldızlar arası uzayda uzak bir noktaya 1.000.000.000 km/h hızla gidiyor ve geliyor, Castor'ın yirmi birinci doğum gününe yetişiyor. Castor'a göre Pollux 8,8 trilyon kilometre seyahat ediyor. Castor kardeşinin olmadığı zamanı kardeşinin yolculuğunun başlangıcı ile bitişi arasındaki aralığın 3,30 trilyon kilometre olduğunu hesaplamak için kullanıyor. Aralık bir değişmez olduğu için de Pollux hemfikir oluyor. Fakat uzay gemisinden dışarı hiç adım atmadığı ve panjurlarını kapalı tuttuğu için Pollux herhangi bir yere gitmemiş olduğunu düşünüyor, dolayısıyla bütün aralığı zamanın geçişine atfediyor, uzayda yer değiştirmeye değil. Geleneksel birimlerle hesaplandığında 3,30 trilyon kilometrelik bir ışık yolculuğu zamanı 4,6 aya karşılık geliyor (Şekil 9.8). Bu durumda Pollux'ın Castor'ın doğum günlerine işaret eden olaylar arasında yaptığı yolculuğu gösteren dünya çizgisi, yolculuğunu betimleyen çizgi bizim Öklitçi

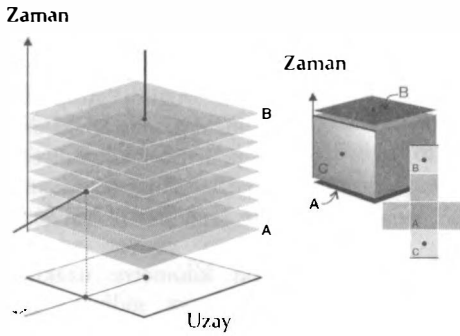


Şekil 9.8 Castor bir yıl boyunca evde kalıyor: Bir yıl yaşlanıyor ama hiçbir yere seyahat etmiyor. Doğum günü dediği iki olay arasındaki aralık 3,30 trilyon kilometredir (bir yıl). Pollux ışık hızının yüzde 93'ü kadar bir hızla yolculuğa çıkıyor ve 8,8 trilyon kilometre uzaktaki bir noktaya gidiyor, geri dönüyor ve Castor'ın bir sonraki doğum gününe yetişiyor. Pollux herhangi bir yere gittiğini düşünmüyor, ama ayrılışı ile varışı arasındaki aralığın 3,30 trilyon kilometre olduğu konusunda Castor'la aynı fikirde. Fakat bunu zamanın geçmesine yoruyor ve bu zamanın da 4,6 ay olduğunu düşünüyor.

gözlerimize daha uzun gözükse bile, iki doğum günü arasındaki (Castor'ın dünya çizgisine karşılık gelen) düz çizgiden *daha kısa* bir aralığa karşılık geliyor. Varılan bu sonuç, olaylar arasındaki düz çizgilerin (doğruların) dolaylı yollardan daha uzun (aslında en uzun) aralıklara karşılık geldiği şeklindeki ifademizi doğruluyor. Bu genel olarak doğrudur. Bir uzayzaman diyagramına baktığınızda Eukleides gibi düşünme hatasına düşmeyin.

Dikkat edilmesi gereken ikinci nokta Pollux'ın Castor'dan daha az yaşlanmış olmasıdır. Castor bir yıl yaşlanmışken, metabolizması deneyimlediği zaman geçişiyle uyumlu akan Pollux yalnızca 4,6 ay yaşlanmıştı¹¹. Dolayısıyla yaşlanmadan kaçınmak için hızlı seyahat etmemiz gerekir.

¹¹ Anlatılan durumla ilgili genel olarak verilen adla "ikizler paradoksu", Pollux'ın Castor'dan farklı bir geçmişi olduğunu görme becerisine sahip olmayan insanlardan kaynaklanmaktadır. Hız kaybetmenin ve ardından Pollux eve dönmek üzere geri dönerken yaşanan hız kazanmanın Pollux üzerindeki etkisini göz ardı ederek tartışmayı basitleştirdim. Bu etkiler hesaba katıldığında da, varılan sonuç aynıdır.



Şekil 9.9 Bir karınca dikdörtgen bir kâğıt parçasının üzerinde salına salına yürür ve ortasında durur. 3-küpün alt yüzü (A) ilk başta boştur, çünkü karınca kâğıt parçasının üzerinde değildir; ama kâğıdı daha sonra kontrol ettiğimizde karıncayı orada buluruz ve varlığını ona karşılık gelen düzlem olan 3-küpün üst yüzünde (B) bir noktayla işaretleriz. Bir ara karınca kâğıdın sol tarafındaki kenarından geçmiş olsa gerektir ve 3-küpün buna karşılık gelen yüzünde (C) görünen bu konumu da bir noktayla işaretleriz.

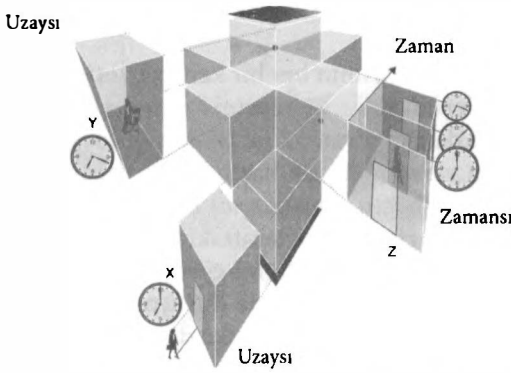
Uzayzamani uzaydan ayıran başka bir özellik de hacmin taşıdığı önemdir. Belli bir aşamada dört boyut şeklinde düşünmekten kaçınamayacak hale geleceğiz ama daha az sayıda boyutla düşünüp ardından benzetme yoluyla ilerleyerek bu adıma ulaşabiliriz. Şimdi de iki uzay boyutu ve bir zaman boyutu olmak üzere üç boyutlu uzayzamanda küp şeklinde bir kutuyu düşünelim. Üç boyutlu uzaydaki normal bir küp şeklinde kutu gibi, bu kutu da altı kare yüze sahiptir (Şekil 9.9). Çizimde A olarak işaretlenmiş yüz tamamen uzayın iki boyutunda yer alır ve verili bir zamandaki bildiğimiz bir uzamsal düzleme karşılık gelir: Bunu belirli bir andaki düz bir kâğıt parçası olarak düşünün. B olarak işaretlenmiş yüz daha sonraki bir zamandaki aynı düzlemdir: Bunu 5 dakika sonra aynı yerde duran aynı kâğıt parçası olarak düşünün. C olarak işaretlenmiş yüz sabit, hareketsiz bir kâğıt parçasının bir kenarı üzerindeki (A yüzünün bir kenarı) bütün noktaların dikey dünya çizgilerinden oluşmuştur; benzer şekilde diğer dikey yüzlerin her biri, kâğıt parçasının diğer üç kenarının

her birinin üzerindeki noktaların dikey dünya çizgilerinden oluşmaktadır.

Dört dikey yüz, kâğıt parçasının her bir kenarı üzerinde 5 dakika içerisinde gerçekleşen olayların hepsini özetlemektedir. Örneğin bir karıncanın 2 dakika sonra sol taraftan kâğıdın üzerinde ilerlemeye başladığını varsayalım. İlk başta kâğıt parçası boştu, dolayısıyla A düzlemi de boştu. Karınca sol taraftan ilerlemeye başlıyor ve dünya çizgisini çiziyor. Sol taraftaki kenardan geçiyor, bu yüzden orada bir noktanın belirlediğini görüyoruz. Ardından (varsayalım ki) karınca kâğıdın ortasında duruyor ve orada kalıyor. Dünya çizgisi artık dikeydir ve 3 dakika daha sonra B yüzü üzerinde bir nokta belirir. A düzlemi (nokta yok) ile B düzlemi (bir nokta) arasındaki farkın dikey düzlemlerden birinin üzerindeki (bu örnekte C üzerindeki) bir noktayla eşleştiğine dikkat edin. Bir parçacık hiçlikten öylece var olamadığına göre iki yatay “uzaysı” düzlem, A ile B arasındaki değişimin, dikey “zamansı” düzlemlerden birinin (bu karınca örneğinde C) üzerindeki bir olayla eşleşmesi zorunludur.

Şimdi entelektüel emniyet kemerlerimizi takarak dört boyutlu uzayzamana havalanalım. Yolculukta rahat etmeniz için müessesemizin hediyesi battaniyenizi de verelim: Dört boyutun üç boyutla tamamen benzer olduğu, sadece uzamsal düzlemlerin (kâğıt parçalarının) yerini uzamsal hacimlerin (odaların) aldığı gerçeğini unutmayın. Kâğıdın üzerinde yürüyen karıncaların yerini burada odaların içine giren insanlar alıyor.

Daha önce gördüğümüz gibi bir 4-küpün duvarları sekiz 3-küpten oluşmaktadır (Şekil 9.4’ü hatırlayın). Uzayzamanda bu 3-küplerin ikisi, bunlara X ve Y diyelim, tamamen uzamsaldır ve ilgilenilen başlangıç ve bitiş zamanlarındaki üç boyutlu uzay bölgelerine (gerçek odalara) karşılık gelir (aktaracağım olaylar Şekil 9.10’da biraz daha ayrıntılı olarak verilmektedir) ve durum bu açıdan üç boyutlu uzayzamandaki A ve B düzlemlerinin iki farklı zamandaki gerçek kâğıt parçalarına karşılık gelmesine benzemektedir. Bu gündelik yaşamımızdan alışkın olduğumuz küplere “uzaysı” diyoruz. Diğer altı 3-küpün önemi nedir? Hepsi iki uzamsal boyut ve bir zaman boyutundan oluşan yanlara sahiptir, dolayısıyla tıpkı C yanının kâğıt parçasının kenarında



Şekil 9.10 Bir 4-küp, tıpkı bir 3-küpün karıncanın iki boyutlu bir kâğıt parçası üzerinde bulunmasının geçmişini göstermesi gibi, üç boyutlu bir bölgenin (bir odanın) kullanım geçmişini gösterir. 3-küp X, akşam saat 7:00'da başlangıçta boş olan odadır. Yirmi dakika sonra eğer 3-küp Y'ye karşılık gelen odayı kontrol edersek dolu olduğunu fark ederiz ve içerideki kişinin kafasının konumunu bir noktayla işaretleriz. Aradaki sürede kapıyı gözlersek, zamansız küp Z'yi oluşturan görüntü dizisi sayesinde orada ne olduğunu gösterebiliriz. Saat 7:10'da bir anlığına oda sahibi odaya girerken düzlemin üzerinde belirir, biz de onun kafasının konumunu ilgili küp içerisinde bir noktayla işaretleriz. Hiperküp, odanın başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki tarihinin kayıdır.

olanları özetlemiş olduğu gibi, bunlar da gerçek kutunun iki boyutlu her bir yüzünde gerçekleşen şeylerin tarihini özetlemektedir. Bu küplere "zamansız" diyoruz. Taşıdıkları önemi görmek için, uzaysız küpümüzün sizin şu anda bulunduğumuz odayı temsil ettiğini varsayalım. Siz odaya girmeden önce oda boştu, dolayısıyla uzaysız küp X boştur. Odaya girerken duvardaki bir kapıdan geçtiniz, dolayısıyla giriş noktanızı ve zamanınızı belirten bir nokta karşılık gelen zamansız küpte, örneğin Z küpünde belirdi (nokta sizin burnunuzun konumuna işaret ediyor olabilir). Belli bir süre sonra, siz hâlâ içerideyken odayı kontrol edersek sizin konumunuzun uzaysız küp Y'nin içinde bir noktayla işaretlenmiş olduğunu görürüz. 3-uzayzamanda olduğu gibi, X ile Y küpleri arasındaki herhangi bir farklılığın diğer altı küpten birinin içindeki bir noktayla eşmesi zorunludur: Bu

noktanın nerede olacağı sizin odaya nereden ve ne zaman girdiğinize bağlıdır.

Şimdi konuyu toparlamak ve sizi bundan sonra aktarılabacaklara hazırlamak için biraz daha genel düşünmeye zorlamam gerekiyor. Konuşmayı bir uzay bölgesindeki enerji ya da kütle konusuna getirebilirsek resmi tamamlayacağız. X küpü içindeki toplam enerji (ya da $E = mc^2$ bağıntısından gidersek kütle) bir uzay bölgesindeki ilk baştaki toplam enerji olacaktır, Y küpü içindeki toplam enerjiyse o bölgedeki bir süre geçtikten sonraki enerji olacaktır. Zamansız küpler içindeki toplam enerji duvarlarından geçerek bölgenin içine giren ya da dışına çıkan enerji akışını gösterecektir ve net enerji girişi, uzaysız küpler içerisindeki X'teki ile Y'deki enerji miktarı farkını açıklamak zorundadır.

Sanırım uzayzaman hiperküpleri konusunda bu kadarı şimdilik yeter. Şansınız yaver gitmişse uzayzamanın yapısını ve içerisindeki noktaların ve hacimlerin önemini yavaş yavaş anlamaya başlamışsınızdır. Beraber sıradaki adımı atmadan önce sizlere özel göreliliğin bir yönünü daha sunmalıyım. Bu önemli adım, fiziğin en ünlü ifadesi olan $E = mc^2$ ya da *enerji = kütle $\times$ c^2* nin nereden geldiğini gözler önüne serecek ve bu bölüm ve önceki bölümlerde aniden beliriveren, entelektüel, ekonomik, ticari, askeri ve siyasal bir önem taşıyan bu ifadenin de uzayzamanın geometrisinin bir başka yönü olduğunu gösterecek. Zamanın uzunluk olarak ifade edildiği birimlerle biliyorsunuz $c = 1$ 'dir, çünkü ışık 1 m'lik ışık ilerleme zamanında 1 m ilerler; bu durumda Einstein'ın denklemi daha az bilinen ama çok daha basit ve açıklayıcı bir biçim alır: *enerji = kütle*. Diğer bir deyişle enerji ile kütle arasında bir ayrım yoktur.

Biraz matematik kullanmaktan kaçınmam mümkün değil, ama emin olun uzun sürmeyecek. Ulaşılan sonuç nefes kesici, o yüzden takip edebileceğinizi umuyorum (ya da atlarsınız, zira önemli olan varılan sonuç). Aralık, zaman ve uzaklık arasındaki bağıntıyı biliyoruz:

$$\text{Aralık}^2 = \text{zaman}^2 - \text{uzaklık}^2$$

Bu bağıntıyı her iki tarafı *aralık*² 'ye bölerek sadeleştirebiliriz:

$$1 = (zaman^2 / aralık^2) - (uzaklık^2 / aralık^2)$$

Ardından her iki tarafı *kütle*² ile çarpıyoruz, buradaki *kütle* aklımıza gelen herhangi bir parçacığın kütlesi olabilir (bir uranyum atomu, bir kurbağa, Jüpiter). Bu adımların sonucunda şuna ulaştık:

$$Kütle^2 = (kütle \times zaman / aralık)^2 - (kütle \times uzaklık / aralık)^2$$

Uzaklık/aralık hız için kullanılan normal ifadeyi andırdığı ve kütle çarpı hız doğrusal momentumun tanımı olduğu için (3. Bölüm), sağdaki ikinci terimin momentumun karesinin görelilikçi ifadesi olduğundan şüphelenebiliriz. Ayrıntıya girmeyeceğim ama bu şüphe, iki parçacığın çarpışmasını düşünüp *kütle × uzaklık/aralık* toplam değerinin çarpışma sonrası değişmediğini bulduğumuzda doğrulanmaktadır. Fiziğin en önemli ilkelerinden biri 3. Bölümde gördüğümüz üzere “doğrusal momentumun korunması”, iki cisim arasındaki çarpışmada ne kadar karmaşık bir olay gerçekleşirse gerçekleşsin toplam momentumun değişmediği söyleyen ilkedir, dolayısıyla doğrulama geçerlidir.

Peki ya sağdaki ilk terim nedir? İki parçacık arasındaki çarpışmayla ilgili denklemleri kullandığımızda *kütle × zaman/aralık* niceliğinin de çarpışmada çok sayıda karmaşık tekil olay gerçekleşse bile değişmeden kaldığını buluruz. Fizikteki bir başka harika ilke de, 3. Bölümde uzun uzadıya gördüğümüz gibi *enerjinin* korunmasıdır. Bu gözlem *kütle × zaman/aralık* ifadesini enerji olarak tanımlamamızı güçlü bir biçimde desteklemektedir. Dolayısıyla son denklem şöyle yazılabilir:

$$Kütle^2 = enerji^2 - momentum^2$$

Kütle × zaman/aralık ifadesinin enerji şeklinde tanımlanması bunun da momentum gibi çarpışma sonrasında korunuyor olmasının gösterilmesiyle doğrulanabilir. Bu ifadenin *aralık* ifadesini andıran bir sonucu da tıpkı uzay ve zamanın uzayzamanda bir-

leşmiş olarak düşünülmesinin gerekmesi gibi, doğrusal momentum ve enerjinin de pek kullanılmayan biraz biçimsiz bir isimle *momentumenerji* şeklinde bir kombinasyonun iki ayrı yüzü olarak düşünülmesi gerekir. *Aralık* nasıl zaman ve uzaklıktan hesaplanıyorsa, bu ifadeye göre enerji ve momentumdan hesaplanan *kütle* bir değişmezdir, ne kadar hızlı hareket ederlerse etsinler gözlemcilerin hepsi için aynı olduğu bulunan bir özelliktir.¹²

Artık sonuca varabiliriz. Parçacığın bizim eylemsiz çerçevemizde sabit olduğunu varsayalım; elimizdeki bir demir topağı olabilir. Parçacık sabit olduğu için momentumu sıfırdır; $kütle^2 = enerji^2 - momentum^2$ bu durumda $kütle^2 = enerji^2$ halini alır ve hemen çıkarımını yapmak istediğimiz $kütle = enerji$ sonucuna ulaşabiliriz. Bu son derece önemli ifadenin, bize terimleri tanımlama olanağı sunan iki korunum yasası ile uzayzamanın geometrisinin birleştirilmesinin doğrudan bir sonucu olduğunu fark etmiş olmalısınız.¹³

Uzayzamanın geometrisini soruşturmakla başlayan çalışmamız bizi kütle ve enerjinin denk olduğu sonucuna ulaştırdı. Bir bölgeden enerji kaybolursa o bölgenin kütlelerinin azalacağı sonucuna varmak durumundayız. Enerji bir bölgenin içine akarsa da bölgenin kütlesi artar. Pratikte kütle farkı normal cisimlerde tamamen göz ardı edilebilir niceliktedir. Örneğin 10 kg bir top güllésinin oda sıcaklığı ile 1000 K (727 °C) arasındaki kütle farkı sadece 50 pikogramdır (bir gramın 50 milyon-milyonda biri) ve bu (şu anki teknolojimizle) tamamen saptanamaz düzeydedir.¹⁴ Atom çekirdeğini oluşturan atomaltı parçacıklar, proton ve nötronların yeniden düzenlenmesine eşlik eden enerji değişimi, bu top güllerinin ısıtılmasıyla elde edilenden çok daha büyüktür.

12 Özel göreliliğin eski sunumlarında kütle hızla birlikte artan bir nicelik olarak sunulur. Bu eski moda bir yaklaşımdır ve kütle bugün bir değişmez olarak değerlendirilmektedir.

13 6. Bölümde bu korunum yasalarının da uzayzamanın simetrisinin görünümüleri olduğunu, dolayısıyla nükleer gücün (ve termonükleer savaşın) aslında geometrinin gücünün bir ifadesi olduğunu görmüştük. Joseph Conrad anarşistlerin geometrik soyutlamaya karşı bir taarruz cylemi olarak bir gözlemevini bombaladıkları *The secret agent* [Gizli Ajan] romanında bunu hissederek.

14 Yine de demir atomlarının sayısıyla ifade edildiğinde bu topa 540 milyar demir atomunun eklenmesine eşdeğerdir.

Nükleer fisyon (bölünme) bir atomun çekirdeğinin iki küçük çekirdeğe bölündüğü süreçtir; bu sayede çekirdek içerisindeki protonlar ve nötronlar enerjik olarak daha çok tercih edilen düzenlemelere yerleşir ve bu nedenle fazla enerjilerini bırakırlar. 10 kg uranyum-235 fisyon geçirdiğinde, serbest kalan enerji 10 gr kadar bir kütle kaybına karşılık gelir. Bu 30 bin ton kömür yakmayla serbest bırakılan enerjiye denktir. Geometri şaşılacak derecede kudretlidir.

Bölümde buraya kadar çoğunlukla temel sabitlerden birinin, ışık hızının kaldırılması ve bunun sonucunda ifadelerin basitleşmesi üzerinden ilerledik. Şimdi başka bir temel sabitin elenmesiyle devam edeceğiz ve bunu yaparken daha derin bir doğa kavrayışına ulaşacağız (bu süreci 3. Bölümde ısının mekanik eşdeğerini eleyip karşılığında daha derin bir termodinamik kavrayış elde ettiğimizde yaşamıştık). Kimbilir belki de temel sabitlerin hepsini eleyebilirsek, doğayı mükemmel şekilde anlayabileceğiz! Bu bölümün en önemli yerine, Büyük Fikre doğru bu şekilde ilerleyeceğiz. Özel görelilikten *genel görelilik* diye adlandırılan daha genel bir kurama, Einstein'ın kütleçekim kuramı ya da kısaca "Einstein'ın kuramı" dediğimiz kurama ulaşmak Einstein'ın on yılını aldı.

Kütleçekimi boş uzayda etkileyen bir kuvvet olarak gören Newton'ın kütleçekim kuramı *kütleçekim sabiti*, G denen bir evrensel temel sabitle karakterize olur.¹⁵ Newton'a göre bir cisim tarafından uygulanan kütleçekim kuvveti, G ile cismin kütlesinin çarpımına orantılıdır. Bu orantısallık şu anlama gelir: Merkezlerinden belirli bir uzaklıkta (ve onların dışında) olduğunda, 336 bin Dünya kütlesine sahip olan Güneş'in kütleçekim kuvveti Dünya'nın kütleçekim kuvvetinden 336 bin kat daha büyüktür.

Önce biraz temizlik yapalım. Şu andan itibaren G 'yi cismin içerisinde ele alacağız ve bu sayede kütleyi bir uzunluk olarak ifade edeceğiz.¹⁶ Uzunluk olarak ifade edildiğinde Dünya'nın kütlesi 4,41 mm, ondan 336 bin kat büyük olan Güneş'inki ise 1,48 km'dir. Şimdi kütle, uzunluk ve zamanı, artık hepsini uzun-

¹⁵ G 'nin şu anda kabul edilen değeri $6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ dir.

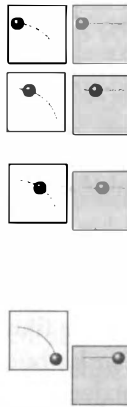
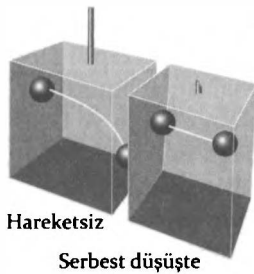
¹⁶ Daha net konuşursak m 'nin yerine Gm / c^2 koyuyoruz.

luk birimleriyle ifade ettiğimizi fark etmişsinizdir; c'ye bölerek hepsini zaman cinsinden de ifade edebilirdik, ama bu durumda elde edilen sayılar daha hantal olur ve taşıdıkları doğrudan önem azalırdı.¹⁷ Newton'ın kütleçekim tanımındaki gizemli sabit G 'yi de ortadan kaldırdığımızı fark etmiş olmalısınız; bunun varlığı, kütleçekimin bir şekilde yapay bir kavram olduğu ve G 'nin fizikte derin bir temel önem taşıdığı için değil de, atalarımızın kütleyi ifade etmek için doğal bir birim olan uzunluk (metre gibi) yerine acayip bir birim olan (kilogram gibi) bir birimi kabul ettikleri için karşımızı çıkıttığı izlenimini veriyordu. Bu bağlamda yapacağım en derin dikkat çekme ve fikri açarken sizin de aklınızda tutmanız gereken nokta şu ki, bütün nicelikleri uzunluk terimleriyle ifade etmeyoluyla bizlerasında kütlenin uzayzaman üzerindeki etkisinin geometrinin bir dalı halini aldığı bir betimlemeye doğru ilerliyoruz. Eukleides düşüncelerinin ulaştığı bu erimi bilseydi kesinlikle büyülenirdi.

İşimize dönelim. Genel görelilik Einstein'ın farkına vardığı müthiş bir tesadüften doğdu. Müthiş tesadüfler gündelik yaşamda olduğu gibi bilimde de şüphe uyandırır. Gündelik yaşamda genellikle bir hileye, bilimdeyse genellikle bir keşfe işaret ederler. Bahsettiğimiz tesadüf 3. Bölümde “eylemsiz kütle” dediğimiz, bir cismin bir kuvvete direncini ifade etmek için kullanılan kütlenin onun “kütleçekim kütlesiyle”, yani cismin kütleçekim çekmesi yaratma becerisini ifade etmek için kullanılan kütleyle aynı olmasıdır. Bu eşdeğerlik deneysel olarak yaklaşık bir trilyonda bir kesinliğinde doğrulanmıştır ve bu sonuç eylemsiz kütle ile kütleçekim kütlesinin tam olarak aynı olduklarını güçlü şekilde göstermektedir. Bunun size çok acayip gelmesi gerekir. Bir top güllesinin benim tekmeme direncinin gülleinin yarattığı kütleçekim alanının etkinliğine tıpatıp eşit olması için görünür hiçbir neden yoktur.

Einstein bu tesadüfün üzerinden ilerleyerek başka bir tesadüf daha tespit eder. Sizin ve benim aynı asansörde hareket ettiğimi-

¹⁷ Bu tartışmada kara delikleri ele almayacağız. Ele alsaydık m kütleli bir kara deliğin etrafındaki, kaçmanın mümkün olmadığı sınır olan olay ufğunun yarıçapının $2m$ (uzunluk birimleriyle) olduğunu bulurduk. Dünya'nın kütlesine sahip bir kara deliğin ufku kendi merkezinden ancak 8,8 mm uzakta yer alır.



Şekil 9.11 Hareketsiz bir asansörde (solda) yatay olarak atılan bir topun izlediği yol, yere doğru eğimlenen bir paraboldür. Topun kütleçekim kütesinden uzak boş uzayda izlediği yol düzdür (ortada). Serbest düşüşteki bir asansörde de yol düzdür (ortada). Sağdaki görüntü dizisi ne olduğunu göstermektedir. Beyaz kutular hareketsiz asansörde topun izlediği yolu abartılı bir biçimde göstermektedir. Gri kutular asansörün dikey konumunu artan bir hızla değiştirmiş ve konum değişikliğini topun düşmesini karşılayışını göstermektedir.

zi, o esnada bir şeylerin ters gittiğini varsayalım. Önce binanın 100. katında asansör bozularak duruyor. Kurtarılanlara dek zaman geçirmek için birbirimize bir topu atıyoruz. Gözlemci kişiler olarak topun eğrisel bir yol izlediğini fark ediyoruz (Şekil 9.11). Asansör kabinimiz derin uzayda, herhangi bir gezegen ya da yıldızın kütleçekim çekmesinin dışında olsaydı, topun izlediği yol düz olurdu. Bunu aklımızda tutarak topun izlediği yolun bükülmesini kütleçekime atfediyoruz. Bilim insanları olduğumuz için hızlı bir hesaplama yaparak topun izlediği yolun bir parabol, kenarlarından birine paralel bir düzlemde bir koni keserek elde edilen bir kesit şeklinde olduğunu da buluyoruz.¹⁸

Sonra bir felaket gerçekleşiyor. İşinin ehli olmayan sözde kurtarıcılarımız bütün güvenlik önlemlerini devredışı bıraktıkları bir anda asansör kabinini tutan kabloyu kazara kesiyor. Aşağıya

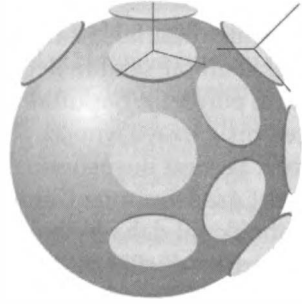
¹⁸ Parabolleri tam olarak anlamak için Apollonius'un kitabı *Conics*'e [Konikler] başvurabiliriz, çünkü Yunanlar sadece topların izlediği yolların betimlenmesiyle değil, uzayzamanın şekliyle de ilgili oldukları bulunmadan çok önce bunların özelliklerini çıkarmışlardı. Konik kesitler parabol, hiperboller ve elipsler şeklinde sınıflandırılmaktadır; bkz. Şekil 10.4.

doğru serbest düşüşe geçiyoruz. Bilim insanları olduğumuz için içerisinde bulunduğumuz talihsiz durumun sağladığı fırsatı soğukkanlı bir şekilde değerlendirerek topu birbirimize atmaya devam ediyoruz. Şaşkınlık içerisinde topun aramızda sanki kütleçekimsiz uzaydaymışız gibi düz bir biçimde ilerlediğini görüyoruz. Serbest düşüşümüz kütleçekim etkilerini ortadan kaldırmıştır! Asansörümüz Güneş'in yüzeyinde olsaydı, topun izlediği parabolik yol daha keskin bir eğri halini alırdı, ama asansör kabini serbest düşüşe başladığında da daha hızlı ilerler ve bu hareket de parabolü törpüleyerek yine düz bir doğru haline getirirdi. Buradan çıkan ders, nerede olursak olalım, serbest düşüşte olan bir platforma çıkarak kütleçekim etkisini silebileceğimizdir. Eskiden yaşamış olan herkes serbest düşüşteki asansörlere sonsuza dek hapsedilmiş durumda olsaydı, yapay kütleçekim kavramı hiç keşfedilmemiş olurdu.

Einstein bu çarpıcı gözlemi yaparak ilerledi. İlk olarak aslında serbest düşüşteki asansör kabinlerinde bulunan gözlemcilerin aynı fizik ders kitaplarını yazacağını öne sürdü. *Denklik ilkesinin* içeriği temelde budur. Kabinlerde dolaşarak ölçümler yapıp sonuçlarını birbirleriyle paylaşan gözlemciler de bu sırada onun özel görelilik kuramınca öngörülen aynı uzay ve zaman büzülmesini deneyimleyeceklerdi. Bu önermeyi geometrik terimlerle ifade edebiliriz: Uzayzamanın geometrisi bütün serbest düşüşteki asansör kabinlerinde aynıdır (ve Minkowski tipidir). Dolayısıyla daha önce özel görelilik bağlamında ele aldığımız her şey bu tür serbest düşüşteki kabinlerde geçerlidir.

Einstein'ın en büyük başarısı bizim düşen kabinimizdeki geometrinin farklı bir ivmeyle düşebilecek olan başka bir kabindeki geometriyle ilişkisini düşünmesiydi. Örneğin sizin gökdeleniniz bir asteroidin üzerinde inşa edilmiş ve düşüşünüz çok çok yavaş hızlanıyor olabilir. Benimkisiyse Dünya'dadır ve yaklaşık olarak 10 m sn^{-2} hızla ivmelenmektedir (böylece 1 sn sonra 10 m sn^{-1} , 2 sn sonra 20 m sn^{-1} düşmektedir vb). Kabinlerimizin hepsinde uzayzaman geometrisi "düz"dür (Minkowski tipidir), ama benim düz geometri parçam sizinkine oranla bükülmüş ve dönmüştür. Bunu bir topu madeni paralarla kaplamaya çalışmaya benzetebiliriz (Şekil 9.12): Her küçük bölge düzdür ama bir bölge diğerine

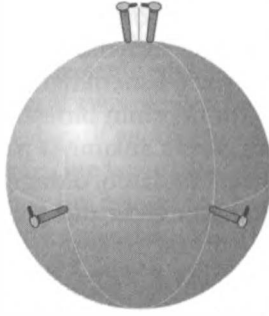
Şekil 9.12 Uzaydaki herhangi bir noktanın yerel geometrisi Öklitçidir (kürelerin farklı noktalarına bağlı düz çemberlerle gösterilmektedir). Fakat bir yıldız ya da gezegen gibi ağır bir cismin yakınlarında uzay bükülür ve yerel bir Öklitçi bölge başka bir yerel Öklitçi bölgeden uzağa doğru dönerek bükülmüş hale gelir. Einstein'ın genel görelilik kuramı farklı yerel koordinat sistemlerinin birbirleriyle nasıl ilişkilendiğini gösterir.



belli bir açıdadır. Einstein'ın çözmeye çalıştığı ve yıllar süren bir sıkı düşünme sürecinin ardından da çözdüğü soru, yakınlarında bir kütle birikimi, örneğin bir yıldız olduğunda düz uzayzaman bölgelerinin birbiriyle ilişkisinin nasıl olacağıydı. Eğer benim Dünya'yı temel alan uzayzamanımı sizin astroidinizin bakış açısından betimleyebilirsem, bu durumda bilim insanlarının kütleçekim dedikleri etkiyi net tarzda betimliyor olurum.

Bu bölümde daha önce uzayzamanın üstesinden gelmiştik, şimdi bu deneyimi bir aşama daha ileriye taşıyıp uzayzaman-bükmeye gelerek *eğrisel (bükülmüş) uzayzamanı* halledeceğiz. O kadar korkacak bir durum yok, çünkü Minkowski geometrisini aklımızın bir köşesinde tutmakla yetinerek yarattığı sorunları göz ardı edeceğiz. Aslına bakılırsa birçok insan genel göreliliğin *niteliksel* fikirlerini özel göreliliğinkilere göre çok daha basit bulur, çünkü insanlar eğrisel uzayzaman üzerine (düşünmesi kolay değildir) düşünemezken, eğrisel uzayı (düşünmesi kolaydır) kafalarında canlandırabilirler. Bu bir aldanmadır elbette, çünkü genel görelilik tamamen eğrisel uzayzaman hakkındadır, ama kabul edilebilir bir aldanmadır da, çünkü kavramları ulaşılabilir kılar, bu yüzden biz de böyle yapacağız.

İlk olarak bu nedenle kavramlar görece anlaşılır olduğu için biz de eğrisel uzaya yoğunlaşalım. Daha önceki gibi yine kafamızda canlandırmamız gereken boyutların sayısını önce azaltıp sonra aşama aşama artırmak kavramsal olarak kolaylık



Şekil 9.13 Siz Ekvatordan başlayıp diren-
gen bir tarzda dosdoğru Greenwich
meridyeninden (0° boylamdan) yu-
kariya yürüyorsunuz. Ben de aynısını
 90° boylamdaki bir noktadan baş-
layarak yapıyorum. Kuzey Kutbuna
ulaştığımızda kafa kafaya geliyoruz.
Bu iki boylam çizgisi bu nedenle
paralel değildir: Bu geometride pa-
ralel doğrular yoktur. Bu çizim aynı
zamanda tekdüze pozitif bükülmeye

sahip iki boyutlu bir yüzeyi, kafamızda üç boyutlu bir kürenin yüzeyi
olarak nasıl canlandırdığımızı göstermektedir. Buna iki boyutlu yüzey
üç boyutlu uzaya “gömülmüş” diyoruz.

sağlar. Fakat iki boyutlu bir eğrisel yüzeyi düşünmek için bile
yüzeyi “içeri” bükülü olarak düşünmek için üçüncü bir boyuta
ihtiyaç duyduğumuz görülüyor, dolayısıyla dört boyutlu eğrisel
uzayzamanı düşünmek için beş boyutta düşünmemiz gerekiyor!
Sizden bunu yapmanızı istemeyeceğim, çünkü bu beni de
(tanıdığım herkesi de) aşar ama eğrisel uzayzamanı tam olarak
görselleştirmek istiyorsanız yapmaya çalışmanız gereken bu ola-
caktır. Eğrisel bir uzayı bir üst boyutta düşünmek için kullanı-
lan teknik isimlendirme, onu bir üst boyuttaki bir uzayın içine
“gömmek”tir. Eğrisel dört boyutlu uzayzamanı düşünmek için
onu beş boyutlu bir uzayın içine gömmemiz gerekir.

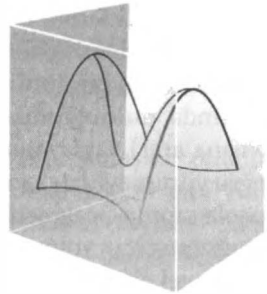
Şimdilik iki boyutlu eğrisel uzayda (uzayzamanda değil) ka-
lalım. Bunu eğrisel olarak düşünmek için bir yüzeyi, 2-uzayı bir
hacmin, 3-uzayın içerisine gömülmüş olarak düşünüyoruz. Ge-
lin, 2-uzayı bir 3-kürenin (bildiğimiz küre, ideal bir Dünya gibi)
yüzeyi olarak alalım. Benim Ekvator üzerinde 0° boylamda dur-
duğumu (bu beni Afrika kıyılarının batı tarafındaki açıklarında
ıslak ve nahoş bir duruma sokar), sizin de Ekvator üzerinde 90°
boylamda durduğunuzu (bu da sizi Ekvador Cumhuriyetinin
kıyısına atar) varsayalım. Birisi ıslık çalıyor ve ikimizde kuzeye
doğru yürümeye başlıyoruz ve yolculuğumuz boyunca ne sağa ne
de sola sapmayacak netlikte adımlar atıyoruz. Kuramsal fizikçiler
olduğumuz için yolumuza çıkan çöller, okyanuslar, buzullar bize
fazla engel oluşturmuyor. Sonunda Kuzey Kutbuna vardığımızda

kafa kafaya geliyoruz (Şekil 9.13). Buradan dış görünüm itibarıyla paralel olan çizgilerin bu geometrinin bir uzayında *birleştiği* sonucuna varmak durumundayız. Yeterince esnetildiğinde dış görünüm itibarıyla paralel olan çizgilerin hepsinin birleştiği bir uzayın ya da aynı anlama gelmek üzere gerçek anlamıyla paralel çizgilerin olmadığı bir uzayın *pozitif bükülme* sahibi olduğu söylenmektedir. Bu uzay daha önce bahsettiğim Öklit-dışı geometrilere birine örnektir.

Öklit-dışı geometrilerin varlığının bir anlamı da bu geometrinin bir deneysel bilim olması, (10. Bölümde göreceğimiz üzere Immanuel Kant'ın düşündüğü gibi) sadece içgözlemle doğruluğu gösterilebilecek bir şey olmamasıdır. Aristoteles'in harika bir biçimde gösterdiği gibi, tek başına içgözlem hiçbir zaman gerçeğe yol göstermez; deneyle ittifak kurmuş içgözlem ise elbette (bu kitabın konusu da budur), Galilo'nun harika bir biçimde gösterdiği gibi olağanüstü güvenilir bir rehberdir. Ya Eukleides ve takipçilerinin rahat koltuklarından düşündüğü gibi uzayın geometrisinin Öklit tipi olduğunu ya da Öklit-dışı olduğunu düşüneceğiz. Karar vermek için deneye başvurmalı ve örneğin paralel yollarda yeterince uzun yürürsek kafa kafaya gelip gelmeyeceğimize bakmalıyız. Tarihin en büyük matematikçilerinden biri olan Carl Friedrich Gauss (1777–1855) Öklit geometrisine rakiplerin çıkabileceğini sezmişti:

*Bu nedenle zaman zaman Öklit geometrisinin doğru olmaya-
bileceği arzumu şaka yollu dile getirdim.*

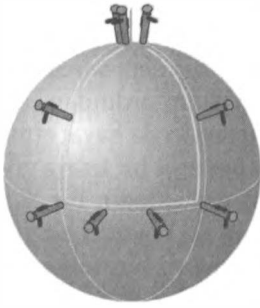
Şekil 9.14 Negatif bükülmeye sahip iki boyutlu bir yüzey, üç boyutlu bir uzaya gömülmüş eyer şeklinde bir yüzeye benzer.



Ne yazık ki kısa bir yaşam sürmüş Alman matematikçi Bernhard Riemann'ın (1826–1866) 1854 yılında üniversitede kalıcı kadro elde etme niyetiyle verdiği olağanüstü bir ders sayesinde kavramsal tikanıklığın büyük oranda aşılmasının ardından, insanlar negatif geometriye sahip Öklit-dışı uzayları da hayal etme özgürlüğüne kavuştular. Şekil 9.14 bize üç boyutlu bir uzaya gömülmüş bir negatif iki boyutlu yüzeyi göstermektedir. Bir atın eyerinde otururken negatif bükülmeye sahip iki boyutlu bir yüzeyi destek olarak kullanırsınız. Bu uzayda belirli bir noktadan geçen sonsuz sayıda paralel çizgi vardır.

Sırtımızdaki düşünsel kamburu atıp Öklit-dışı geometrinin farklı türleri olduğunu kabul ettiğimizde, uzayın geometrisinin bölgeden bölgeye değişebileceğini hayal etmeye başlayabiliriz. Uzayın farklı bölgeleri farklı bükülmelere sahip olabilir. Örneğin bir kürenin ortadan sıkılmasıyla elde edilen dambıla benzer bir uzay düşünelim. Bu uzay kutuplarının yakınında pozitif bükülmeye, orta tarafındaysa eyere benzer bir negatif bükülmeye sahip olacaktır. Yüzeye parmak basarak alanda çiçek hastalığı misali küçük kraterler oluşturarak bükülmenin yer yer değiştiği daha karmaşık uzaylar da hayal edebiliriz. Yer yer değişen bükülmelere sahip çeşitli gündelik eşyalar da düşünebilirsiniz (örneğin siz de böyle bir cisimsiniz).

Daha yüksek boyutlu uzaylara gömülü uzayları düşündüğümüzde, aslında gerçek dünyayı inceleyebilen ve bir bakışta bükülü olup olmadığını söyleyebilen ulvi bir üst varlığın bakış açısını benimsiyoruz. Karınca olduğumuzu ve düş gücümüzün içerisinde bulunduğumuz uzayla sınırlı olduğunu hayal edelim: Bir karınca Dünya'nın bükülmüş olup olmadığını tespit edebilir miydi; peki *biz* uzayzamanımızın bükülmüş olup olmadığını tespit edebilir miyiz? Aslında yanıt tartışma içerisinde işaret edildi, sizinle beraber çıktığımız ve ya kafa kafaya geldiğimiz ya da asla karşılaşmadığımız yolculuklar, bizim gömülü olup olmadığını düşünmemizden bağımsız bir yüzey üzerinde gerçekleşiyor gibi düşünülebilir. Bu sayede görünüş itibarıyla paralel yollarda ilerlemeye koyulup kafa kafaya gelmişsek, içerisinde bulunduğumuz uzayın pozitif bir bükülmeye sahip olduğunu biliriz. Varılan bu sonuç, bizim uzayı daha yüksek



Şekil 9.15 Bir yüzeyin bükülmesi daha yüksek boyutta bir uzaya gömülmüş olarak düşünülmeden ölçülebilir. Bunun bir yolu, ilgilenilen noktanın etrafında bir halka çizilmesi ve yönelinen çizginin açı değişiminin ölçülmesidir. Örneğin burada gösterildiği gibi Kuzey Kutbunda kolumuz güneye işaret eder şekilde durursak ve siz önce Ekvator'a doğru 90° Batı meridyeninden aşağı, ardından Ekvator üzerinde Greenwich meridyenine

dek, sonra tekrar yukarı Kuzey Kutbuna doğru kolunuz hep güneyi gösterir şekilde yürürseniz, vardığınızda kolunuzun benimkine 90° açıyla işaret ettiğini buluruz. Bu gözlemden yüzeyin bükülmesinin (yarıçap kürenin yarıçapı olmak üzere) $1 / \text{yarıçap}^2$ olduğu çıkarımını yapabiliriz.

boyutlu bir uzay içerisinde gömülmüş olarak *hayal edip edemeyişimizden* bağımsızdır.

Bu fikirden ilerleyerek uzayın bükülmesinin nicelik olarak ölçülmesine ulaşabiliriz. Beraber Kuzey Kutbuna gidelim (Şekil 9.15). Kuzey Kutbundayız, ikimiz de birer kolumuzu güneye doğru 0° boylamından aşağı Greenwich yönünde kaldıralım. Birisi ısıklık çalıyor ve Ekvator'a ulaşana dek güney yönünde yürüyorsunuz. Yine kolunuz güneyi işaret ederek Ekvator üzerinde 90° Doğu boylamına ulaşana dek yürüyorsunuz. O noktada, yine kolunuz güneyi gösterir şekilde Kuzey Kutbuna doğru geri dönüyorsunuz. Bir süre sonra ben ufukta sizin geldiğinizi görüyorum. Fakat ikimiz de şaşırıyoruz, çünkü bütün yolculuk boyunca titizlikle hep güneyi işaret eder şekilde tutmuş olmanıza rağmen kolunuzla benim kolum arasında şimdi 90° fark var! Düz bir uzayda kollarımız aynı yöne bakardı, dolayısıyla Dünya'nın yüzeyinin aslında düz olmadığı sonucuna varıyoruz. Dahası "bükülme"nin niceliksel ölçümünü de sizin kolunuzun açı değişiminin yolculuğunuzun kapsadığı alana bölünmesiyle hesaplayabiliriz; bu da Dünya'nın yarıçapına *yarıçap* dersek $1 / \text{yarıçap}^2$ olur.¹⁹ Dünya'nın yarıçapı 6400 km olduğuna göre

¹⁹ Kolunuzun açısındaki değişim $\pi / 2$ radyan, r yarıçapındaki kürenin sekizde birinin alanı $1/8 \times (4\pi r^2)$ ya da $\pi r^2 / 2$ olduğuna göre bükülme: $(\pi / 2) / (\pi r^2 / 2) = 1 / r^2$.

yüzeyinin bükülmesi $2,4 \times 10^{-8} \text{ km}^{-2}$ dir. Bu çok hafif bir bükülmedir ve etkinin fark edilebilmesi için çok geniş bir alanın etrafında yolculuk etmemiz gerektiğini gösterir. Hammurabi'nin yerölçümcüleri de bu yüzden fark etmemişlerdir: Mezopotamya'da ölçtükleri tarlalar en fazla birkaç bin metre kareydi, Dünya'nın bükülmesinin yansımaması çok doğaldı. Yaklaşık 10 cm^2 'lik bir yarıçapa sahip futbol topunun bükülmesi $0,01 \text{ m}^{-2}$ dir, dolayısıyla bükülmesi yüzeyinde küçük alanları kapsayan bölgelerde fark edilebilir. Bir kürede yolculuğa nereden başlarsak başlayalım ve yolculuk ne kadar alanı kapsarsa kapsasın bükülme aynıdır. Aynı zamanda bükülme her yerde pozitiftir. Tavuk yumurtasında da yuvarlak ucunda yaklaşık $0,2 \text{ cm}^{-2}$ erimden başlayıp sivri ucunda yaklaşık $0,4 \text{ cm}^{-2}$ erime ulaşsa da, bükülme her yerde pozitiftir.

Bükülmeyi fark etmek için ille de gerçek, maddi Dünya'nın, futbol topunun ya da yumurtanın yüzeyinde yolculuk yapmamız gerekmez. Ben hareketsiz dursaydım, siz kapalı bir döngü şeklinde boş uzayda yolculuk etseydiniz ve yolculuğunuzun sonunda kollarımızı aynı yöne işaret eder halde bulsaydık, uzayın o bölgesinin düz ve Öklit tipi olduğu sonucuna varabilirdik. Kollarımız arasında bir açı olduğunu bulsaydık, o zamanda uzayın o bölgesinin bükülmüş ve bu yüzden Öklit-dışı olduğu sonucuna varırdık. Bu durumda kollarımızın görelî yönü, uzayın o bölgesinin bükülmesinin işaretini ve büyüklüğünü gösterirdi. Genel olarak farklı uzay bölgelerinde yapılan yolculuklar farklı sonuçlar verebilir. Aynı nokta etrafında döngüye benzer yolculukların farklı yönelmelerinin farklı sonuçlar doğurduğunu bile bulabiliriz. Uzayın her bir bölgesinde hangi tür geometrinin geçerli olduğunu belirlemek için bu tür deneyler yapılabilir.

Eğrisel uzayın özelliklerini tam olarak anlamak için bir kavrama daha ihtiyacımız var. *Jeodezik* uzayda sağa ya da sola sapmayan bir yoldur. Düz uzayda jeodezik, düz bir çizgidir. Öklit geometrisinin çoğu, düz uzaydaki jeodeziklerden (doğrulardan) oluşmuş şekillerin (üçgenler, dörtgenler gibi) özellikleri hakkındadır. Her türlü uzayda iki nokta arasındaki en kısa mesafe, bu iki noktayı birleştiren jeodezik boyunca izlenen yoldur. Bir kürenin yüzeyi üzerinde jeodezik, büyük çemberin üzerinde yer alır. Örneğin bir boylam çizgisi üzerinde (Greenwich meridyeni gibi)

yolculuk edersek, aynı boylama sahip iki yer arasındaki jeodeziği izliyoruz demektir. İki nokta farklı enlem ve boylamlarda yer alıyorsa (Londra ve New York gibi) aralarındaki en kısa mesafe, üzerlerinden geçen büyük çemberin kısa yayı üzerinden gidiştir. Genel olarak ticari uçaklar varacakları yerlere ulaşırken jeodezikleri izlemektedir.

Şimdi eğrisel (bükülmüş) uzaydan eğrisel (bükülmüş) uzay-zamana geçebiliriz. Geçiş zannettiğiniz kadar travmatik etkiler yaratmayacak, çünkü gereksinim duyacağımız kavramların çoğunu eğrisel uzay tartışmamızdan ödünç alacağız. Eğrisel uzay-zamanı kafamızda canlandırabilmek için aynı iki boyutlu uzayı canlandırırken yaptığımız gibi, üç boyutlu uzaya gömülmüş bir boyutu uzay, diğeri zaman olmak üzere iki boyutlu bir yüzey düşünelim. Uzayzaman eğer düzse jeodezikler yüzeydeki düz çizgilerdir. Fakat uzayzamanın eğlenceli geometrisi, iki noktayı birleştiren jeodeziğin bu iki nokta arasındaki en uzun aralığa karşılık geldiğini söyler (Castor ve Pollux'u hatırlayın). Eğrisel iki boyutlu uzayzaman, üç boyutta buruşuk bir tabaka olarak gösterilebilir. Aynı düz uzayzamanda olduğu gibi, burada da (yüzeydeki yerel bükülmesine bağlı olarak şimdi bükülmünebilen) jeodezikler birleştirdikleri noktalar arasındaki en uzun aralıklara karşılık gelir.

Tüm tartışmanın düğüm noktasına geldik. Daha önceki bütün kavramları bir araya getireceğimiz noktaya ulaştık. Einstein'ın 1915'te ileri sürdüğü Büyük Fikir *kütlenin uzayzamanı bükmesi*ydi. Olağanüstü başarısı da uzayzamanın bükülmesi ile kütle dağılımı arasındaki bağıntıyı çok net bir şekilde bulmasıydı. Aradaki bağıntıyı muhtemelen size tam olarak anlatamayacağım, tüm bilim tarihinde görülen en şık ve ama en karmaşık bağıntılardan biridir. Fakat bu noktaya gelmeniz için sizi bu kadar çalıştırdıktan sonra da sizi yüzüstü bırakmam doğru olmaz. Bu yüzden iki şey yapacağım. Önce Einstein'ın ulaştığı sonucun biçimi hakkında bir fikir vereceğim. Ardından doğurduğu sonuçlardan bazılarına dikkat çekeceğim.

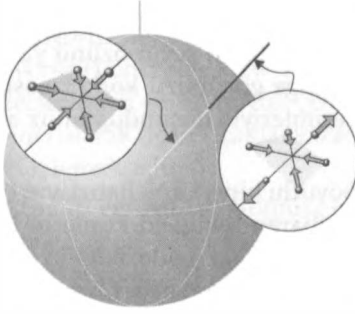
Bu noktada sizden sanki kenarları lastikten bir küp bulup da üzerine oturmuşsunuz ve kenarları dışarı doğru pörtlemiş gibi, hafif bükülmüş bir küp hayal etmenizi isteyeceğim. Düşünmeniz

gerekecek bir diğer özellik de küpün sadece uzayda değil, uzay-zamanda olduğu. Dürüst olmak gerekirse bildiğimiz bir uzamsal küpü düşünmek aslında söylemek istediğim şeyin özünü yakalamak için yeterli, bu yüzden bu imge gözünüzü korkutmasın. Yine de uzay değil, uzayzaman terimleriyle düşündüğümüz aklınızda bulunsun.

Daha önce ele aldığımız dört boyutlu hiperküpu hatırlayın (ve Şekil 9.4'e bir bakın). Şu andan itibaren şekildeki küplerin kenarlarını ilgilenilen uzayzaman bölgesindeki jeodezikler üzerinde bulunuyor gibi düşünmeliyiz. Bu bizim, kenarları hiperküpu oluşturmak için birleştiklerinde birbirlerine uyacak şekilde hafif bükülmüş ve eğilmiş olarak düşünmemiz gerektiği anlamına geliyor. Parçaları birbirine dikkatle yapıştırılmış hiperküpümüzü etrafındaki kütle tarafından yerine oturtulmuş olarak düşünün. Küplerin önemi aynen sürmektedir; zamansı küpler (gerçek kutunun bir yüzünden içeri giriş çıkışların geçmişini temsil edenler) kutumsu bölgenin farklı yüzlerinden içeri giren çıkan kütle-yi temsil etmekte ve tamamen uzaysı iki küp (ilgilenilen zaman aralığının başlangıcı ve sonundaki kutu) kutunun içinde ilk baştaki ve en sondaki toplam kütle-yi temsil etmektedir. Einstein'ın "alan denklemi" işte tam da bu hiperküpu oluşturan sekiz küpün yüzlerinin bükülme ve eğilmelerinin her birinin içerisindeki toplam kütle-yi orantılı olduğunu söylemektedir.²⁰ Bu genel göreliliğin özü ve özetidir (dört boyutlu uzayzamanda bir öz ve özet olduğunu da belirtelim).

Einstein'ın alan denkleminin yazımı (sembollerle ifade olanakları yeterince zenginse) kolay, ama çözümü olağanüstü zordur. Buna rağmen duyuruluşundan birkaç ay sonra bir çözüm bulunmuştur. I. Dünya Savaşı'nın nadir olumlu getirilerinden biri oldu ve Alman matematikçi Karl Schwarzschild (1873-1916) Rusya'da askerlik yaparken küresel bir kütle bölgesinin dışındaki uzay bölgesi için (bir yıldız ya da gezegenin etrafındaki boş uzay

20 Kendinizi aldatılmış hissetmemeniz için Einstein'ın alan denklemini iletelim. Her bir 3-küpün yüzlerinin dönme momentlerinin toplamı = $8\pi \times (3\text{-küp içerisindeki momentum enerjisi})$ "Dönme momenti" kabaca söylersek, 3-küplerden birinin bir yüzünün bükülmesi ile yüzün merkezden uzaklığının çarpımıdır.

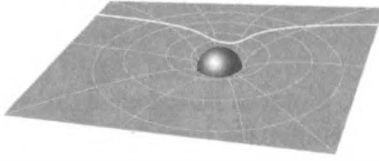


Şekil 9.16 Kütteleçekim kuvvetinin gelgit etkisi bir sekizyüzlüde belirlenmiş altı deneme kütlesi üzerindeki kuvvetler düşünülerek saptanabilir. Dünya'nın (ya da başka bir kütleli cismin) merkezinden uzaklaşan yönde yer alan iki kütle birbirinden uzağa itilir, ama hafif gri boyalı düzlemdeki dört kütle birbirine çekilir. Bu dış Schwarzschild çözümünün ayırıcı

özelliklerinden biridir. Geometrisi iç Schwarzschild çözümüyle belirlenen Dünya'nın içinde altı kütle altısı da birbirine çekilir.

gibi) bir çözüm ve düzgün kütleli bir kürenin içi için bir çözüm buldu. Birkaç ay sonra nadir görülen bir deri hastalığıyla terhis edilip eve dönerek öldü ama *Schwarzschild* çözümü ve *Schwarzschild yarıçapı* terimleri ona ölümsüzlük bahşetti. Bir başka çözüm 1934 yılında yönbağımsız, türdeş, düzgün genişleyen bütün evren modellerinin uzayzamanları için H. P. Robertson ve A. G. Walker tarafından bulundu.

Şimdi düzgün bir Dünya'nın merkezinden dışarıdaki uzaya taşındığımızı hayal edelim ve uzayzamanın şeklini düşünelim. Bunun için uzayda bir sekizyüzlünün köşelerinde altı noktanın ayarlandığı bir düzenleme düşüneceğiz (Şekil 9.16). Dünya'nın içinde uzayzaman bükülmesi altı noktanın boş uzaya göre daha yakında durmaları anlamında tamamen "kasılabilir" özelliktedir. Sanki uzayzamanın kendisi Dünya'nın içerisine sıkıştırılarak bastırılmış gibidir. Bu durum, düzgün kütleli bir küresel bölge için Einstein denkleminin iç nün bir tezahürüdür. Serbest düşüşteki çizgileri Dünya'nın içine daha yakın yerde bulunuyor olarak, dört boyutlu uzayzamanı da iki boyutlu zaman ve uzay düzlemlerinin hepsinde aynı değerde (küre gibi) bir pozitif bükülme olarak düşünebiliriz. Düzlemlerin her birindeki bükülme düzgün yoğunluktaki bölge içerisinde sabittir ve bükülmeyi bir yere kadar üzerine ağır bir top koyulan bir lastik çarşaftakine benzetmek mümkündür (Şekil 9.17).



Şekil 9.17 Kütleli bir cisim uzayın biçimini lastik bir çarşafın üzerindeki ağır bir topun etkisine benzer şekilde bozar. Parçacıklar jeodezikler boyunca ilerler (bunlardan biri kalın beyaz çizgiyle gösterilmiştir). Jeodezikler eğrisel uzayza-

man içerisinde kıvrılarak ilerledikleri için, bunları izleyerek yapılan istikrarlı bir hareket gözlemciye ağır cismin çekim etkisine kapılarak izlenen bir yol gibi gözükür. Zaman boyutunu da gösterebiliyor olsaydık, cisim ağır kütle bölgesine yaklaşırken ve sonra uzaklaşırken bizim hızlanma ve yavaşlama diye yorumlayacağımız gözlemlerde de bulunurduk.

Altı nokta dizilişi Dünya'nın yüzeyinden geçip dışarı püskürerek dışarıdaki boş uzaya girdiğinde iç Schwarzschild çözümü yerini dış Schwarzschild çözümüne bırakır. Artık uzayzamanın geometrisi, yüzeye dik iki noktanın çevreledikleri hacim sabit kalmak üzere yüzeye paralel bir düzlemdeki dört noktanın ortak hareketinden iki kat daha hızla uzaklaşması anlamında "gelgitli"dir. Uzay üzerindeki etkiyi onu bir yönde (şekli çarpılan kütleye işaret eden yönde) germe ve iki dik yönde sıkıştırma şeklinde düşünebiliriz. Bu kesinlikle göz ardı edilemez: Dünya'nın gelgit etkisi bükülmesi gayet zor olan Ay'ın küreselliğini yaklaşık 1 km kadar bozan bir kuvvettedir. Okyanuslarımızda yaşanan gelgitler Ay'ın uzayzaman geometrisi üzerindeki etkisinin Dünya yüzeyinde kendisini göstermesidir ve günde iki kabarma olması Dünya-Ay yönündeki geometrideki şişkinliğin göstergesidir. Dolayısıyla deniz kıyısında durup dalgaların kabarmaya ve çekilmesini izlerken aslında Schwarzschild geometrisinin gölgesinin Dünya yüzeyinden geçişini izliyorsunuz. Kral Knud geometriyi koya hapsedemiyor.²¹

Bükülmeye sayılar verebiliriz. Işınsal bükülme (bir tarafı ışın-sal yönde, diğeri zaman ekseninde olan bir düzlemin bükülmesi)

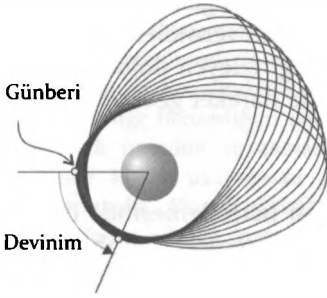
21 995-1035 yılları arasında yaşamış Danimarka, Norveç ve İngiltere Kralı Büyük Knud'a atfedilen "Knud ve dalgalar" hikâyesine göre kral kendisini pohpohlayan maiyetine elementler üzerinde kontrolü olmadığını (bu örnekte gelgitle yükselen dalgalar) göstererek dünyevi güçlerin Tanrının üstün gücüyle karşılaştırıldığında anlamsız olduğunu söyler --çn.

$-2 \times \text{k\ddot{u}tle} / \text{yarı\c{c}ap}^3$ tür; buradaki *yarı\c{c}ap* ilgilenilen noktanın k\ddot{u}tlenin k\ddot{u}resel yoğunlaşma merkezinden (yıldız ya da gezegenden, Şekil 9.17) uzaklığıdır. Bu b\ddot{u}k\ddot{u}lmenin de, lastik \c{c}arşafıta topun durduğu y\ddot{o}renin dışındaki b\ddot{o}lgede olduğu gibi negatif (eyer şeklinde) olduğuna dikkat edelim. Bir tarafı ışınsal y\ddot{o}ne dik, bir tarafı zaman y\ddot{o}n\ddot{u}nde olan iki d\ddot{u}zlemden her biri *k\ddot{u}tle / yarı\c{c}ap³* değerinde bir b\ddot{u}k\ddot{u}lmeye sahiptir. Bu b\ddot{u}k\ddot{u}lme pozitifdir, dolayısıyla bu iki boyutlu y\ddot{u}zeylerin her birini bir k\ddot{u}renin y\ddot{u}zeyine benzer şekilde d\ddot{u}ř\ddot{u}nebiliriz. Bu b\ddot{u}k\ddot{u}lmeler bir 3-k\ddot{u}p\ddot{u}n hacmini muhafaza ederler, \c{c}\ddot{u}nk\ddot{u} bir y\ddot{o}ndeki gerilme iki dik y\ddot{o}ndeki daha k\ddot{u}\c{c}\ddot{u}k sıkışmaları karşılar ve g\ddot{o}t\ddot{u}r\ddot{u}r. Dahası D\ddot{u}nya'nın merkezinden uzaklaştı\c{c}a b\ddot{u}k\ddot{u}lme azalır ve D\ddot{u}nya'dan b\ddot{u}y\ddot{u}k uzaklıklarda uzayzaman d\ddot{u}zd\ddot{u}r.

Schwarzschild geometrisinin bir \ddot{o}zelliği de saatlerin k\ddot{u}tleli bir cismin yakınında daha yavaş işlemesidir. K\ddot{u}tleli cisimden uzaktaki bir saate oranla yavaşlama *k\ddot{u}tle / uzaklık* şeklinde hesaplanır; buradaki *uzaklık* k\ddot{u}tleli cismin merkezinden uzaklıktır. D\ddot{u}nya'nın k\ddot{u}tlesinin bir u\c{c}akta taşınan saat \ddot{u}zerindeki etkisini d\ddot{u}ř\ddot{u}nyorsak, bunun deniz seviyesindeki bir saate oranla daha hızlı \c{c}alıştığını (\c{c}\ddot{u}nk\ddot{u} u\c{c}ak D\ddot{u}nya'nın merkezinden biraz daha uzakta ve biraz daha az b\ddot{u}k\ddot{u}lmeye sahip bir uzayzaman b\ddot{o}lgesindedir) ama u\c{c}ak hareket halinde olduğu i\c{c}in de zamanın daha yavaş aktığını g\ddot{o}z \ddot{o}n\ddot{u}ne almak zorundayız. D\ddot{u}nya k\ddot{u}\c{c}\ddot{u}kt\ddot{u}r (k\ddot{u}tlesi sadece 4,4 mm'dir), dolayısıyla ticari bir u\c{c}ağın hareketi \ddot{u}zerine olan etkisi k\ddot{u}\c{c}\ddot{u}kt\ddot{u}r. Buna rağmen d\ddot{u}nyanın etrafında 10.000 m ve 850 km/h ile yapılan bir yolculukta k\ddot{u}tle\c{c}ekim etkisi saati 0,2 mikrosaniye hızlandırırken hızın etkisi sadece yaklaşık 0,05 mikrosaniye yavaşlatır. Bu bi\c{c}imde yapılan genel g\ddot{o}relilik testleri iniş-kalkış etkilerinin yanı sıra u\c{c}ağın u\c{c}uç esnasındaki hız değişimlerini de hesaba katar.

Uzayzamanda jeodeziklere ni\c{c}in bu kadar \c{c}ok yer ayırdık? Boş uzayda par\c{c}acıklar d\ddot{u}z \c{c}izgiler şeklinde ilerler. Başka bir deyişle d\ddot{u}z uzayzamanın jeodeziği boyunca yolculuk ederler.²² Bu g\ddot{o}zlem yolların belirlenmesinde geometrinin taşıdığı \ddot{o}nemi

22 Ni\c{c}in b\ddot{oyle yaparlar? 7. B\ddot{o}l\ddot{u}mde g\ddot{o}rd\ddot{u}đ\ddot{u}m\ddot{u}z \ddot{u}zere dalga fonksiyonları diğer t\ddot{u}m yollarda g\ddot{o}t\ddot{u}r\ddot{u}lerek ortadan kalkar.



Şekil 9.18 Einstein'ın kuramına göre bir gezegenin yolu (özellikle de Merkür gibi yıldıza yakın bir gezegenin) kusursuz bir elips şeklinde değildir, daha çok rozet gibidir. Yıldızın en çok yaklaştığı nokta dönerek değişir. Bu harekete günberi noktasının *devinimi* denir. Klasik mekanik (Newton mekaniği) de devinimi tahmin eder ama bu yüzyıl başına 43 yay saniyelik (yıldada bir derecenin 0,12 binde biri) gözlemlenen değerin yalnızca yarısıdır. Genel görelilik doğru değeri öngörür. İkili yıldız sistemlerinin yörüngelerindeki devinimler (enberi noktasının ilerlemesi) çok daha büyüktür, yıldada birkaç dereceyi bulur ve ölçülmesi daha kolaydır.

gösterir. Uzayzamanın şekli kütlenin varlığıyla bozulurken (bir yıldıza yaklaştığımızda) parçacıklar jeodezikleri izlemeye devam eder ama bu jeodezikler artık eğriseldir. Hatta bir yıldız gibi kütleli bir cismin bölgesinde uzayzaman bükülmesi jeodeziklerin bükülüp sarmal hale gelmelerine yol açacak kadar bile büyük olabilir. Başka bir deyişle zaman ilerledikçe bir gezegen yıldıza etrafında neredeyse kapalı bir yolda, neredeyse elips çizerek tekrar tekrar hareket ediyor gibi görünür. Bu, hareket ederken uzayzamanda bir jeodeziği izleyen gezegenin uzayda neredeyse kapalı bir yörünge izlemesi anlamına gelir. Yıldızdan uzakta (Merkür'de değil de Plüton'da mesela) uzayzaman daha az eğrilmiştir ve gezegenin, yolu neredeyse kapalı hale gelmeden önce uzayzamanı daha uzun bir süre boyunca tatması gerekir. Başka bir deyişle yıldızdan uzak bir gezegen yakın bir gezegenden daha yavaş bir yörüngede döner. Aslında gezegenlerin izlediği yollar kusursuz elips değildir: Her dönüşlerinde hafif daha farklı yollar izlerler ve merkezdeki yıldıza etrafındaki hareketleri uzaya bakan gözlemciler için rozete benzer²³ bir görünüm sunar. Merkür'ün izlediği (*günberi noktasının devinimi* denen) rozete benzer yol şeklinin açıklanması genel göreliliğin ilk başarılarından biri olmuştur (Şekil 9.18).

²³ Rozet (*rosette*), botanikte yaprakların benzer yükseklikte ve yuvarlak olduğu düzene verilen isim –çn.

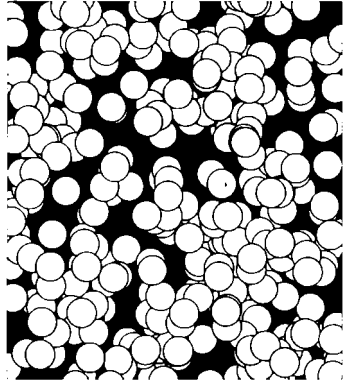
Kütleçekimi aradan çıkarmış olduk. Artık gezegenlerin hareketinin kütleçekim denen bir kuvvete yanıt vermelerinden değil, bir cismin uzayzamandaki bir jeodeziği izleyen doğal hareketi olduğunu görüyoruz. Başka bir deyişle hareket geometrinin bir tezahürüdür.

Uzayzamanın şu ana dek aktarılan betimlemesinde önemli bir sorun var: Yeterince küçük bir ölçekte geometri muhtemelen var olmuyor. Modern fiziğin önünde duran en büyük problemlerden biri genel görelilik kuramları ile kuantum kuramının (7. Bölüm) *kuantum kütleçekim* şeklinde birleştirilmesidir. Müthiş bir çabaya rağmen ve müthiş bir ilerleme kaydedilmiş olmasına rağmen bilimcilerin elinde henüz birleşik bir kuram yok. Şu anda “kuantum kütleçekim” diye bir kuram yok: Onun yerine farklı matematiksel incelik derecelerine sahip, çoğu oldukça tartışmalı spekülasyon var. Fakat birleştirme başarılı olduğunda herkes uzayı ve zamanı düşünme biçimimizde etkisi görelilik ve kuantum kuramlarının neden olduğundan daha büyük olacak bir devrimin olmasını bekliyor. Bilim insanlarının şu anki puslu kuantum kütleçekim algısına rağmen yine de bu kuramın sahip olmasını beklediğimiz bazı özellikler var.

Bu özelliklerden biri, görünüşü farklı olsa da aslında uzayzamanın doğası hakkında biraz eski moda, Newton’ın uzayı bir sahne olarak kavrayışından ilkesel anlamda pek az farklılaşan bir görüşe sahip olmamızdan kaynaklanıyor. Uzay ve zamanı birleştirerek ve ortaya çıkan uzayzamana kütlelenin varlığına dayanan Öklit-dışı bir geometri bahşederek betimlemeyi elbette daha incelikli bir hale getirdiğimiz doğru. Ama yine de uzayzamanın evrendeki tüm faaliyetlerin oynandığı bir eylem sahnesi olduğu hissi devam ediyor. Kuantum kütleçekimde olayların kendisinin evreni tanımlamasıyla bu sahne hissi yok oluyor. Belki de gerçekte sahne yok: Bizim evren diye değerlendirdiğimiz şey muazzam sayıda bağlantılı olaydan başka bir şey değil. Bu algılamayla Einstein’ın denklemi olaylar arasındaki ilişkilerin nedensel yapısı hakkında bir ifade haline geliyor.

Kuantum kütleçekimin ikinci özelliği, yeterince küçük bir ölçekte uzayzaman kavramının tümünden kaybolmasıdır. Bu, uzay-

Şekil 9.19 Uzayzamanı olağanüstü oranda büyüterek inceleyebilseydik bunun bir süreklilikten ziyade köpüğe benzediğini görürdük. Planck uzunluk ve zaman ölçeğinde klasik uzayzaman algıları geçersizdir. Planck ölçeğinde ne olduğunu aslında kimse bilmiyor ama sağlanan ilerleme nerede olduğumuz konusundaki algımızı devrimsel bir değişime uğratabacağına benziyor.

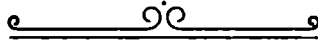


zamanın bir süreklilik (nedensel olarak bağlantılı olayların sürekliliği) olarak değerlendirilmesinin yerini bir çeşit köpüğün alması anlamına gelir (Şekil 9.19). Olayların mümkün olan en küçük uzamsal ayrılması daha önce belirtmiş olduğumuz Planck uzunluğudur, zamanda mümkün olan en küçük aralıklanma da Planck zamanıdır. Planck uzunluğu yaklaşık olarak 10^{-35} m'dir ve bu bir atom çekirdeğinin çapından basamaksal olarak yirmi büyüklük sırası daha küçüktür, dolayısıyla biz algısal yönden hantal dev yaratıkların uzayzamanı süreklilik sanma hatası yapmış olmamız sürpriz sayılamaz. Uzayzamanda var olabilen en küçük yüzey Planck uzunluğunun karesine yakın bir alana sahiptir, var olabilen en küçük üç boyutlu bölge de yaklaşık olarak Planck uzunluğunun küpüne eşit bir hacme sahiptir. Alışkın olduğumuz birimlerle Planck zamanı yaklaşık 10^{-43} sn'ye karşılık gelir, dolayısıyla iki olay zamansal açıdan bundan daha yakın olamaz. Bir milisaniye süren bir süreç bile 10^{40} bileşenden oluşmak zorundadır. Hiçbir saat saniyede 10^{43} kereden fazla tıklayamaz.

Geleneksel fizikte sıcaklık için nasıl bir mutlak minimum ("mutlak sıfır") varsa, kuantum kütleçekim de bir mutlak maksimum olduğunu ve bunun 10^{32} K civarında olduğunu söylemektedir. Bu sıcaklıkta uzayzamanın kendisi eriyecektir. Evrenin başlangıcına işaret eden Büyük Patlama belki de o kadar dramatik bir ateş topu değil, daha çok uzayzamanı dondurarak kalıcılaştıran bir kozmik soğumaydı. Geometri ve bu sözcüğün işaret ettiğini gördüğümüz her şey, olayların nedenselliğinin soğuk damgasıdır.

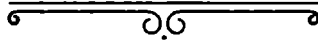
10 ARİTMETİK

AKLIN SINIRLARI



BÜYÜK FİKİR

Aritmetik tutarlıysa, tamamlanmamış demektir



Tanrı tamsayıları yarattı, gerisi insanların eseri.

LEOPOLD KRONECKER

İnsan zihninin en ince yaratılarından biri matematiktir, çünkü o rasyonel düşüncenin ideal dayanağı olmakla kalmaz, aynı zamanda bilimsel spekülasyona deneyimin karşısına çıkmasına yetecek sertliği veren omurgadır. Bilimsel hipotezler pelte gibidir; eğer deneysel doğrulamaya karşı koyacak ve doğa bilimini oluşturan kavramlar ağına uyacaklarsa matematiksel formülasyonun sertliğine ihtiyaç duyarlar. Sıkça karşılaşılan bir görüş matematiğin bir bilim olmadığıdır, çünkü bizim içerisinde yaşıyor gibi görüldüğümüz dünyayla mantığın kesinliğine uyma haricinde pek fazla ilişkili olma gereği duymayan evrenlere, kendi söylemindeki evrenlere ister istemez yüzünü dönebilmektedir. Bu açıdan matematik kendi içerisine kapalı olarak değerlendirilebilir. Fakat bir bilim insanının düşünce tarzında tuttuğu merkezi yerden dolayı da onur konusu muamelesi görür ve fahri bir bilim olarak karşılanır. Üstelik soyutlamanın fizikte artan kulla-

nımı ve biyolojide de iç gıcıklamasıyla birlikte matematiğin nerede bitip bilimin nerede başladığını saptamak zor ve sabah sisinin ucunu haritada göstermek kadar da anlamsızdır.

Matematiği buraya katmamızı uygun kılan bağlantılı bir başka neden daha vardır. Çalışan bilimcilerin çoğu o pragmatik ve duyarlı tarzlarıyla fiziksel dünyanın bir betimlemesi olarak işleme yönünden matematiğin çarpıcı becerisinin hakkını verir ve ellerinde bu kadar zarif ve güçlü entelektüel araç olduğu için minnettar olur. Ama minnettarlığın ve uygulamanın ötesine geçip bilimsel gözlem ile matematiksel betimlemenin bereketli işbirliğinin acaba matematiğin henüz tam olarak tanımlanmamış ve elbette açıklanmamış daha derin bir yönüne işaret edip etmediğini merak edenler de olur. Matematikte simetri kuramının formüle edilişine ve fizik sorunlarına uygulanmasına büyük katkı yapmış Macar–Amerikalı kuramsal fizikçi Eugene Paul (Jénó Pál) Wigner (1902–1995) matematiğin evrenin betimlenmesinin dili rolünü üstlenişindeki çarpıcı beceriye şaşıryordu:

Matematiğin dilinin fizik yasalarının formüle edilebilmesine uygun oluşu mucizesi, bizlerin anlamadığı ve hak etmediği şaşıracak bir armağandır.¹

Einstein da evrenin anlaşılması en zor özelliğinin onun anlaşılabilir olması olduğunu fark ettiğinde benzer bir düşünce ileri sürmüştü.

Bu bölümde asıl hedefim ne matematiğin kendisinin anlatımı hatta ne de (ilgili bulduğum veya ilgisiz de olsa eğlenceli bulduğum yerler hariç) matematiği oluşturan fikirlerin tarihini aktarmak; bu sadece matematik hakkında bir bölüm, o kadar. Matematikçiler teoremlerini geliştirirken ve denklemlerini çözerken ne yaptıklarını düşünüyorlardı, bunlardan bahsedeceğim. Ne yaptıklarının ayrıntılarına girmeyeceğim, dolayısıyla Pythagoras'ın teoreminin kanıtlarıyla ya da ikinci dereceden denklemlerin nasıl çözüleceğiyle falan karşılaşmayacaksınız. Hal böyle olunca da bu bölümde hepimizin ya hayran kalmayı ya da

1 The unreasonable effectiveness of mathematics [Matematiğin mantıksız yararlılığı], *Communications in Pure and Applied Mathematics* 13 (1960). "Hak etmediğimiz" sözyle ne demek istediği hakkında bir fikrim yok.

nefret etmeyi ve korkmayı öğrendiği tekniklerden ziyade matematiğin felsefesi, özellikle de konunun temellerini oluşturan *matematiksel ontoloji*'yle ilgilenildiğini göreceksiniz. Daha farklı bir ifadeyle bu bölümü Bertrand Russell'ın sık alıntılanmasına karşın çok sempatik o ünlü nüktesinin geçerliliğini araştırmak için kullanma niyetindeyim:

Neyden bahsettiğimizi ya da söylediğimizin doğru olup olmadığını bilmediğimiz alana saf matematik denir.

Okurlarımızdan çoğunun matematikle ilgili hoş olmayan, belki de bastırılmış anıları olduğunun ya da en azından bunun gibi bir bölümün isteyebilecekleri konusunda rahatsız edici önyargılara sahip olduğunun farkındayım. Cesaretli olun lütfen: Bu bir ders kitabı değil. Daha büyüleyici kısımlara odaklanma niyetindeyim ve en azından ilk okuyuşta konunun akışını kaybetmeden atlamanızın sorun oluşturmayacağı yerleri de söyleyeceğim. Ayrıca da bu bölümün matematiksel olmadığı, matematik *hakkında* bir anlatım olduğu da aklınızda bulunsun.

Son dikkat çekeceğim nokta bu bölümü farklı bir perspektife oturtuyor. Yolculuğumuzda ilerledikçe artan bir soyutlamaya şahit olduk, aşına olduğumuz kavramların çözülerek yerlerine daha güçlülerinin geldiğini gördük. Matematik özünde zaten soyutlama olması itibarıyla bu yolculuğun zirvesidir: Matematik saf, çıplak, bedensiz soyutlamadır. Bu yüzden olağanüstü bir güçle karşılaşmaya hazır olmamız gerekir.

Matematikteki temel güçlük onun işleri *doğal sayılarla*, bu işi görmesi istenen ama bunun için icat edilmemiş olan gündelik sayma sayıları 0, 1, 2, 3,..., ile yapmayı denemesidir. Doğal sayılar, bir toplamdaki nesne sayısını saymak için *sayma sayıları* olarak ve nesneleri bir listede olduğu gibi düzenlemek için de *sıra sayıları* olarak kullanılır. Bunlar farklı kavramlardır ve bunlara İngilizcede [Türkçede de olduğu gibi -çn.] farklı isimler veriyoruz: Sayma sayılarında bir, iki,... şeklinde, sıra sayılarındaysa birinci, ikinci,... şeklinde gidiyor. Söyleyeceklerimin çoğunda doğal sayıları sayma sayıları olarak ele alacağım.

Az sonra göreceğimiz üzere matematikçiler o tipik derin tarzlarıyla doğal sayılar üzerine düşünmeye başladıklarında, aslında sayabilmemizin bile şaşırtıcı olduğu ortaya çıktı, çünkü bir yünden o kadar nadirdiler ve sayıları o kadar azdı ki (sadece sonsuzluk kadar) eski insanların onlara rastlamış, onlarla karşılaşmış olması çok şaşırtıcıydı. Tartışmamızın daha ilk aşamalarında bile matematikçilerin kafaya taktıkları sorunlardan bazılarını görmeye başlayabiliyoruz. Örneğin sayma sayıları gerçekten de sonsuza dek devam ediyor mu, yoksa doğal sayıların sonsuzluğa ulaşmadan sönmüldüğü *ultrafinitist* (*aşırı sonlucu ya da aşırı sezgici*) *matematik* sayıların sonsuza dek hiç sonlanmadan uygun adım ilerlemesinden daha iyi bir yaklaşım mı? Ve dürüst olmak gerekirse sonsuzluğun doğrudan algısına sahip olmadığımız için sonsuzluğa başvuran matematiksel tanıtlamalar güvenilir mi? Birçok kişi güvenilir olmadığını iddia edecek ve sonsuzluğu bir kol boyu uzakta tutabilmek için her şeyi yapmaya hazır olacaktır.

Saymanın başlamasına, artık ilk ne zaman başladıysa, geri dönersek eğer, bugün sayma diye kabul ettiğimiz şeyle derin bir rezonansa şahit oluruz (daha sonra açıklayacağız). Saymaya yardımcı olarak kullanılan çeteleler vardı; bunlar bir sopaya koyulan işaretler, boncuk taneleri, Müslümanların Allah'ın doksan dokuz sıfatını saymak için kullandıkları (başlangıca işaret eden fazladan boncuk, imameyle beraber) yüz boncuktan oluşan *subha* [tespih], kurumuş gübre topakları ya da çakıllardan (Latince *calculi*, İngilizcedeki "calculation" ve "calculus" sözcükleri buradan gelmektedir) oluşan bir yığın olabiliyordu. Evrensel olarak taşınabilir bir çetele tutma aleti de çeşitli girinti ve çıkıntılarıyla insan bedenidir. Torres Boğazı Adaları'nda yaşayanlar saymada taban olarak 33'ü kabul ederek 8 (sağ omuz), 26 (sağ kalça) ve 28 (sağ ayak bileği) gibi sayılarla 33 sayısına (sağ ayak, küçük ayak parmak) ulaşabiliyordu. Şüphesiz insanın eli sayma aleti olarak özellikle de vücudun her tarafı giysilerle örtülmüşse çok daha uygundur. Dahası el hem sayma hem sıra sayılarını belirtebilme esnekliğine sahiptir: Sayma sayıları uygun parmak sayısının eşanlı gösterimiyle belirtilir; sıra sayılarıysa parmakların sırayla kaldırılmasıyla gösterilir. Bu yüzden geleneksel sistemimizin adlandırıldığı isimle "10'luk tabana" göre saymak insan anatomisinin doğal bir sonucudur.

Sayma tabanı, bugün hemen hemen herkes tarafından kullanılan 10 tabanına zaman içerisinde yerleşmiş olmasına karşın bazı sapmalar geçmişte de vardı, bugün de sürmektedir. Yeni Hebridler’de konuşulan bir dil olan Api dilinde sayma 5’lik tabana göredir ve aynı tabanın izlerine bazı Afrika dillerinde de rastlanır. Düzine (12) ve grosa (12 düzine) kullanımımızda 12’lik tabanın kullanımının kalıntısı söz konusudur. Babilliler halen pek bilinmeyen nedenlerle 60’lık tabanı tercih etmişti ve bu seçimleri zaman ve çember bölümlerimizde, küçük “dakikalar” ve bu dakikaların ikinci kez bölünmesiyle elde edilen “saniiyeler”de yaşamını sürdürmektedir. Babilli Sümerlerin biri 10’luk taban (ortak bölenleri 2 ve 5) diğeri 12’lik taban (ortak bölenleri 2 ve 3) kullanan iki kültürün birleşmesi sonucu, en küçük ortak kat olan $(2 \times 5) \times (2 \times 3) = 60$ yüzünden 60’lık tabanda (ama o için kullanılan bir sembol olmaksızın) karar kıldığını ileri süren bir fikir de vardır. 60’lık taban 60 ayrı rakamın ayrı ayrı ismini öğrenmek gerektiği için gündelik sayımda yerleşik bir yer edinmedi (0, 1, ... , 8, 9, ♦, ”, ... , * [bizdeki 59], 10 [bizdeki 60], 11, ...). Latince ve Fransızcada 20’lik tabandan gelen kalıntılar var, sırasıyla *undeviginti* ($19 = 20 - 1$) ve *quatre-vingts* ($4 \times 20 = 80$) gibi; 20’lik tabanın izi İngilizcede *score* (20) ve Dancada 60 için kullanılan *tresinstyve* (üç kere yirmi) sözcüklerinde görülüyor; şu an Venezuela Orinoco’da yaşayan Tamanalar, Grönland İnuitleri, Japonya’daki Aynular ve Meksika’daki Zapotekler halen 20’lik tabanı kullanmaktadır. Mayaların durumunaysa acımamak elde değil, çünkü astronomik takvimleri o için kabuğa benzer bir sembole sahipti ve 20’lik tabana dayanıyordu ama üçüncü basamak (“yüzler basamağı”) 20×20 ’ye değil 18×20 ’ye, dördüncü basamak da $18 \times 20 \times 20$ ’ye vs dayanıyordu. Muhtemelen astronomik hesaplamaları Maya yılının uzunluğuna göre ($18 \times 20 = 360$) basitleştirmeye çalışıyorlardı.

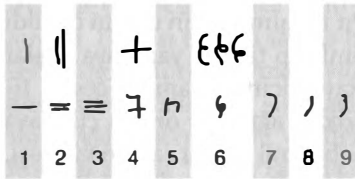
Parmak sayma nihayetinde kayıt tutulması için uygun değildi ve ilk ön-muhasebe insanları evrimleşip ticaret yapmaya başlar başlamaz, işlemlerin çetelesi ve kaydı için kullanılan çeşitli fiziksel araçların üzerinde kalıcı çizikler ağır ağır ortaya çıkmaya başladı. Sümerler çivi yazılarında v-biçimli bir tür rakam kümesi, Attikalı Yunanlarsa 10 için Δ (δεκα, deka), 10.000 için Μ (μυριοι, murioi) gibi sembollerle alfabetik bir gösterim kullandılar. Roma

rakamlarıysa bugün birçok kültürde gündelik kullanımda hayatta kaldı. Bugün 1, 2, ... yerine kullandığımız bilinen I, II,... dışında Alman tarihçi Theodor Mommsen'in (1817-1903) ortaya attığı düşünceye göre V (= 5) açık bir eli, X (= 10) iki elin birleşimini, M (= 1000) Φ sembolünün (|) ile bozulmasını ve D (= 500) de bu sembolün gerçek anlamıyla yarısını temsil etmektedir.

Bizlerin aşına olduğu "Arap" rakamları 9. yüzyıldan önce bir dönemde Hindistan'da abaküsün bir temsili olarak ortaya çıkmış gibi görünüyor. Batılı alimlerin bunlara "Arap rakamları" demesinin nedeni, o dönemde Arapların bilimde üstün olması ve yazarların onun otoritesini arkalarına almak istemesiydi. Çoğu rakamın kökeni belirsizdir ama 1'inki açıktır, 2 muhtemelen 2 dikey çizginin, 3 de üçünün birleşimidir. İnsanlık dörtten sonraki rakamları bir bakışta değerlendirmekte yetersiz gibi görünüyor, bu yüzden 4'den 9'a kadar olan rakamlar çizgi toplamlarının sembol kullanılarak kısaltılmış biçimleri olarak evrilmiş gibi görünüyor.

Şu anki sembollerimizin evriminin izi Brahmi yazısına dek sürülebiliyor. Brahmi yazısı, Magadha krallığına dayanan Maurya hanedanlığının üçüncü imparatoru, Hindistan'ı tahminen MÖ 273-235 yılları arasında yöneten Asoka'nın fermanlarında bulunan çok eski bir Hint yazısıdır (Şekil 10.1); bu yazı da aslında Arami toplulukları üzerinden gelen bir batı Sami geleneğinden devşirilmiş gibi görünüyor. Rakamların yeni fikirlere açık olmayan Avrupa'ya girişi 10. yüzyılın sonlarına doğru, sayısal olarak önemli ama vahiyssel olarak hayal kırıklığı yaratan bir yıl olan

Şekil 10.1 Arap rakamları adını verdiğimiz rakamlar, kökleri batı Sami geleneğinde olan Brahmi yazısına dek izi sürülebilen Hint sembollerinden doğdu. Üst satırda MÖ 3. yüzyılda Brahmi dilinde yazılmış Asoka fermanlarından alınmış dört rakam görülmektedir. İkinci satırdakilerse MS 3. yüzyılda Uttar Pradeş'teki bir kaynaktan alınan rakamlardır.

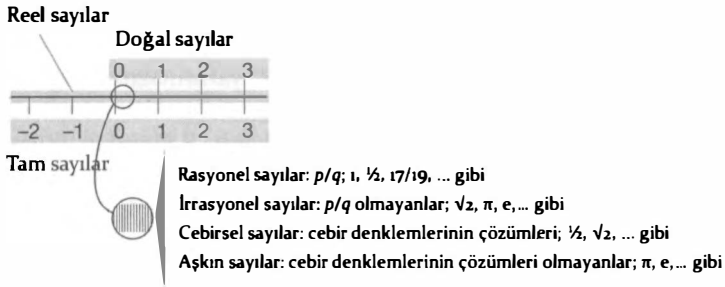


1000 yılında II. Sylvestre adıyla Papa olacak olan rahip Gerbert d'Aurillac (yak. 945-1003) sayesinde oldu. Yenilik önerisi, aritmetik açısından büyük bir olanaksızlık yaratmasına rağmen klasik Roma geleneklerine sadık kalan muhafazakâr rahiplerin muhalefeti karşısında ilk elde başarısız kaldı. Rakamlar ilk kez 976 yılında İspanya'daki Albelda manastırındaki rahip Vigila'nın kopyaladığı *Codex Vigilanus*'ta karşımıza çıkabildi.

Sıfır (Arapça boş anlamına gelen *sifr*'den gelir) ilk çıkışında bugünkü Arap yazısında da kullanıldığı şekliyle aslında bir noktaydı. Sonsuzluk sembolü ∞ , geceleyin avına yaklaşan bir kurt gibi zamanla paramparça edeceği sayılar kampına sessizce sokuldu. İlk kez uyuyamama hastalığı çeken Oxfordlu matematikçi ve Kraliyet Topluluğu kurucularından John Wallis'in (1616-1703) *Tract on conic sections* [Konik kesitler üzerine broşür] eserinde 1655 yılında kullanıldı. Sembolü, belki de yatıp güzel bir uyku çekebilme umuduyla, sonsuza dek izi sürülebilecek bir eğriyi betimlemek için kullandı.

Rahatsızlık (aynı anlama gelmek üzere matematik) sayılar çeşitli biçimlerde birleştirildiğinde doğdu. Çıkarma ve toplama gibi işlemleri kullanarak doğal sayıları işletmeye ya da yönetmeye başladığımızda, pragmatik deneyime yaratıcı zekâ uygulanmaya başladığında, artık eleman sayısı ile ilişkisi daha az sayı türleri yaratırız. Önce bu manipülasyonlardaki sembolizme bakalım, ardından doğal sayılara uygulandıklarında nasıl yeni sayı türleri yarattığımızı göreceğiz; ulaşılan sonuç Şekil 10.2'de özetleniyor ve bundan sonrasında bu çizimde yer alanları akılda tutmak faydalı olacak. Matematğin ilk dönemlerinde denklemler, kelimelerle dolambaçlı şekilde ifade edilmeleri anlamında "retorik"ti. İşlemleri göstermek için sembollerin kullanımıyla çok daha büyük bir açıklık ve bu açıklıkla beraber de çok da büyük bir işletim gücü ortaya çıktı.

İlk kez 15. yüzyıl Alman elyazmalarında görülen toplama işareti + büyük olasılıkla *et* (ve) sözcüğünün elyazımıyla tahrifinden çıkmıştır ve çıkarma için kullanılan - de sadece aralık bırakmayı işaret ediyor olabilir. İlk kez, sürgülü cetvelin eski bir modelini icat etmiş olan William Oughtred'in (1574-1660) 1631'de



Şekil 10.2 Bu bölümde karşılaşacağımız temel sayı türlerinin bir özetini görüyorsunuz. Doğal sayılar sayma sayılarıdır; eksi değerleri kapsayacak şekilde genişletildiklerinde tamsayılar grubu oluşur. Tamsayıların arasında rasyonel sayılar yer alır, bunlar bir doğal sayının bir başka doğal sayıya bölümü şeklinde ifade edilebilen sayılardır. Bu şekilde ifade edilemeyen irrasyonel sayılar konusu biraz daha derindir. Reel sayılar tamsayılar, rasyonel sayılar ve irrasyonel sayılardan oluşur ve her iki yönde sonsuzluğa uzanan bir çizgiyi oluşturan noktalara karşılık gelir. Cebirsel sayılar cebir denklemlerinin çözümleri olarak elde edilebilen sayılardır (bkz. metin ve dipnot 7) ve aşkın sayılar da bu şekilde elde edilemeyen sayılardır. Bazı cebirsel sayılar rasyoneldir, bazıları irrasyoneldir; aşkın sayıların hepsi irrasyoneldir.

yayımlanan *Clavis mathematicae*'sinde karşımıza çıkan çarpma işareti $\times$ da herhalde birbiriyle çarpmayı içeren orantı hesaplamalarında kullanılan bir sembolden türetilmiş olsa gerektir. Alman matematikçi Gottfried Leibnitz (1646–1716) $\times$ 'nın x 'le çok rahat karışabileceğini düşündü ve 1698 yılında onun yerine basit bir nokta kullanılmasını önerdi, böylece $a.b$, a ile b 'nin çarpımı anlamına gelecekti. Bölme için de $:$ sembolünün kullanılmasına taraftardı, şimdi yaygın olan $\div$ sembolü bölme için ilk kez (daha önce çıkarma için kullanılmıştı) 1659 yılında bir İsviçre metninde karşımıza çıktı.

İki eş yatay çizgiden oluşan eşitlik işareti $=$, ilk kez İngiliz matematikçi ve cebiri İngiltere'ye getiren kişi, dikkat çekici kitap isimleri bulan biri (bunlar arasında *The whetstone* dışında, aritmetiğe giriş kitabı niteliğindeki *The grounde of artes* [Sanatın Temeli] ve astronomi konulu ders kitabı *The castle of knowledge* [Bilginin Kalesi] da var) ama buna rağmen borçlular hapisanesinde yaşamını yetiren Robert Recorde'nin (yak. 1510–1558) yazdığı *The*

whetstone of witte (Mantiğın Bileytaşı, 1557) kitabında karşımıza çıktı. Recorde şöyle yazıyordu:

Is equalle to [eşittir] kelimelerinin biktırıcı tekrarından kaçınmak için çalışmalarımda sık sık yaptığım gibi aynı uzunlukta İkiz çizgiler kullanacağım: zira iki şey bundan daha eşit olamaz.

Record'un şimdi hepimizin bildiği = işareti, zaferi kazanmadan önce uzun bir süre || ile ve *aequalis*'in kısaltması æ'ye dayalı çeşitli tasarımlarla mücadele etti.

Doğal sayılarda toplama ve çarpma aynı türde sayılar doğurur. Örneğin $2 + 5 = 7$, doğal bir sayı ve $2 \times 5 = 10$, yine bir doğal sayıdır. Fakat çıkarma yeni bir sayı sınıfı doğurur. 2'den 3'ü çıkarırsak bulduğumuz -1 konuşma alanımızı doğal sayılardan *tamsayılara* ..., -2 , -1 , 0 , 1 , 2 , ... yükseltir. Negatif tamsayılar ilk ortaya atıldığında sanırım çok kafa karıştırıcıydı, zira yalnızca saymayla ilgilenen insanlar, sayısı yoktan daha az nesneleri kavramakta zorlanmış olmalılar.

Doğal sayıların çarpımı yalnızca doğal sayılarla sonuçlansa da, çarpma kavramı *asal sayılar* adı verilen ve başka doğal sayıların (1 ve kendileri haricinde) katları olmayan bir doğal sayılar alt sınıfının belirlenmesine yol açtı. Asal sayılar 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, ... şeklinde sıralanır. Örneğin 15 asal değildir çünkü 3×5 şeklinde ifade edilebilir; öte yandan 17 asaldır çünkü başka doğal sayıların çarpımı olarak ifade edilemez. Asal sayılar ("asallar") sayılardan büyülenen insanların yoğun ilgisini çeker ve çekmiştir, çünkü çarpma işlemi açısından doğal sayıların temel "atomları" gibi hareket eder görünmektedirler (diğer bütün sayıların inşa edilebileceği sayılar olarak belirli bir işlev görmektedirler). Her doğal sayının asalların *benzersiz* bir çarpımı olduğunu söyleyen Eukleides'in *aritmetiğin temel teoreminin* içeriği de öz itibarıyla budur.² Örneğin 9.365.811 gibi bir sayı asalların çarpımı olarak yalnızca bir şekilde ifade edilebilir (bu örnekte $3 \times 7^2 \times 13^3 \times 29$). Temel teorem, iki büyük asal sayının çarpımlarını kullanan

2 Eğer 1 asal sayılsaydı 1'in istediğimiz sayıda katını ekleyerek aynı sonuca ulaşabileceğimiz için bu teorem doğru olmazdı. 1'in resmi asal listesine alınmamasının nedenlerinden biri budur, ama bazı örneklerde yine de fahri bir asal olarak karşımıza çıkar.

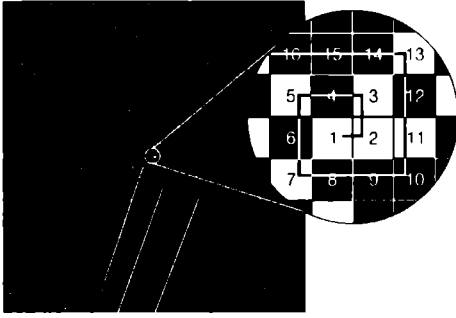
modern şifreleme işlemlerinin temelinde yatar, asalların incelenmesi de ticarete güvenli bankacılık işlemlerinin ve bireyler ve ordular arasındaki gizli iletişimin yürütülmesinde taşıdığı merkezi önemle kesinlikle matematiğin dışıyla ilgisiz, kendi içine kapalı bir faaliyet sayılamaz.

Asalların çeşitli özellikleri bilinse de bazı sanıları henüz kanıtlanmamıştır (ve yanlış olabilir). Eukleides'in ileri sürdüğü iyi tanımlanmış olgulardan biri asalların sonsuz sayıda olmasıdır: Asallar sonsuza dek devam eder. Şu anda bilinen en büyük asal $2^{13466917} - 1$ 'dir.³ Bu sayı p de asal olmak üzere $2^p - 1$ biçimindeki bir *Mersenne asalı* örneğidir. 14 Kasım 2001'de keşfedilmiştir ve tam olarak, açık haliyle yazılsa 4 milyon hanenin üzerindedir (net konuşmak gerekirse 4.053.946) ve bu kitap gibi yaklaşık sekiz kitap eder. Binden fazla haneli çok büyük asallara "dev asallar" denmektedir. Asallar büyüdükçe daha zayıf dağılırlar ama bir doğal sayı ile o doğal sayının iki katı arasında her zaman en az bir asal vardır. Örneğin 1 milyar ile 2 milyar arasında en az bir asal olduğuna emin olabilirsiniz, gerçekteyse milyonlarca vardır. Bazı asallar birbirine yakın toplaşır. Örneğin aralarındaki fark 2 olan çok sayıda "ikiz asal" vardır, 11 ve 13 ikiz asallardır. *İkiz asallar sanısı* (sadece bir sanı ya da diğer adıyla kestirimdir) ikiz asalların sonsuz sayıda olduğunu ve bu nedenle ikiz asalların da asalların kendisi gibi sonsuza dek devam ettiğini söyler. Şu ana dek bilinen en büyük ikiz asallar $33.218.925 \times 2^{169.690} - 1$ ve $33.218.925 \times 2^{169.90} + 1$ 'dir (bu ikili 2002'de keşfedildi ve her ikisi de 51.090 hanelidir).⁴

Asalların başka birçok garip özelliği daha vardır. Örneğin müthiş bir hayalgücüne sahip Polonyalı-Amerikalı matematikçi Stanislaw Ulam (1909-1984) bütün doğal sayıları sarmal şeklinde, 1 merkezde, 2 onun sağında, 3 2'nin üzerinde, 4 1'in üzerinde, 5 4'ün solunda ve benzeri şekilde yazar ve asalları işaretlerseniz, asalların diyagonal doğrular üzerinde olacaklarını keşfetti (Şekil 10.3). Ulam hayalgücünü başka şekillerde de kullandı: Edward Teller'le birlikte hidrojen bombasının nasıl patlatılacağını buldu.

3 Asallarla ilgili güncellemelere şuradan erişebilirsiniz: <http://www.utm.edu/research/primel/>.

4 Kitabın çevrildiği sırada ulaşılmış son asal rekoru 22.338.618 haneli $274.207.281 - 1$ sayıydı -çn.



Şekil 10.3 Ulam sarmalı.

Doğal sayıların küçük resimde görüldüğü gibi sarmal şekilde yazıldığında ve işaretlendiğinde köşegen doğrular üzerinde olmaya meyilli olduğunu ve asal olmayan sayıların siyah fonunda beyaz yıldızlar gibi parladığını görüyoruz. Yerlerini göstermek için bu köşegenlerden bazılarını çizdik, diğerlerini de siz bulabilirsiniz.

Asal sayılar (nasıl 1 toplamanın temel atomuysa, aynı şekilde) çarpmanın temel atomları olmasına rağmen, toplamada da temel bir rol oynayabilir. Çar II. Petro'ya da bir seferlik eğitimlik yapmış Christian Goldbach (1690-1764) 1742 yılında ünlü İsviçreli matematikçi Leonhard Euler'e (1707-1783) yazdığı mektupta z'den büyük her çift doğal sayının iki asalın toplamı olduğunu ileri sürdü. Bu yüzden $2 + 2 = 4$, $3 + 3 = 6$, $3 + 5 = 8$, ... , $47 + 53 = 100$, ... Büyük çaba harcanmasına rağmen *Goldbach sanısı* halen ispatlanmadı. Zorluk, asalların çarpma kavramından ortaya çıkmasına karşın burada toplama bağlamında kullanılmasından kaynaklanıyor gibi görünüyor. Ne var ki sanı, sahnemizin ortasına ağır ağır yürüyen bir özelliğin örneği olabilir: Kanıt yoktur ve bu yüzden kesin olarak sanı ne doğru ne de yanlış olabilir. Goldbach bir başka kestirimde daha bulundu, buna göre de tek doğal sayıların hepsi üç asalın toplamıydı. Bu kestirim 1937 yılında Rus matematikçi Ivan Matveevich Vinogradov (1891-1983) tarafından kısmen ispatlandı (kanıtlama yalnızca büyük sayılarda işe yarıyor).

Bir doğal sayının bir başka doğal sayıya bölünmesi de *rasyonel sayılar* dediğimiz yeni bir sayı kategorisini karşımıza çıkarıyor (kökeni aslında "*ratio*"ya, yani oran kelimesine dayanıyor; ama "*rasyonel*" de akla, mantığa uygun anlamı taşımasıyla bu sayıla-

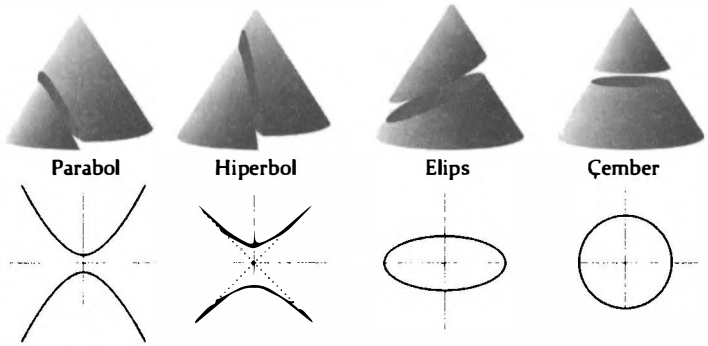
rın güvenilirliğine işaret ediyor); rasyonel sayılar için 0 ile 1 arasında $\frac{1}{2} = 0,500\ 000\ 000\ \dots$ ve $\frac{3}{7} = 0,428\ 571\ 428\ 571\ \dots$ örneklerini verebiliriz. Rasyonel sayıların ondalık değerlerinde ya 0'ın sonsuza dek tekrarlandığına ya da sonlu bir sayı dizisinin yine sonsuza dek tekrarlandığına dikkat ediniz.

Şimdi eğer baktığı şeyin ötesine geçen, onda genellemeler arayan ve ipuçlarının götürdüğü yere giden biri gibi, anlayacağınız bir matematikçi gibi düşünmeye başlamışsanız, içinizde bir soru sizi kemirmeye başlamış demektir: Tekrarlayan dizilere sahip olmayan ve bu yüzden doğal sayıların bir oranı olarak ifade edilemez nitelikte sayılar var mıdır? Bu *irrasyonel sayıların* varlığını ilk keşfeden Pisagorcular oldu. Croton'da (bugün İtalya'nın topuğundaki Crotone) rasyonel sayılar arasındaki uyuma dayalı bir yaşam felsefesiyle yaşarlar, Güneş'e doğru işemez, kurban sırasında hayvanların tırnaklarını ayırır ve barışçıl toplumsal ortak yaşantılarını kuru fasulye yemekten kaçınarak korurlardı (bu sonuncusunu bizzat Pythagoras aralarında yaşarken Mısırlı rahiplerden öğrenmişti)⁵. Bu felsefe, 2'nin karekökünün, $\sqrt{2} = 1,414\ 213\ 5\ \dots$ irrasyonel olduğunu ve bir doğal sayının başka bir doğal sayıya bölümüyle ifade edilemediği keşfedildiğinde tümenden altüst oldu. O zamandan bu yana çok sayıda sayının irrasyonel olduğu bulundu, birkaçını sayarsak $\pi = 3,141\ 59\ \dots$ (bir çemberin çevre uzunluğunun çapına oranı, sembolünü ilk kez 1737'de Euler önerdi ve 1767'de irrasyonel olduğu saptandı)⁶, π^2 (irrasyonel olduğu 1794 yılında saptandı) ve $e = 2,718\ 28\ \dots$ (doğal logaritmanın tabanı). İrrasyonelliğin ispatlanması zordur: Örneğin e^π nin irrasyonel olduğu bilinmesine rağmen aynısının π^e için de geçerli olup olmadığı halen bilinmemektedir.

Rasyonel ve irrasyonel sayıların pozitif ve negatif halleri ve o dahil, hepsine *reel sayılar* denmektedir. Reel sayıları kafada canlandırmak için sağa doğru ilerledikçe sayıların arttığı bir doğru

5 Ne kadar haklıymışlar. Bugün kuru fasulyenin enzimlerimizin sindirmediği ama kalın bağırsığımızda enfeksiyona neden olan koli basillerinin sindirdiği bir karbonhidrat yönünden çok zengin olduğunu biliyoruz. Koli basilleri sindirdiğinde de büyük miktarda karbondioksit ve hidrojen salınımına ve bu da gaza sebep oluyor.

6 π 'nin değeri birkaç bin basamağa dek hesaplandı. 1589. basamakta 7'ler tekrarlanmaya başladı ve dördü art arda görüldü. Ne var ki hemen sonra araya tekrar başka basamaklar girdi ve ayrıldılar.



Şekil 10.4 Yunanlar ideal bir uzay tasvirine sahipti ve geometride de bu yüzden iyiydiler. Burada parabol, hiperbol ve elipslere (özel bir durum olan çember dahil) bir koninin farklı yönlerde kesilmesiyle elde edilen sayı seçimleri olarak bakılabildiğini görüyoruz. Bugün, başta Descartes sayesinde bu şekillerin cebirsel niceliklerle nasıl bağlantılandırılacağını biliyor ve böylece uzay geometrisi ile bazı sayı seçimlerinin aritmetik özellikleri arasındaki bağlantıyı görebiliyoruz.

üzerinde her bir sayıyı bir nokta şeklinde düşünebiliriz. Reel sayılar bu doğru üzerindeki noktalar gibi solda eksi sonsuzluktan sağda artı sonsuzluğa dek uzanmakta ve olası tüm sayıları, tam sayılar, rasyonel, irrasyonel sayılar hepsini kapsamaktadır. Reel sayıların bir çizgi üzerindeki noktalarla bağlantılandırılması, geometrinin (çeşitli çizgilerin, dolayısıyla nokta toplamlarının ve dolayısıyla reel sayı toplamlarının özellikleri) bir aritmetik dalı olarak ele alınabileceğinin kabulüne götüren önemli bir adımdır. Bu bölümde bu yolda fazla ilerlemeyeceğiz ama açık şekilde aritmetiksel fikirlere yoğunlaşacak olsak da bunların kapalı şekilde diğer matematik dallarını da kapsadığını ve geometrinin de bunun bir örneği olduğunu bilmelisiniz (Şekil 10.4). Aslında aritmetik bunun çok ötesine uzanır. İlk olarak Alman matematikçi Leopold Löwenheim (1878–1957) tarafından 1915 yılında kanıtlanıp 1920’de Norveçli matematikçi Albert Thoraf Skolem (1887–1963) tarafından geliştirilen küçük ama olağanüstü hoş bir teoreme göre aritmetiğin sahip olduğu türde bir kurallar sistemi, bir aksiyom (belitler) kümesi yoluyla formüle edilebilen *bütün* bilgi alanlarıyla benzerlik gösterir. Okulda eğer bizlere

Löwenheim-Skolem teoremine göre aslında kuantum mekaniği, doğal seçim ve hukuk (bu bilgi dalları belitler yoluyla ifade edilebildiği ölçüde) alanlarından sonuçlar çıkarma sürecini modellediğiniz söylenseydi, belki de kareköklerin nasıl alınıp uzun bölmelerin nasıl yapılacağını öğrenmek hiçbirimize bu kadar sıkıcı gelmezdi. Söylenen bölümün geri kalanı için de geçerlidir: Okuyacaklarınızın çoğu aritmetik gibi görünse de, aslında bunun insan bilgisinin sistematik herhangi bir dalının anlatımı olduğu aklınızda bulunsun.⁷ Bu da nefes kesici değilse, ben artık bir şey bilmiyorum demektir.

Bazı irrasyonel sayılar (π dahil, $\sqrt{2}$ değil), olağan cebirsel denklemlerin “ötesine geçmeleri” anlamında *aşkın* sayılardır. Bu onların $3x^3 - 5x + 7 = 0$ gibi basit cebir denklemlerinin çözümleri olmadıkları anlamına gelir.⁸ Bu nedenle $x = \sqrt{2}$, $x - \sqrt{2} = 0$ ’ın sonucudur, dolayısıyla cebirseldir (bu tür bir denklemin çözümüdür) ama aşkın değildir. Bir çözüm olarak $x = \pi$ ’ye ya da $x = e$ ’ye sahip olan bu türde bir denklem yoktur, dolayısıyla π ve e hem irrasyonel hem de aşkındır. 1934 yılında Rus matematikçi Aleksandr Gelfond (1906–1968) a ’nın cebirsel (0 ve 1’den başka) ve b ’nin cebirsel ve irrasyonel ($\sqrt{2}$ gibi) olduğu her zaman a^b ’nin aşkın olduğunu kanıtladı; dolayısıyla örneğin $2^{\sqrt{2}}$ aşkındır, çünkü 2 cebirseldir ve irrasyonel sayı $\sqrt{2}$ cebirseldir: Bu yüzden hemen ilk bakışta çözümü $2^{\sqrt{2}}$ olan hiçbir cebirsel denklem olmadığını biliriz. Yeri gelmişken “cebir” sözcüğü Ebu Abdullah Muhammed bin Musa el-Harizmi’nin 830 yılında yazdığı *Hisabül- Cebr ve’l- Mukabele* (Cebir ve Denklem Hesabı Üzerine) kitabının başlığında ilk kez karşımıza çıkar. Burada “yenileme” anlamına gelen *cebir* denklem çözmeyle ilgilidir, ama aynı zamanda “onar- ma” anlamına da gelir. Harizmi tarihe ayrıca bir kez daha geçer: Denklemlerin çözümünde izlenen kurallar dizisi anlamına gelen “algoritma” terimi de ondan gelir.

Çeşitli denklemlerin çözümünün “cebirsel sayılar” olarak adlandırılan belirli bazı sayı kategorilerinin doğuşuna neden olduğunu gördük. $2x = 1$ gibi denklemlerin çözümleri bize rasyonel

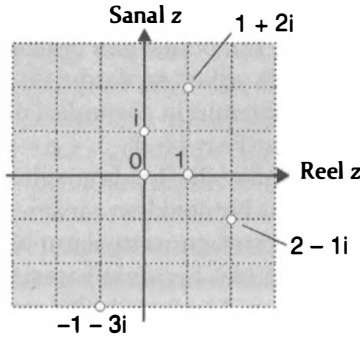
7 Tersî, formel hale getirilmiş bütün bilgi sistemlerinin salt aritmetik olduğu da doğru ve belki daha kafa açıcıdır.

8 Bir cebirsel denklem, $a_k x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0 = 0$ biçimindedir.

sayıları verir (bu örnekte $x = \frac{1}{2}$), ama $x^2 = 2$ gibi denklemler irrasyonel sayıları verir (bu örnekte $x = \sqrt{2}$); bunlar gibi basit denklemlerin çözümleri olmayan sayılarsa aşkın sayılardır ($x = 2^{\sqrt{2}}$ gibi). Doğal sayılar $x - 2 = 1$ gibi denklemlerin çözümleri olarak düşünülebilir (çözülünce $x = 3$), negatif sayılar da $x + 2 = 1$ gibi denklemlerin çözümleri olarak düşünülebilir (bu da çözülünce $x = -1$). Fakat bu listede eksik olan basit bir denklem vardır: $x^2 + 1 = 0$ 'ın çözümü nedir? Şu ana kadar aktardığımız sayıların hiçbiri bu denklemin bir çözümü değildir, çünkü hepsinin karesi pozitifdir ve 1 eklendiğinde hiçbiri 0 olmaz. Matematikçiler genelde bazı denklemlerin çözümü olmadığını itiraf etmek istemedikleri için $x^2 + 1 = 0$ 'ın çözümü olarak *sanal sayı* kavramını icat ederek buna i dediler; başka bir deyişle $i = \sqrt{-1}$. i ve $-i$ 'nin çarpımları gibi sayıların gerçekte var olmadığını düşündükleri (aslında Descartes böyle düşündüğü) için de bunlara “sanal” dediler.

Sonradan $x^2 - x + 1 = 0$ gibi bazı denklemlerin reel ve sanal sayıların birleşiminden oluşan çözümleri olduğu ortaya çıktı, bu örnekte bunlar $x = \frac{1}{2} + (\frac{1}{2} \sqrt{3})i$ ve $x = \frac{1}{2} - (\frac{1}{2} \sqrt{3})i$ 'dir. Bu birleşimlere *karmaşık sayı* denmektedir, örnekteki ilk $\frac{1}{2}$ olağan bir “reel” sayı, $\pm(\frac{1}{2} \sqrt{3})i$ ise sanaldır. Bu iki bileşenli reel sayılarla hesaplama yapmak için özel kuralların geliştirilmesi gerekmiştir, ama bunlar reel sayılar için kullandığımız kuralların doğal uzantılarıdır ve özel bir zorluk yaratmazlar.

Reel sayılar görmüş olduğumuz gibi bir doğru üzerinde sıra halinde düzenlenebilir. Karmaşık sayılar da sayının reel kısmının yatay eksenindeki uzunlukla, sanal kısmının da dikey eksenindeki uzunlukla belirtildiği bir düzlemde birer nokta olarak gösterilebilir (Şekil 10.5). Başka bir deyişle bir karmaşık sayı aslında bir sayı çiftidir: Örneğin $1 + 2i$ karmaşık sayısı dikey eksende başlangıç noktasından 1 cm, yatay ekseninde 2 cm yukarıda bir noktayla gösterilebilen iki bileşenli $(1, 2)$ bir sayıdır. Farklı bir şekilde ifade edersek, bir karmaşık sayıyı dörtgen yüzün sol tarafındaki yüzde bulunan değer reel kısmı, sağ tarafındaki değer sanal kısmı gösteren bir domino taşı gibi düşünebiliriz. İleride zar atarken  geldiğinde bunu $4 + 3i$ şeklinde bir karmaşık sayı olarak düşünün. Bu tür imgelerle aranız iyi değilse de telaşlanmayın: Bu



Şekil 10.5 Bir karmaşık sayı iki bileşenden oluşur ve düzlem içerisindeki noktalarla gösterilebilir. Örneğin $z = -i$ karmaşık sayısı, yatay eksende 2 birimlik, dikey ekseninde aşağıya doğru bir birimlik bir noktayla belirtilir. Karmaşık sayılarla yapılan işlemler aslında bu iki kısım ile yapılan işlemlerdir.

bölümde karmaşık sayılar bir kısa dikkat çekme hariç bir daha karşımıza çıkmayacak.

Bu kısımda karmaşık gözükmeyen iki soruya yanıt vereceğim: Kaç sayı vardır ve sayılar nedir? Tahmin edebileceğiniz gibi yanıtlar sorulardan daha karmaşık olacak, zaten iyi sorularda da durum genelde böyle olur.

İlk bakışta sonsuz sayıda doğal sayı var, çünkü ilkesel olarak sonsuza dek sayabiliriz: 1 koyun, 2 koyun, ... Doğal sayıların “eleman sayısı” ya da “niceliği” sonsuz diyoruz. “Hilbert’in oteli” bu niceliğin hayali bir keşfidir ve karşımıza ileride daha ciddi şekilde çıkacak Alman matematikçi David Hilbert’e atfedilir. “Hilbert’in oteli” sonsuz sayıda odadan oluşur ve bir gece odaların hepsi doludur. Rezervasyonsuz bir yolcu gelir. “Sorun değil!” der Hilbert (müdür): Bütün müşterileri bir yandaki odaya geçmeye ikna eder, böylece ilk oda boşalır ve yeni gelene verilir. O gece daha geç bir saatte bu kez sonsuz sayıda, yine rezervasyonsuz yolcu gelir. “Sorun değil!” der yine yaratıcı insan Hilbert. Otel sakinlerinin *hepsini* eşyalarını toplayıp oda numarası şu an kaldıkları odanın iki katı olan odaya geçmeye ikna eder, böylece ilk odalar boşalır ve bütün yeni gelenler yerleşir.

Şu ana kadar işler yolunda gitti gibi görünüyor. Peki, rasyonel sayılar, bir doğal sayının bir başkasına bölünmesiyle elde edilen sayılar nasıl olacak: Rasyonel sayıların sayısı ne? “Görünen” yanıtı göre rasyonel sayılar doğal sayılardan daha çok olmalı,

Şekil 10.6 Rasyonel sayılar doğal sayılarla eşleştirilebilir, böylece sayılabilir olurlar. İlk sıranın üstündeki sayılar p/q oranında payda karşımıza çıkan, sol yandaki sayılar da paydada bulunan sayılardır. Kıvrılan diyagonal çizgide ilerleyerek rasyonel sayıların hepsini (tekrarlananlar dahil) sayabiliriz.

	1)	2)	3)	4)
1)	1	2	3	4
2)	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{3}{2}$	2
3)	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{4}{3}$
4)	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1
5)	$\frac{1}{5}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{4}{5}$

çünkü 0 ile 1 arasında feci sayıda rasyonel sayı var ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{53}{67}$ ve daha birçoğu), 1 ile 2 arasında yine feci sayıda (örneğin $\frac{3}{2}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{79}{47}$ vs) ve bu böyle devam ediyor. Ama eğlenceli ve de doğru olan yanıt şu: Doğal sayıların sayısı ile aynı sayıda rasyonel sayı var. Nicelikleri sonsuz ve doğal sayılarda olanla aynı sonsuzlukta.

Bunun böyle olduğunu görmek için bütün rasyonel sayıları çizdiğim (ama sadece çok küçük bir kısmını gösterdiğim) Şekil 10.6'ya bakalım. En üstteki sırada üreteceğimiz kesirlerin payında (üst tarafında) karşımıza çıkacak doğal sayılar, en soldaki aşağıya doğru uzanan sıradaysa kesirlerin paydasında (alt tarafında) karşımıza çıkacak doğal sayılar var. Tablo bir doğal sayının bir başkasına bölünmesiyle elde edilebilen olası bütün kesirleri kapsamaktadır. Çok sayıda tekrar olacaktır, her ikisi de $\frac{1}{2}$ 'ye eşit olan $\frac{3}{6}$ ve $\frac{4}{8}$ gibi, ama önemli değil. Şimdi çizimdeki gibi ilk girdiden başlayıp bütün girdilerin üzerinden geçen bir çizgi çizebiliriz. Çizgide ilerledikçe karşılaştığımız her kesir için 1, 2, .. şeklinde sayıyoruz. Bu şekilde bütün kesirler (bütün rasyonel sayılar) doğal sayılarla bire bir eşleşmeye oturuyorlar. Doğal sayılarımız hiç bitmiyor; dolayısıyla rasyonel sayıların sayısı, doğal sayılara oranla daha sağlam bir temel üzerinde olsalar bile, doğal sayıların sayısı ile aynı çıkıyor. 0 ile 1 arasında ve 1 ile 2 arasında sonsuz sayıda rasyonel sayı var, ama aynı sonsuzluk 0 ile 2 arasında da var! Kısacası sayma yaptığımız sayı aralığı ne olursa olsun, rasyonel sayıları her zaman sayabilir (bu yüzden onlara *sayılabilir* diyoruz) ve “sonsuzluk” yanıtını elde edebiliriz. Sonsuzluğun ele avuca sığmaz ve acayip kaygan bir kavram olduğunu görmeye başlamış olmalısınız.

Cebirsel sayılar da (cebirsel denklemlerin çözümleri olan sayılar) sayılabilir sayılardır. Her cebirsel denklemin x 'in kuvvetlerinin (x^3 gibi ifadeler) tamsayılarla çarpımından oluştuğuna ($4x^3 + 2x - 1$ gibi) dikkat ederseniz bunun çıkarımı konusunda bir ipucuna ulaşırsınız. Dolayısıyla denklemlerin çözümleri (cebirsel sayılar) ile denklemleri tanımlayan tamsayılar arasında bir bire bir örtüşme vardır. Bu örtüşmeyi aklınızda tutarsanız, çözümlerin (cebirsel sayıların) doğal sayılarla bire bir olarak örtüştürülebileceğini herhalde kabul edersiniz. Böylelikle cebirsel sayıların sayılabilir olduğu ve sonsuz olmalarına rağmen niceliklerinin doğal sayıların niceliğiyle aynı olduğu sonucuna varabiliriz.

Doğal sayıların oranları olarak ifade edilemeyen sayıların, irrasyonel sayıların sayısı kaçtır? Bunlar da sonsuz olsa gerek diye düşünüyorsunuz. Haklısınız. Fakat muhtemelen irrasyonel sayıların sonsuzluğunun doğal sayıların sonsuzluğundan daha büyük olduğunu bilmiyordunuz. Başka bir deyişle irrasyonel sayılar doğal sayılardan daha büyük bir niceliğe sahiptir: Sayıca daha fazla sonsuzdur. Bu garip özelliği ilk kez ortaya çıkaran akıllıca argümanı, St. Petersburg'ta Danimarkalı ve Rus anne babadan doğmuş fakat yaşamının büyük kısmını Almanya'da geçirmiş, genetik olarak da kozmopolit birey Georg Ferdinand Ludwig Phillip Cantor (1845-1918) oluşturdu. Yaşamı boyunca engellerle boğuştu, sonsuzluğu meselenin içerisine karıştırarak matematiğin sınırlarında dolaşarak çalışması da bunda önemli bir etkendi. Çalışmalarına yerleşik matematik düzeninin muhafazakâr kesimlerinden, özellikle de rasyonel sayılar dışında bütün sayı türlerine karşı önyargılı, etkili isim Leopold Kronecker'den (1823-1891) gelen muhalefetin basıncıyla Cantor ciddi zihinsel bozukluklar yaşadı ve giderek dine döndü, zira düşünmüş olduğu sonsuz nesneler kümesinin Tanrı'nın zihninde gerçekleşen varlıklar olduğunu ve kendisinin, Cantor'un Vaftizci Yahya'nın matematikteki karşılığı olarak bu gerçekleri açıklamak üzere seçilmiş olduğunu düşünmekteydi. Arada bir Shakespeare'in eserlerini gerçekte Bacon'ın yazdığı takıntısına da teslim olan Cantor giderek daha uzun süreler boyunca akıl hastanelerinde kaldı ve buralarda tıpkı matematiğin sınırlarını keşfederken yaptığı gibi ama elbette daha zayıf bir etki yaratarak, masonluk, teozofi ve gül-haçlılık civarlarında dolanarak dinin sınırlarını keşfetmeye

uğraştı. Bu bölüm ilerledikçe sizlerin de fark edeceği üzere sonsuzluğun derinliklerine dalındığında çıldırma biçiminde bir risk her zaman doğabiliyor.

Cantor 1874 yılında irrasyonel sayıların rasyonel sayılardan daha fazla olduğunu gösteren basit bir gerekçe keşfetti. Onun gerekçesini ve bu savın değişik biçimlerini başka bağlamlarda da göreceğiz, o yüzden biraz üzerinde durmakta fayda var. o ile 1 arasında yer alan rasgele seçilmiş sayılardan bir liste oluşturup bunları (sol sütunda) sırayla numaralandırarak başlıyoruz:

1	0.198 402 957 820 ...
2	0.438 291 057 381 ...
3	0.684 930 175 839 ...
4	0.782 948 261 859 ...
5	0.500 000 000 000 ...
6	0.483 913 562 785 ...
...	...

Şimdi de liste ne kadar uzun olursa olsun, isterse sonsuz uzunlukta olsun bu listeye girmeyen sayılar olduğunu gösteriyoruz. Bunu yapmak için ilk sayıdaki virgülden sonraki ilk basamağı seçerek yeni bir sayı oluşturuyoruz, ikinci sayıyı virgülden sonraki ikinci basamaktan seçiyoruz ve böyle devam ederek her seferinde *farklı* bir basamağı yazıyoruz: Örneğin koyu yazılmış sayıları değiştirdiğimizde yeni sayı 0,350 047 ... 'ye ulaşıyoruz. Bu sayının ilk listede olmadığı kesin, çünkü daha ilk sayıdan farklılaşıyor, ikinci sayıdan farklılaşıyor vs. Buradan reel sayıların (rasyonel ve irrasyonel sayılarla beraber) doğal sayıların sayısından daha fazla olduğu sonucu çıkıyor, çünkü liste ne kadar uzun olursa olsun her zaman o listede olmayan bir sayı oluşturabiliyoruz. Bu yüzden reel sayılar *sayılamaz* diyoruz.

Şimdi bu vargıya biraz daha yakından bakalım. Az önce *reel sayıların* (doğal sayılar artı rasyonel ve irrasyonel sayılar) sayı-

lamaz olduğunu gördük. Öte yandan doğal sayıların, rasyonel sayıların ve cebirsel sayıların, hepsinin sayılabilir olduğunu görmüştük. Bu sayılabilir olanların dışında kalan sayı türü aşkın sayılardır. Buradan çıkan sonuç *reel sayıları sayılamaz yapan sayıların hepsinin aşkın olduğudur* (π ve e gibi sayılar).

Vardığımız bu olağanüstü sonucun taşıdığı önemi biraz daha yakından inceleyelim. Bu, sayıların çok büyük bir çoğunluğunun (aslında sonsuz derecede büyük bir oranının) aşkın olduğu anlamına geliyor. Bu çok şaşırtıcıdır, çünkü aşkın sayılar “alıştığımız”, “olağan” sayılara oranla çok daha az bilinmektedir, hatta belki çoğunuz ismini bile yeni duyuyorsunuz. Aşkın sayıların tüm diğer sayı türlerinin toplamından aşırı derecede fazla sayıda olması gerçeği, bu bölümün başında yaptığım sayabiliyor olmamızın çok şaşırtıcı olduğu vurgusunun da temelini oluşturuyor: Doğal sayıların her birinin etrafı sonsuz sayıda aşkın sayıyla kuşatılmış ve bu doğal sayılar aslında reel sayılar içerisinde son derece seyrek bir dağılım gösteriyor. Yazar Edward Temple Bell bunu çok açık şekilde ifade ediyor:

*Cebirsel sayılar (ki doğal sayıları da kapsamaktadır) düzlem üzerine karanlık gökyüzündeki yıldızdan noktalar gibi dağılmıştır; koyu karanlık gök kubbeyse aşkın sayılardan oluşmaktadır.*⁹

Cantor doğal sayıların niceliğini (toplam sayısını) İbrani simgesi $\aleph_0$ (alef-sıfır) ile gösterdi, bu giderek artan bir *sonlu-ötesi sayılar* dizisinin $\aleph_0, \aleph_1, \aleph_2, \dots$ ilk sembolüydü.¹⁰ $\aleph_0$ 'ı sonsuzluğun en küçük biçimi, $\aleph_1$ 'i bir sonraki küçük biçimi vs şekilde düşünebiliriz. Cantor'un karşısına çıkan soru, doğal sayılardan daha büyük olduğunu gördüğümüz reel sayıların niceliğinin $\aleph_1$ 'e mi yoksa daha yüksek bir aşkın sayıya mı eşit olduğuydu. Ünlü *süreklilik hipotezine* göre reel sayıların niceliği (bir doğru üzerindeki noktaların sayısı) $\aleph_1$ 'e eşittir, $\aleph_0$ 'dan sonra gelen ilk sayma sayısına eşittir, örneğin $\aleph_5$ 'e ya da başka bir sayıya eşit değildir. Cantor'un süreklilik hipotezini sürekli ispatlamaya

9 E. T. Bell, *Men of mathematics*. İlk baskı yılı 1937.

10 Burada kullanımda kimi zaman değişiklikler gözlemlenmektedir: Kimileri ω (omega) bütün doğal sayılardan büyük olmak üzere sıra sayıları $\omega, \omega + 1, \dots$, için “sonlu-ötesi sayı” terimini kullanmaktadır.

çalışıp sonuç alamadan boşuna uğraştığı için delirdiği söylenir. 1963 yılına dek yaşamış olsaydı boşuna uğraşma nedenini anlar ya da en azından bu ona gösterilirdi, zira aynı yıl Amerikalı mantıkçı Paul Cohen (d. 1934) bu problemin sonucunun karar verilemez nitelikte olduğunu ispatladı: Süreklilik hipotezinin doğruluğunu ya da yanlışlığını ispatlamak imkânsızdır ve reel sayıların niceliği $\aleph_1, \aleph_2, \dots$ değerlerinden herhangi biri ve belki de hepsi birden olabilir.

Matematiğin bir başka şüphe ve kaygı doğuran özelliğine geldik: Goldbach sanısıyla (çift sayıların hepsinin iki asalın toplamı şeklinde ifade edilebilme özelliğiyle) yüzleştğinde olduğu gibi sonsuzlukla uğraştığında matematiğin pili bitiyor gibi görünüyor. Matematiğin söylendiği kadar iyi olup olmadığı zihnimizi kurcalayan bir soru oluyor: Fazla sıkıştırıldığında hükümlerliğini yitiriyor mu? Süreklilik hipotezi gibi karşısında afallayıp sustuğu başka sorular daha var mı? Aşırı sonlucuların doğal sayıların sonsuzluğa ulaşmadan önce söndüğünü düşünmeleri gibi, acaba matematiğin kendisi de bazı tartışma alanlarında sönümleniyor ya da bazılarında kör noktaya mı sahip oluyor?

Matematiğin güzel görünümlü giysilerinin aslında aşınarak lime lime olmuş olup olmadığına karar vermeden önce bizi cılgınlığın sınırına taşıyabilecek bile olsa Cantor'un ulaştığı sonuçlar hakkında söylememiz gereken bazı şeyler var. Birincisi reel sayıların sayılamazlığını iddia etmek herhangi bir uzunluktaki doğrunun üzerindeki noktaların sayısı bilmek olanaksız demektir. Fakat doğrunun uzunluğu ne olursa olsun onun aynı nokta sayısından, bu sayı ne olursa olsun, oluştuğundan emin olabiliriz. Bu nedenle bir milimetre uzunluğundaki bir doğruya yer alan nokta sayısı, buradan bir sonraki galaksiye dek uzanan bir doğrudaki noktaların sayısı aynıdır. Bir düzlemin içindeki noktalarda durum nedir? Zekice bir argümanla Cantor, düzlemin alanı ve doğrunun uzunluğundan bağımsız olarak, bir düzlemdeki her bir noktanın bir doğrudaki her bir noktaya bire bir eşleşmeye sokulabileceğini gösterebildi. Bu nedenle herhangi bir alana (bir posta pulu ya da Avustralya kadar) sahip bir düzlemdeki noktaların sayısı, herhangi bir uzunluktaki (bir nanometre ya da bir kilometre) bir doğrunun nokta sayısı ile aynıdır ve her

ikisi de reel sayıların sayısına eşittir. Aynısı istenen sayıda boyut içerisindeki hacimler için de geçerlidir: Bir küp içerisindeki nokta sayısı ya da istenen herhangi bir büyüklükteki on boyutlu bir hiperküp içerisindeki nokta sayısı, herhangi bir uzunluktaki bir doğrudaki noktaların sayısıdır. Bu nedenle, şaşırtıcı olsa da Dünya büyüklüğünde bir kürenin içerisindeki nokta sayısı 1 cm uzunluğundaki bir doğruya bulunan nokta sayısıdır. Matematiğin ilerleyişinin Hilbert'in ifadesiyle "Cantor'un cennetine" girmekte oluşuna Kronecker'in neden bu kadar üzüldüğünü ve eğer özel dikkat göstermezsek sonsuzluğun neden akli ve mantığı yutan hiç güvenilmez bir bataklık olduğunu görmeye başladığınızı umuyorum.

Çok sayıda olduklarını biliyoruz, gördüğümüzde onları tanıyabiliyoruz, ama bunlar aslında ne? Nedir sayılar? Yunanlar sayılar hakkında dar bir bakışa sahipti, belki de bu yüzden aritmetikten çok geometride iyidiler. Kullandıkları notasyon da işlerini zorlaştırıyordu: Temel geometri için mükemmel bir gösterim sistemine sahiptiler (düz bir yüzeye çizilen doğrular ve çemberler) ama rakamları kullanışsızdı. Üstelik 0 ve 1'i sayı olarak görmüyorlardı, çünkü "sayı" kavrayışından ziyade "çokluk" kavrayışına sahiptilerdi: Çokluk ne kadar büyükse sayı o kadar büyüktü. Hiçbir şey ve bir şey, her ikisi de çokluğa sahip değildi, bu yüzden sayı sayılmazlardı.

Modern sayı kavrayışı 19. yüzyılın sonlarında önce Cantor, ardından matematiksel bir titizlikle Frege ve Peano tarafından *küme kuramı* geliştirildikten sonra doğdu. İtalyan Giuseppe Peano (1858-1932) matematiğin Dr. Casaubon'uydu, çünkü *Midle-march*'taki dünyadaki bütün dinlerin tarihini yazmaya uğraşan Dr. Casaubon gibi o da orta yaşlarını 1892'den 1908'e dek matematiğin tüm dallarında bilinen bütün teoremleri *Formulario matematico* adlı eserinde toplamaya çalışmakla geçirdi. Gerçekçilikten hoş ve çarpıcı bir biçimde uzak Peano *Formulario*'nun ders verenler için paha biçilmez bir değer taşıyacağını düşünmüştü, kitabı sayesinde öğretmenler bundan böyle sözlü sunumun sıkıcılığından kurtularak yalnızca ilgili teoremin numarasını söyleyip geçebilecekti. Peano çalışmasının uluslararası bir kullanım

kazanması için “Latino sine flexione” adını verdiği, kendi geliştirdiği Latinceye dayalı ama Latince, Almanca, İngilizce ve Almanca sözcükler içeren ve gramerin can sıkıntılarından kurtulmuş yapma bir uluslararası dil oluşturdu. Diğer konularda nazik ve kibar olsa da gündelik yaşamın olağan akışında muhakemeden yoksun olan Peano en etkileyici yeteneklerinden biri olan çarpıcı biçimde mantıklı olabilme becerisinin dizginsiz kullanımı sonucunda arkadaşlarını kaybetme hünerine de sahipti. Savundukları savlar mükemmel bir özen sonucunda ortaya çıkmamışsa hünerini kullanarak potansiyel dostlarını biçiyordu, ama işte bu özelliğini matematiksel mantığın temellerinin formüle edilmesinde kullanmayı başardı. 1900 yılında karşılaştıklarında genç Bertrand Russell da ’nun savlarının sahip olduğu güç ve kesinlikten etkilendi ve matematiğin temellerini kendisi formüle ederken onun notasyonundan bazı örnekleri kullandı.

Peano belitlerini bu kez kutsal bir amaçla değil de, hoş deneyecek romantik bir amaçla Latince yayımlamış oldu. Aritmetiği şu temel dayanaklara oturttu:

1. *o bir sayıdır.*
2. *Bir sayının ardılı da bir sayıdır.*
3. *o hiçbir sayının ardılı değildir.*
4. *İki farklı sayı aynı ardıla sahip olamaz.*
5. *Eğer sıfıra ait bir özellik, bir sayıya da ait olduğunda o sayının ardılına da ait oluyorsa, o özellik tüm sayılara aittir.*

Son belit *matematiksel tümevarım* ilkesidir. Ardılı s ile gösterirsek, o halde 1 ’i so (o ’ın ardılı), 2 ’yi sso (o ’ın ardılına da o ’nın ardılı), 3 ’ü $ssso$ vs şeklinde gösterebiliriz. Bu yaklaşımdaki sorun elbette Peano’nun örneğin “ardıl”, hatta “sayı” gibi terimlerinden bazılarını tanımsız bırakmış olmasıdır; dolayısıyla bu sayıların *ne* olduğunu halen biliyor değiliz.

Bu noktada Friedrich Ludwig Gottlob Frege (1848–1925) büyük bir katkı yaptı; yaptığı katkı matematiği insan düşüncesinde kusursuz bir konuma yükseltiyor gibi görünüyordu ama aslında tam tersini yaptığı sonradan ortaya çıkacaktı. Frege kuru insan düşüncesinin simgesi olarak matematiği oluşturan mükemmel

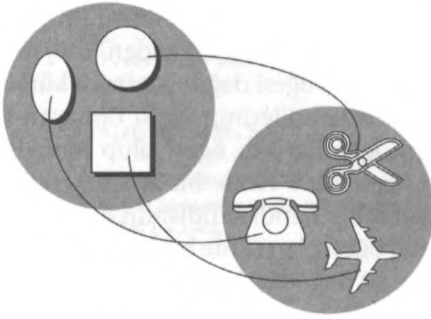
mantığa sahip bir şema kurduğu için matematiksel mantığın kurucusu olarak değerlendirildi. Hedefine ulaşmak için sayı kavramını tanımlaması gerekiyordu ve *Grundlagen der Arithmetik* (Aritmetiğin Temelleri, 1184) adlı eserinde bunun için küme kavramı üzerinden ilerledi. Küme basit ifadesiyle ayırt edilebilir nitelikteki nesnelerin derlenmesidir, {Tom, Dick, Harry} gibi. Kümeleri matematiğe sokan Cantor'du vesonraki on yıllarda kümelerin özellikleri, nasıl oluşturulacakları (Cantor'un açıklamayı başaramadığı bir husus) ve işlemlere nasıl tabî tutuldukları konusunda kesin ve net ifadelere ulaşan Ernst Zermelo (1871-1953) ve Adolf Fraenkel'in (1891-1965) çalışmalarıyla kuram geliştirildi. Modern küme kuramının yaygın kullanılan bir biçimine de *Zermelo-Fraenkel kuramı* denmektedir.

Frege sayıların belirli türde kümelere işaret eden isimler olduğu görüşünü ortaya attı. Tanımını kesinleştirmek amacıyla bir özelliğin *genişlemesi* kavramını ileri sürdü. "Genişleme" kavramını kafada canlandırmanın belki de en iyi yolu "genişletilmiş topluluk" sözcüğünden ilerlemektir. Dolayısıyla bir özelliğin "{Tom, Dick, Harry} kümesiyle aynı büyüklükte olmak" biçiminde genişlemesi, aynı büyüklüğe sahip kümelerin *hepsinden* oluşan bir kümedir. "Aynı büyüklükte olmak" küme kuramında iyi tanımlanmış bir ifadedir: Bize kümelerin öğelerinin bire bir eşleşmeye sokulabileceğini söyler. Örneğin {Tom, Dick, Harry} kümesi ile {makas, taş, kâğıt} kümesi aynı büyüklüktedir, çünkü Tom makasla, Dick taşla ve Harry kâğıtla eşleştirilebilir (Şekil 10.7). Küme kuramının kavramlarında fazla titiz davrandığı düşünülebilir: Ama matematiğin temel dayanağı olma iddiası taşıyorsa titiz olması da gerekir. "{Tom, Dick, Harry} kümesiyle aynı büyüklükte olmak" özelliğinin genişlemesi bu yüzden {Tom, Dick, Harry}, {makas, taş, kâğıt} vb kümelerden oluşan kümedir. Şimdi tekrar dünyaya dönelim ve bu genişlemeye, bu kümeye 3 diyelim.

Frege doğal sayıları şu genişlemelerle tanımlayarak devam etti:

o "kendileriyle özdeş olmayan şeylerden oluşan kümeyle aynı büyüklüğe sahip olma" özelliğinin genişlemesinin ismidir.

(Elbette kendisiyle özdeş olmayan hiçbir şey yoktur.)



Şekil 10.7 Eğer iki kümenin öğelerinin hepsi bire bir eşleştirilebiliyorsa, bir küme diğer bir kümeyle aynı büyüklüktedir. Bu iki küme aynı büyüklüğe sahiptir: Uçak olmasaydı, büyüklükleri farklı olurdu.

1 “o kümesiyle aynı büyüklüğe sahip olma” özelliğinin genişlemesinin ismidir.

2 “o ve 1 kümelerinden oluşan kümeyle aynı büyüklüğe sahip olma” özelliğinin genişlemesinin ismidir.

Benzer şekilde ilerler. Sayıların, birbirini izleyen daha küçük kümeler cinsinden tanımlanan kümelerin isimleri olarak tanımlanması yaklaşımında önemli bir yön, kaynağını mantıktan alan “özellik”, “eşitlik”, “değilleme” gibi terimlerin kullanılmasıdır. İşte bu yön Frege’yi matematiğin aslında mantıktan farksız olduğu görüşüne yönlendirdi.

Mantıktan farksızdı belki ama yine de başarılı değildi. 1902’de matematiğin bütün yapısını bu sayı tanımı üzerinden inşa ettiği başyapıtı *Grundgesetze der Arithmetik*’in (Aritmetiğin Temel Yasaları) ikinci cildini yayımcılarına göndermeden kısa bir süre önce Frege, Bertrand Russell’dan bir tutarsızlık olduğuna dikkat çeken o ünlü mektubu aldı. Russell’ın mektubunu açtığı anda Frege’nin yaşadığı korkunç anı kendi sözlerinden dinleyelim:

Bir bilim insanının" tam da çalışması bittiği anda kurduğu yapının çökmesi kadar korkunç bir şeyle karşılaşması nadir görülür. Eserim baskıya girmek üzereyken Bay Bertrand Russell’dan gelen mektup beni işte bu duruma soktu.

Bertrand Russell (1872–1970) “kendisinin ögesi olmama” özelliğinin genişlemesi probleminde dikkat çekmişti. Kendilerinin ögesi olmayan kavramlardan oluşan bir küme düşünelim. Örne-

11 Mantıkçı Frege’nin kendisini böyle gördüğü gözümüzden kaçmasın.

ğin “soyut fikirler”den oluşan bir küme kendi kendisinin ögesidir, çünkü kümenin kendisi soyut bir fikirdir, öte yandan “meyve”den oluşan bir küme kendi kendisinin ögesi değildir, çünkü küme bir meyve değildir. Russell kendi kendilerinin ögesi olmayan kavramların kümesinin kendi kendilerinin ögesi olup olmadığını sordu. Kendi kendisinin ögesiye, o halde bu kendi kendisinin ögesi olmayan türde bir kümedir. Kendi kendisinin ögesi değilse, o halde bu kendi kendisinin ögesi olan türde bir kümedir. Kısacası kendisine aitse kendisine ait değildir, ama kendisine ait değilse kendisine aittir. *Russell’in çelişkisi* (ya da çatışkısı, paradoksu) gündelik dil kullanılarak çeşitli şekillerde ifade edilmiştir, örnek olarak “Bu şehirdeki berber kendisini tıraş etmeyen herkesi tıraş eder: Kendisini tıraş eder mi?” sorusunu verebiliriz.

Russell paradoksu Frege’nin programını ve onunla beraber matematiğin temellerini baltadı. Bir çelişkinin yıpratıcı etki doğurmasının nedeni şudur: Eğer bir belit dizisi çelişkiyle sonuçlanıyorsa, o halde bu sistemdeki bütün önermelerin sistemin teoremleri olması bir mantık teoremidir.¹² Bu nedenle eğer Frege’nin tanımları çelişkiliyse, bu durumda bunlardan istenen her teorem, “ $1 = 2$ ” ve “ $\sqrt{2}$ bir rasyonel sayıdır” dahil, çıkarsanabilir. Dolayısıyla aritmetiğin temeli olma iddiası açısından belitleri faydasız, hatta ondan da kötü durumdaydı.

Russell da matematiğin temellerine Frege gibi derin bir ilgi duyuyordu ve onun mantığın bir dalı olduğunu ispatlamak onu da Frege kadar ilgilendiriyordu. Bu, matematik felsefesinde ‘un yaklaşımıdır. 1903 yılında Russell *The principles of mathematics* [Matematiğin İlkeleri] kitabını yayımladı, o sırada Cambridge’de meslektaş oldukları eski denetmeni Alfred North Whitehead (1861–1947) ise *A treatise on universal algebra* [Evrensel cebir üzerine bilimsel bir inceleme] kitabının ikinci baskısının hazır-

12 $p \supset (\sim p \supset q)$ teoremiyle başlayalım, buradaki $\sim$ “değil” anlamına gelir, $\supset$ “eğer ... o halde” diye okunmalıdır, p ve q da önermelerdir. p ve $\sim p$ önermelerinin her ikisinin de belitlerden çıkarsanabilir olduğunu varsayalım. p geçerli olduğu için “çıkartım kuralı” sayesinde sadeleştirdiğimizde teoremden $\sim p \supset q$ sonucuna varırız. Ardından yine çıkartım kuralı gereği $\sim p$ geçerli olduğu için onu da sadeleştiririz ve q kalır. Bu önerme her ne olursa olsun q geçerlidir demektir.

o64-12. $\vdash x, \beta \in 1. \supset x \wedge \beta = \Lambda. \equiv. x \vee \beta \in 2$

Dem.

$\vdash. \text{o64-26}. \supset \vdash x = x'. \beta = y'. \supset x \vee \beta \in 2. \equiv. x + y.$

[o61-231] $\equiv. x' \wedge y' = \Lambda.$

[o13-12] $\equiv. x \wedge \beta = \Lambda$ (1)

$\vdash. (1). \text{o11-11-35}. \supset$

$\vdash. (x \wedge y). x = x'. \beta = y'. \supset x \vee \beta \in 2. \equiv. x \wedge \beta = \Lambda$ (2)

$\vdash. (2). \text{o11-64}. \text{o62-1}. \supset \vdash. \text{Prop}$

From this proposition it will follow, when arithmetical addition has been defined, that $1 + 1 = 2$.

ve daha ileride

o110-642. $\vdash. 1 + 1 = 2$

Dem.

$\vdash. \text{o110-633}. \text{o101-21-22}. \supset$

$\vdash. 1 + 1 = \{[(xy). y \in \xi. \xi = x'y \in 1]\}$

[o642] $= 2. \supset \vdash. \text{Prop}$

The above proposition is occasionally useful. It is used at least three times, in o113-66 and o130-123-472.

o110-7-71 are required for proving o110-72, and o110-72 is used in o117-8, which is a fundamental proposition in the theory of greater and less.

Şekil 10.8 *Principia mathematica*'da yer alan $1 + 1 = 2$ ispatının tıpkıbasımı

lıklarını yürütüyordu. İki adam daha büyük bir tutkuyla bağlandıkları bir projede, matematiğin bütününün aslında mantığın bir alt kümesinden ibaret olduğunu ispatlamak için işbirliği yapma kararı aldı. Hazırlanması on yıl süren eser nihayet 1910, 1912 ve 1913 yıllarında üç cilt olarak *Principia mathematica* adıyla basıldı. Hedeflenen geometri üzerine dördüncü ciltse yayımlanmadı. *Principia* Peano'dan da, Frege'den de daha güçlü, son derece sembolik bir gösterim sistemine sahipti; bir fikir vermesi için Russell ve Whitehead'in $1 + 1 = 2$ 'ye ilişkin ispatları Şekil 10.8'de gösterilmektedir.

Russell ve Whitehead'in Frege'yi yutan tutarsızlık batağının hakkından gelmesi gerekiyordu. Bu amaçla Russell *tipler kuramını* geliştirdi; kümelerin öğelerine bir "tip" atfediliyor ve kümelerin hepsi sadece kendilerinden daha düşük tipte öğeler içerebiliyordu. Buna göre tekil varlıklar o tipiydi, bu tekil varlıkların kümeleri hakkındaki önermeler 1 tipiydi vb. Bir küme sadece kendisinden daha düşük tipte kümeleri içerebildiği için asla kendi kendisinin öğesi olamıyordu, dolayısıyla Russell'in çatışkısın-

dan kaçınılıyordu. Fakat tipler kuramı yine de bazı paradoksları ortadan kaldırmaya yetmiyordu, bu noktada “Berry paradoksu” olarak adlandırılan ve “on bir sözcükten daha az sözcükle tanımlanamayan en küçük tamsayı” şeklindeki 10 sözcükten oluşan önerme örneği verilebilir. Bu koşulu karşılayan tamsayı aslında 10 sözcüklü önermeyle tanımlanır, dolayısıyla önerme çelişkilidir. Russell bu batağa düşme tehlikesinden kaçınmak için de *dallanmış tipler kuramı* adını verdiği tipler kuramının yeni bir versiyonunu uydurmak durumunda kaldı. Dallanmış kuramda sadece ilgilenilen varlığın tipine değil, aynı zamanda tanımlanma tarzına da dikkat ediliyordu. *Principia mathematica* dallanmış kurama dayalıdır.

Dallanmış tipler kuramının özel savunmalardan oluşan bir yamalı bohça olduğu izlenimini, sanıyorum verebildik. Aslında daha da kötüsüdür, çünkü kuram kullanılarak her doğal sayının bir ardılı olduğunun ya da doğal sayıların sonsuz olduğunun ispatlanmasının mümkün olmadığı açığa çıkmıştır. Bu zayıflıkların giderilmesi için yamalı bohçaya sonsuzluğun varlığını savlayan *sonsuzluk beliti* eklenmek zorunda kaldı. Yamalı bohça daha da şişecekti, zira sayıları doğru şekilde tanımlamak için farklı mertebedeki önermelerle ilgili olarak *indirgenme beliti* de bohçaya eklenecekti. Mantıkçı yaklaşım her nedense dikiş tutmuyor ve matematiğin mantığının sadece bir dalı olmadığı açığa çıkıyordu.

Açığa çıkan bir başka şey de, bizlere matematiğin temeli olarak sunulan küme kuramında problemler olduğuydu. Belki de sorun onca masum görünümüne karşın kümelere içkin bir nedenden kaynaklanıyordu. Belki de küme matematik için fazla geniş kavramdı. Bu görüşü destekleyen *seçim beliti* 20. yüzyılın başında, tam da Frege ve Russell kendi problemleriyle boğuştuğu sırada karşımıza çıktı. Bu belit Eukleides’in geometrik (paralel doğrular hakkındaki, bkz. 9. Bölüm) beşinci postülasının mantık alanındaki karşılığıydı ve çok büyük ilgi gördü. En basit halinde kuzu gibi masum görünür: Elinizde bir kümeler dizisi varsa, o halde her kümeden bir öge seçerek başka bir küme oluşturabilir ve bunu alışveriş sepetinize ekleyebilirsiniz. Hepimiz süpermarketlerde kümeleri bu biçimde oluştururuz, oluşturduğumuz kü-

meye de “alışveriş” deriz. Küme oluşturmada uygulanan bu tür bir işleme kim karşı çıkabilir?

Sonsuz kümeleri düşündüğümüzde, kuzu hemen postundan kurtulur ve aslında kurt olduğu açığa çıkar, çünkü seçimi belirtmenin belki de hiç yolu yoktur. Sonlu sayıda kümede seçtiğimiz öğeleri listeleyebiliriz; bir alışveriş listesi hazırlarız. Bir de şu problemi düşünün. Elimizde sonsuz sayıda küme var, biri 0 ile 1 arasındaki reel sayılardan oluşuyor, sonraki 1 ile 2 arasındaki reel sayılardan oluşuyor ve bu böyle devam ediyor. Bu kümelerin her birinden rasgele bir sayı seçerek yeni bir küme oluşturmaya karar veriyoruz. Ne yazık ki seçimlerimizi listeleyemiyoruz, çünkü sonsuz sayıdalar ve bir kuralla da belirtmiyoruz, çünkü rasgele seçilmişler. Demek ki belirtmediğimiz bir küme oluşturduk. Russell'ın seçim belitinin taşıdığı zorluğa ilişkin verdiği daha sade örnek, oda hizmetçisine her çiftten bir çorap seçme emri veren sonsuz sayıda çorap çiftine sahip zengin bir adamdır. Oda hizmetçisi ne yapacağını bilemez, çünkü her çiftten hangi çorabı seçeceğine karar vermesinin hiçbir yolu yoktur.

Seçim belitine dönük üç yaklaşım vardır ve matematikçiler bilinçli ya da bilinçsiz olarak bunlardan birini seçer. Matematğin deveküşları tarafından benimsenen yaklaşım, seçim belitinin sunduğu problemi göz ardı etmek ve yaptıkları işi tıpış tıpış sürdürmektir. Çoğu zaten bir problem olduğunun bile farkına varmayan fen bilimcilerin yaklaşımı budur, açıklama yapılarak probleme dikkatleri çekildiğinde de ilgisizce omuz silkip geçerler. Bir de matematiğin sosyal görevlileri vardır, bunlar problemin farkındadırlar ve mantık ispatlarında seçim belitini sadece son çare olarak kullanırlar. Argümanlarının dolambaçlı hale gelmesi pahasına belitleri ile çıkarımları arasında çaresizce alternatif rotalar bulmaya çalışırlar. Son olarak matematiğin azizleri vardır, konu seçim beliti olduğunda dinsel inançları nedeniyle hakikaten ilişkiden kaçınırlar, seçim belitinin on metre yakınına yaklaşmaz ve ona dayalı ispatları geçersiz olarak değerlendirirler.

Eğer matematik bu başarısızlıkların işaret ettiği gibi sadece mantığın bir alt dalı değilse, hangi ek bileşenlere sahiptir? Olası bir ek bileşeni ortaya çıkarmak için bir eyercinin oğlu ve 18. yüzyılın en zor anlaşılan ama en önemli felsefecisi, muhtemelen dörtte bir oranında İskoç İmmanuel Kant'a¹³ (1724-1804) dönümlü. *Kritik der reinen Vernunft*'ta (*Saf Akılın Eleştirisi*, 1781) deneyimin sınırlarını aşan felsefi bilgi anlamına gelen metafizik bilgi üzerine yazarken Kant "sentetik" ve "analitik" önermeler arasında bir ayrım öne sürdü. *Analitik önerme* yüklemnin öznenin salt akıl yürütmeyle açığa kavuşturabildiği ve yeni bir bilgi aktarmayan önermedir; örneğin "bütün havuçlar sebzedir". Bu kavramı benimseyip açıklayan 20. yüzyılın başındaki mantıksal pozitivistlere göre analitik bir önermenin doğruluğu sadece onu oluşturan sözcüklerin anlamına ve dizilişlerini belirleyen sözdizim kurallarına bağlıdır. *Sentetik önerme* ise yüklemnin öznenin içerisinde içerilmediği önermedir, "bir gül kırmızıdır" önermesindeki gibi, çünkü bütün güller kırmızı değildir; bu tür önermeler yeni bilgi iletmektedir. Bu kategoriler ayrıca doğruluğun değerlendirilmesi deneyimin sağladığı kanıttan bağımsız olduğunda *a priori* (önsel) şeklinde, ifadenin geçerliliği deneyime bağlı olduğundaysa *a posteriori* (sonsal) şeklinde ikiye ayrılmaktadır.

Kant, yeni bilgi ifade eden ama deneyimden bağımsız olan sentetik *a priori* önermelerin felsefi araştırmaya uygun olan araçlar olduğunu önerdi. Bu tür ifadeler onun görüşüne göre sorgulamaz olan uzay ve zaman hakkındaki önermeleri kapsıyordu ve bunların algılanması bir şekilde beynimizin içerisinde oluşuyordu. Kant'a göre Öklit geometrisinin prensipleri ve doğal sayıların özellikleri sentetik *a priori*'ydi. Kant'ın görüşüne göre matematik teoremleri, bir biçimde bizlerin nöral ağlarını (kendisi bu terimi kullanmazdı elbette) ve algı araçlarını dışa vuran, uzay ve zaman özelliklerinin açıklamalarıydı.

Doğal sayılarda evrenin doğrudan, bariz, sentetik, *a priori* özellikleri olan için bir şeylerin olduğu hissinin matematik felsefesine *sezgicilik* denen biçimiyle taşınması ilk kez 1907 yı-

13 Kant, Doğu Prusya'daki Königsberg'in kenar mahallelerinden biri olan, önemli bir İskoç göçmen nüfusuna sahip Scotya'da doğdu; büyükbabasının İskoç olduğu sanılıyor. Zihni çok uzaklarda gezinmiş olsa da fiziksel olarak Königsberg'ten hiç ayrılmadı.

İlinda, topolojinin kurucularından Hollandalı matematikçi Luitzen Egbertus Jan Brouwer (1881–1966) tarafından Amsterdam Üniversitesine verilen doktora tezinde karşımıza çıktı. Brouwer, zaten aslında Eukleides’in beşinci postülasının diğer dört postülayla tutarlı olmasına rağmen (9. Bölümde gördüğümüz gibi) çelişki olmadan diğerlerine yerini bırakabileceğinin farkına varılmasıyla boşa çıkmış olan Kant’ın geometrinin sentetik *a priori* olduğu görüşünü bir kenara bıraktı. Yani Brouwer, Kant’ın Öklit geometrisinin doğru olma şartını varsaymakla hata yaptığını kabul etti, çünkü deneyime göre uzay ve zamanın daha iyi betimlemelerini veren alternatif geometriler vardı. Fakat Kant’ın matematiğin uzay ve zamanın araştırılması olduğu görüşünün hepsini tümünden reddetmedi, sadece uzayla ilgili kısmını reddetti. Brouwer matematiğin bizim zaman bilincimizin bir ifadesi olduğunu düşündü ve doğal sayıların bizim sırayla varlıkların toplamını taramamızdan doğduğunu ve her birini ayırt etmemizi sağlayanın da algımızdaki zamansal bölünmeden kaynaklandığı görüşünü savundu. Hatta daha da ileri gitti: Var olan her şeyin, başka zihinler de dahil her şeyin köken itibarıyla tek bir bilinçli zihinden geldiğini düşünen bir tekbenliydi (solipsist). Fakat bu görüş sezgici yaklaşımın aktarılması açısından gereksiz bir karmaşa doğurur ve ilk bakışta bu yönü açmaya gerek yok gibi görünüyor (fakat daha sonra bunun bir versiyonunun olumlu şekilde değineceğim).

Sezgiciler doğal sayıların özel bir statüye sahip olduğunu ve bizlerin onları doğrudan sezebildiğimizi savunur: Bunlar başka betimlemelerle ayrıntılandırılabilen varlıklar değildir. Brouwer’a göre bir doğal sayı kavramına ulaşmak için yaptığımız şeydu: Onları tarayışımızın zamansal sıralanışından doğan varlıklar arasındaki ayrım algımızı bizler de fark ediyorduk, algımız bunlardan birinin üzerinden geçtiğinde de hemen o rakama işaret ediyordu. Bu görüş, doğal sayıların bizim zihinsel faaliyetimizin bir dışavurumu olduğunu ima eder. Benzer biçimde toplama gibi aritmetik işlemler de kafamızın içerisinde gerçekleşen zihinsel süreçlerin göstergeleri olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle $2 + 3 = 1 + 4$ olduğunu doğrulamak için bir dizi görevi yerine getirmemiz gerekir: 2’ye 3 eklemenin doğurduğu sonucu değerlendirmemiz, benzer biçimde $1 + 4$ ’ü değerlendirmemiz ve

ardından iki sonucun birbirine eşit olduğunu sorgulamamız ve doğrulamamız gerekir.

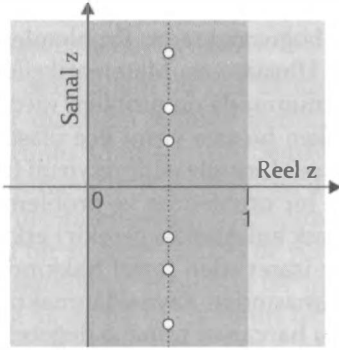
Sezgiciliğin bu kısa aktarımında hemen görünmeyen ama klasik mantığın kalbine indirdiği için not edilmesi gereken bazı sorunlu sonuçları var. Sonsuz sayıda varlıkla ilgili ifadeler ele alınırken özellikle sorunlar doğuyor, çünkü sonsuzun doğrudan deneyimine sahip olmadığımız için onların algılanışıyla bağlantılı bir zihinsel faaliyet de yok. Örneğin Aristoteles *üçüncü halin olanaksızlığı* yasasında bir mantık dayanağı olarak bir önermenin ya doğru ya da yanlış olduğunu belirtmişti. Bu yasa sezgici matematikte doğru kabul edilmez, çünkü ispatlanmamış ya da karar verilemez olan bir önermenin var olması mümkündür. Her iki durumda da ispatlanana dek, elbette o da ispatlanırsa, bir önermenin ya doğru ya da yanlış olduğu kabul edilmez. Alınan bu pozisyonun sonuçlarından biri, bir önermenin yanlış olduğunun doğru olmamasını söylemenin, önermenin doğru olduğunu söylemeye eşdeğer olmamasıdır.¹⁴ Sonsuz sayıda top içeren bir kutuda kırmızı olmayan bir top olduğu doğru değil demenin kutudaki bütün topların kırmızı olduğunu söylemekle aynı şey olduğunu bizler kanıtlasak da, bir sezgici bu vargıyı reddedecektir. Sezgiciye göre kutuda kırmızı olmayan bir top olduğu önermesinin doğruluğu yalnızca kutudaki bütün toplar üzerinden tek tek geçilerek doğrulanabilir ve bu sonsuz bir toplulukta olanaksızdır. Bu görüşü savunmanın bir diğer sonucu da, bir önermenin değilmesinin yanlış olduğunu ya da çelişkiye sebep olacağını göstermek için bir *reductio ad absurdum* (olmayana ergi) argümanı benimsenerek belirli bir önermenin yanlışlığını kanıtlamanın mümkün olmamasıdır. Sezgiciye göre kabul edilebilir nitelikteki önermeler sadece sonlu sayıda adımda açık şekilde oluşturulmuş kanıtlara sahip olanlardır.

Gayet iyi dans eden çapkın biri olan David Hilbert (1862–1943) 20. yüzyılın en etkili matematikçilerinden biriydi. O da Kant gibi Doğu Prusya'da Königsberg'de doğdu (ne tesadüftür ki Goldbach da burada doğmuştur). Yirminci yüzyılın başında, yeni yüzyılın şafağında matematiğin en önemli problemlerine işaret etme-

14 Yani $\sim(\sim p)$ p'yle eşdeğer değildir.

siyle ün kazanmıştır ki o günden bu yana birçok matematikçi onun tespit ettiği bu problemlerle boğuşmaktadır. Problemleri ilk kez 1900 yılında Paris'teki İkinci Uluslararası Matematikçiler Kongresinde kamuoyuna sundu. Sunumunda on problem vardı; Hilbert sunumunu basıma hazırlarken bu sayı yirmi üçe ulaştı. Problemlerinin (ki bunların tam olarak formüle edilmiş yirmi üç sınav sorusu şeklinde değil, bileşik bir problemler ve problemlere yapılan göndermeler grubu olarak anlaşılması gerekir) etkisi, bunların aslında iyi bir probleme işaret eden şeyler hakkında toplam bir inceleme oluşturmuş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden Hilbert'in anlaşılması harcanan zamana değecek, zor ama çözülemez olmayan ve çözüldüğünde dayandıkları zeminden daha geniş bir menzili aydınlatacak problemlere gereksinimi vardı.

Bu problemlerden bazıları çözülmüştür, bazılarının çözülemez olduğu gösterilmiştir, bazılarıyla halen boğuşulmaktadır. Hilbert'in kurduğu problemlerden bazıları o kadar görkemli ki diğerleri gibi kesin bir sonuca ulaşıp ulaşılamayacağı bile açık değil. Örneğin görkemli problemlerinden biri, fiziğin belitleştirilmesinin başarılması, onu Eukleides'in geometride yaptığı kadar kısa, özlü ve güvenilir bir temele oturtmaktı ve Hilbert bunu *Grundlagen der Geometrie* (Geometrinin Temelleri, 1899) kitabıyla başardı. Kafasında "her şeyin kuramı"nın formüle edilmesi hedefi olduğu söylenebilir. Yine de problemlerin çoğu özellikle de zaman ayrılarak yorumlandığında oldukça kesindir. Örneğin bunların arasında Cantor'un süreklilik hipotezinin kanıtlanması (sonradan kanıtlamaz olduğu ortaya çıktı) ve hepsinin reel kısmında $\frac{1}{2}$ 'ye eşit olduğu z karmaşık sayısının belli bir fonksiyonunun z 'nin sonsuz sayıda değeri için sıfıra eşit olduğu *Riemann hipotezi* de vardır (Şekil 10.9). Bu son problem konu dışı gibi görünebilir ama aslında asal sayı çalışmaları açısından çok büyük önem taşır; henüz çözülmemiştir ve matematiğin en önemli çözülmemiş problemlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Daha sonra Hilbert'in başka iki problemini daha ele alacağız. Onun Gödel tarafından ele alınan ve negatif yoldan çözülen ikinci problemi, matematiğin belitlerinin çelişkili olmadığının kanıtlanmasıydı. *Entscheidungsproblem* (karar verme problemi) denen ve bu kez Alan Turing ve Alonzo Church tara-



Şekil 10.9 z bir karmaşık sayı olmak üzere, $1 + \frac{1}{2^z} + \frac{1}{3^z} + \frac{1}{4^z} + \dots = 0$ denkleminin bütün çözümlerinin 0 ile 1 arasındaki açık renk şerit üzerinde yer aldığı bilinmektedir. Riemann hipotezinin bir formu bu denklemin bütün çözümlerinin aslında z 'nin reel kısmı her durumda $\frac{1}{2}$ 'ye eşit olacak şekilde şeridin orta hat-tında yer aldığını söyler.

findan ele alınarak yine negatif yoldan çözülen onuncu problemi, bir denklemin çözülebilir olup olmadığının sonlu sayıda adımla saptanabileceği bir işlemin oluşturulmasıydı.

Hilbert ayrıca *formalizm* adı verilen bir matematik felsefesi geliştirdi. Matematiği birbirine yapışık iki tabaka olarak görüyordu: Tabakalardan biri bazı kuralların uygulanmasıyla ulaşılan sonlu sayıda sembol düzenlemesinden oluşur. Bu semboller kâğıt üzerinde belirli desenler oluşturur ve anlamdan tamamen yoksundur. Bu anlamsız desenler bizim matematik derken anlatmak istediğimiz şeyi oluşturur. Sistemin belitleri bile anlamdan arınmış işaret dizileri, entelektüel cesetlerdir ve yeni desenler de soyut kuralların uygulanmasıyla bu dizilerden elde edilir. Bu anlamıyla bakıldığında, matematikçilerin hepsi duvar kâğıdı tasarımcısıdır. Hilbert'e göre güvenilir kanıtlar sadece *sonlu* sembol toplulukları olmaları anlamında *sonlucu* olanlardır, çünkü sadece bu topluluklar gözden geçirilebilir ve doğrulanabilir: Güvenli matematik sonlu matematiktir. İkinci tabakada gerçek matematik üzerine yorumdan oluşan *metamatematik* yer alır. Metamatematik, "bu semboller dizisi bir başkasını andırıyor", " x 'in bir varlık için özel bir işaret olarak yorumlanması gerekir", "belli bir işaret grubu bir desenin tamamlanmış olduğunun göstergesidir" ve "bu, şu önermenin bir ispatıdır" gibi yorumları içerir. Matematiğin kendisini bir satranç tahtasındaki taşların olası örüntüleri olarak, buna karşılık metamatematiğiye "beyaz için olası yirmi açılış var" ya da "bu pozisyon şah-mat'tır" gibi yorumlar olarak düşünebiliriz. Formalistlere göre matematik soyut sembolizm ve

örüntü yaratımıdır: Metamatematik insanlar için önem taşıyan semboller ve örüntüleri sağlar, işaretlere “anlam” aşılar, cesetlere yeniden kan verir.

Matematiğin doğası hakkında *Platoncu gerçekçilik* denen bir başka düşünce okulu daha var. Bu okula kayıt yaptıran matematikçiler, matematiğin anlamsız sembol dizileri yaratımı olduğu şeklindeki formalist görüşü reddederler. Matematiğin zihnin bir projeksiyonu olduğu, kanıt sağlanana dek varoluşun anlamsız olduğu ve bilinç olmadığında sayıların da, paralel çizgiler gibi şeylerin de olmayacağı şeklindeki sezgicilerin ısrarına da sırt çevirirler. Formalistler ve sezgiciler gibi onlar da matematiğin mantığının bir dalından ibaret olduğunu savunan mantıkçıların görüşünün eksikliğini kabul eder ve matematikte mantıktan daha fazla bir şeyler olduğu konusunda onlarla aynı fikirdedirler.

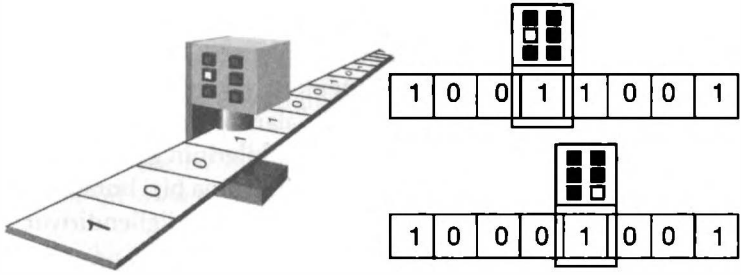
Matematikçilerin kısa ifadesiyle bir *platoncu*, kayıp bileşenin gerçeklik olduğunu düşünür. Platoncu matematikçiler önceden var olan bağıntıların yontucusu gibidirler, dünyaya ilişkin entelektüel düşüncelerini alet olarak kullanıp yontma işlerini yaparlar. Gerçeği keşfeden insanlardır, icat eden değil. Onlara göre sayılar gerçek varlıklardır ve sayılar arasındaki bağıntılar bir şeylerin ifadesidir. Onlara göre düz çizgiler, üçgenler, küreler kayalar, taşlar kadar gerçektir ve aritmetik doğrular (ki hatırlayın matematik doğruluğun bir türü, hatta belki de daha fazlası anlamına gelir) bir tür edimsellik hakkında yapılmış yorumlardır. Bu nedenle formalizmin steril uzaklığını ve sezgiciliğin öznel bağlanışını reddeder ve kendilerini diğer bilimcilerden farksız birer bilim insanı olarak görürler. Zamansız gerçekleri kazarak ortaya çıkartırlar ve sezgici duruşa karşı ateşli muhalif bir duruşla henüz kanıtlar formüle edilememiş olsa da bir yerlerde gerçeğin, hakikatin var olduğunu ve beklediğini düşünürler.

Şimdi Hilbert’in matematik felsefesinin tam kalbini hedef alan en önemli iki problemini ele alarak bunların gücünü olabildiğince doğrudan test edeceğiz. Daha önce de bahsettiğim gibi bu problemlerden biri *Entscheidungsproblem* denen sembolik bir

dildeki bir önermenin o dilin belitleri kullanılarak kanıtlanabilir olup olmadığını belirlemenin sistematik bir yolunun bulunması problemidir. Bu probleme dönük eşzamanlı denebilecek iki ayrı girişim oldu, bunlardan biri Amerikalı mantıkçı Alonzo Church'ün (1903–1995) λ -kalkülüs dediği icadını kullanarak yaptığı girişim, diğeri de İngiliz matematikçi Alan Mathison Turing'in (1912–1954) bugün *Turing makinesi* olarak tanınan “mantıksal hesaplama makinesi” icadıyla yaptığı girişimdi. İki yaklaşım görünüşte şaşırtıcı biçimde farklıydı ama Church ve Turing bunların aslında matematiksel olarak eşdeğer olduğunu göstermek için işbirliği yaptı. Matematikğin sahip olduğu olağanüstü kudretin bir göstergesi de, onun her yönden bambaşka görünen şeylerin eşdeğerliğini gösterme becerisidir. Modern bilgisayar dünyamızdan kulağımıza daha yakın geldiği için biz Turing'in yaklaşımına odaklanacağız ama Church'ün λ -kalkülüsünün de kullandıkları yazılımın temelini oluşturduğunu ve bu açıdan bugünle çeşitli benzerlikler taşıdığını da belirtmeliyiz.

Bir Turing makinesi, her türden *algoritmik hesaplamayı*, bugün dijital bilgisayarlarda gördüklerimize örnek oluşturacak şekilde sıralı bir dizi kuralı uygulayarak gerçekleşen bir hesaplamayı yapan bir insanın eylemlerini taklit eden bir cihazdır. Aslına bakılırsa Turing'in II. Dünya Savaşı sırasında Londra'nın kuzeyindeki Bletchley Park'ta, ardından Manchester'da yaptığı şifre kırma çalışması, programlanabilir dijital elektronik bilgisayarın ilk kez hayata geçirilmesidir. Şifre kırmadaki başarısı ve bu yolla binlerce insanın yaşamını kurtarmış olması sayesinde savaşın daha kısa sürede, yıllarca önce olmasa da, en azından birkaç ay önce bitmesini de aslında Turing'e borçluyuz. O dönemki toplumsal adet ve yasaların (Turing homoseksüeldi) onun erken ölümüne sebep olmuş olmasıysa yirminci yüzyıl ortasındaki İngiltere'nin utancıdır.

Turing hesaplama yapan bir insanın nasıl ilerlediğinin özünü anlamaya çalıştı, ardından da işlemin sınırlılıklarını araştırdı: Kişinin üzerinde ne kadar uzun çalışırsa çalışsın bir yanıtı ulaşamayacağı sorular sorulabilir miydi? Turing'in yaptığı işlem kare hücrelere bölünmüş belirsiz uzunlukta kâğıt şeritlerden oluşan (kullanabileceği sonsuz kâğıt ve kalem kaynağına sahip olma,



Şekil 10.10 Bir Turing makinesi örneği. Makine, sembollerin (tipik olarak 0 ve 1) yazılabildiği hücrelere bölünmüş sonsuz bir kâğıt şeritten ve sembolü okuyabilen, o noktada bulunduğu iç durum uyarınca okuma eylemini yapabilen, gerekirse sembolü değiştirebilen ve yanındaki hücrelerden gerekli tarafa gidebilen bir makineden oluşmaktadır. Bu örnekte iç durum okuyucu başlığın kenarındaki ışıklarla gösterilmiştir. Alttaki çizim olası bir yanıtı göstermektedir: Makine ışıkla gösterilen iç durumdadır ve 1 okur; bunun sonucunda 1'i 0'la değiştirir, iç durumunu değiştirir ve bir adım sağa kayar.

hesaplamanın yapılması, ara yanıtların not edilmesi ve sonunda nihai yanıtın kâğıda dökülmesini sağlama açısından bir insan hesaplayıcının gerisine düşmeyen) ve hücrenin içine yazılan, o anda incelenmesi istenen şeye uygun şekilde yanıt vermek üzere programlanabilen bir okuma ve yazma bölümüne sahip bir başlıkta gerçekleşiyordu (Şekil 10.10). Bu kurallarda gözden geçirmeler yapılması ve bunların kâğıt şeritten okuyucu kısmına iletilmesi de ayrıca mümkündü.

Kâğıttaki hücrelerin iç durumuna bağlı olarak ya bir 0 ya da bir 1 olabileceğini, okuyucunun hücrenin içeriğini okuyabildiğini, hücreye yazabildiğini ve bir hücre sağa ya da sola kayabildiğini varsayıyoruz. Belirlenen Turing makinesi şeritte bulduklarına ve başlığının nasıl yanıt verecek şekilde yapılmış olduğuna bağlı olarak bir dizi eylem gerçekleştirecektir. Örneğin bir "1" durumundayken şeritte bir 1 bulursa, şeridin 1'ini 0 olarak değiştirebilir, kendi iç durumunu "2" durumuna değiştirebilir ve bir adım sağa

ilerleyebilir. Hücrede bir o olabilir. Başlık “2” durumundaysa ve bir o okursa, bir sıra sola hareket edecek şekilde programlanmış-
tır, ama bir ı okursa, o zaman ı’ı o’la değiştirecek ve bir sıra sağa hareket edecektir. Başlığın verdiği tepkiler dikkatli şekilde tasarlanırsa, makine en karmaşık hesaplamaları bile gerçekleştirmek için kullanılabilir. Başlığın tasarımı ve tepkilerinin gerçekleştirilmesi çok zor ve hesaplama çok yavaş olabilir ama bizi burada makinenin verimliliği değil, sadece hesaplama ilkesi ilgilendiriyor.¹⁵

Her Turing makinesinde belirli bir işlemin yer alması için okuyucu başlığın ve şeritin belirli bir şekilde düzenlemesi yapılır. Mümkün olan bütün Turing makinelerini numaralandırdığımızı varsayalım, böylece elimizde bir depo dolusu t_1 , t_2 , vs şeklinde etiketlenmiş kutu var. Bu makinelerden birisine belirli bir sayı verilip makine durduğunda bu belirli sayıyı çıktı olarak alacağız. Örneğin makine t_{10} ’a 3 sayısı verilirse, hesaplamanın sonunda makine bize çıktı olarak 42 sayısını veriyor diyelim. Bu çıktıyı özetlemek için $t_{10}(3) = 42$ yazıyoruz. Makine ve veri yönünden bazı kombinasyonlarda hesaplamanın asla sonlanmadığı durumlar olabilir, örneğin t_{22} makinesine 17 sayısı verildiğinde böyle olsun. Bu çıktıyı ya da bu çıktının yokluğunu özetlemek için de $t_{22}(17) = \square$ yazalım. Turing problemi, olası bütün makineleri ve bunların verilerini inceleyerek bu inceleme sonucunda hesaplamanın sonlanıp sonlanmayacağına karar vermenin acaba bir yolu olup olmadığını soruyordu.

Bu izleneyi gerçekleştirmek için elimizde istenen bütün Turing makinelerine benzemek üzere programlanabilen bir Turing makinesi olan *evrensel bir Turing makinesi* olduğunu varsayıyoruz. Bu makinede girdi şeridi iki kısma sahiptir, biri program diğeri de verilerdir. Program kısmı şeritte bulunduğu nasıl tepki vereceğini başlığa emreden bir sayı dizisinden oluşacaktır. Örneğin 001 kodu şu anlama gelsin:

¹⁵ Çalışan Turing makinesi benzetimleri çok sayıda sitede bulunabilir, örneğin <http://wapo3.informatik.fhwiesbaden.de/weber1/turing/index.html>.

001: Eğer şeritte 1 bulursan ve sen 1 durumundaysan, şerit üzerindeki 1'i 0 yap, iç durumunu 2 durumuna gelecek şekilde değiştir ve bir adım sağa git.

Benzer şekilde 010 kodu da şu anlama gelebilir:

010: Şeritte bir 0 bulursan ve sen 2 durumundaysan, bir sıra sola git; ama bir 1 okursan, 0 halde 1'i 0 yap ve bir sıra sağa git.

Bu iki talimat art arda gerçekleştirilecekse, 0 halde şeridin program kısmı ... 001010 ... görünümünü alır. Evrensel Turing makinesine *tu* diyelim. Şunun da altını çizelim; *tekil* Turing makinelerinden biri yalnızca verileri okurken, *evrensel* makine önce kendisini hazırlamak için programı okur, ardından verileri okur. Bu nedenle t_{10} 'u taklit etmek istiyorsak, program 10'da t_{10} gibi davranması için belirlenmiş talimatlar kümesini okuyoruz, ardından verileri giriyoruz. Veri 3 sayısından oluşuyorsa, ortak işlemin sonucunda 42 yanıtını bekliyoruz ve $tu(10, 3) = 42$ yazıyoruz; burada parantez içindeki ilk sayı taklit etmek istediğimiz Turing makinesinin numarası, ikinci sayı da veri oluyor.

Şimdi de başka herhangi bir Turing makinesini, örneğin t_{23} 'ü ve herhangi bir veri kümesini inceleyebilen ve bu kombinasyonun sonlanıp sonlanmayacağına karar vererek bize bir yanıt çıkartı verebilen bir Turing makinesinin daha olduğunu varsayalım. Bu özel Turing makinesine de *th* (buradaki *h* de "halt"- dur'un kısaltması olsun) adını verelim. Eğer *th* program ve verilerin belirli bir kombinasyonunda sonlanıyorsa, örneğin bunlar t_{23} ve 3 olsun, 1 çıktısı verecek ve duracaktır; eğer kombinasyonun durmadığını saptarsa, bu da örneğin t_{22} ve 17 olsun, *th* 0 çıktısı verecek ve duracaktır. Turing'in başarısı *th*'nin mümkün olan bütün Turing makineleri listesinde yer almadığını, dolayısıyla var olmadığını gösterebilmesiydi. Bunu başarmak için Cantor'un irrasyonel sayıların sayılabilir olmadığını göstermek için kullandığı "diyagonal" argümana çok benzeyen bir argüman kullandı. Bu sonuca nasıl ulaşıldığı ilginizi çekmiyorsa isterseniz bir sonraki kısma atlayabilirsiniz.

Argüman şöyle ilerliyor. $t_0, t_1, t_2, \dots$ makinelerine 0, 1, 2, ... girdilerini verdiğimizizi ve

şağıdaki çizimde yalnızca sol üst kısmını aktardığımız bir tablo oluşturduğumuzu varsayalım.

Girdi	0	1	2	3
Makine numarası	0	□	□	□
1	3	□	4	1
2	1	1	1	1
3	0	1	□	2

Hesaplamanın asla sonlanmadığı yerlere sembolünü koyduk. Bu tablo mümkün olan bütün Hesaplanabilir sayıları (istenen şekilde seçilmiş hane sayısına dek bir Turing makinesi tarafından hesaplanabilen sayıları) içermektedir, çünkü ardışık satırlarının içerisinde mümkün olan bütün Turing makinelerini ve ardışık sütunlarında da mümkün olan bütün verileri içermektedir.

Şimdi ikinci kez çalıştırıyoruz. Bu sefer sonuçları önce, eğer makine ilgili hesaplamanın duracağına karar verirse 0 verecek ve eğer hesaplamanın duracağına karar verirse verilere hiçbir şey yapmayacak şekilde ayarlamış olduğumuz th' 'yi kullanarak sınıflandırıyoruz. Taklit ettiği makinelerin tekrar sonsuz hesaplamalara takılıp kalmaması için bir 'un yerine bir 0 koyduğu yeri hatırlatan bir notu da kendi kendisine hatırlatmak için düşünüyor. Örneğin th' 'ye t_4 programına ve 2 verisine karşılık gelecek şekilde 4, sonra da 2 girdiğimizde, th şeridi inceliyor, bir çeşit hesaplama yapıyor, eğer başlatırsak $t_4(2)$ hesaplamasının durmayacağına karar veriyor ve böylece tablonun bu duruma karşılık gelen yerine bir 0 koyuyor ve bu hesaplamanın durmayacağına ilişkin kendisine de bir not düşünüyor.

Hesaplamanın bu kısmının sonunda tablonun sol üst kısmının görünümü şöyle:

Girdi		0	1	2	3
Makine numarası	0	0	0	0	0
	1		0		
	2				
	3			0	

Ardından 0 girmedığımız yerlerin hepsinde ilk testteki gibi yine bütün hesaplamaları yaptırıyoruz ve tablonun bu kısmı şu şekle geliyor:

Girdi		0	1	2	3
Makine numarası	0	0	0	0	0
	1	3	0	4	1
	2	1	1	1	1
	3	0	1	0	2

Başlangıçtaki tablo mümkün olan bütün hesaplanabilir sayıları kapsadığı için bu tablo da mümkün olan bütün hesaplanabilir sayıları içeriyor: Çok sayıda tekrar var belki ama ziyanı yok.

Şimdi düğüm noktasına geliyoruz. Diyagonaldeki sayıları alalım (tabloda koyu renkle gösteriliyorlar) bunları 1 ekleyerek (Cantor'un ispatına benzer şekilde) değiştirelim. 1123... gibi bir dizi elde ederiz. Bu hesaplanabilir bir sayıdır (çünkü th 'ye ve Turing makinelerine dayalı adım dizisinin her örnekte işlediğini varsayıyoruz), dolayısıyla bu sayıyı üreten bir

makine tabloda bir yerde çıkmış olmak zorundadır. Fakat çıkmamaktadır: İlk sırada farklılaşır (çünkü ilk haneyi farklılaşmaya zorladık), ikinci sırada farklılaşır (çünkü ikinci haneyi farklılaşmaya zorladık), tablodaki bütün sıralar için böyle devam eder. Bir yandan 1123... var olmak zorundadır, öte yandan yoktur. Bu bir çelişkidir, dolayısıyla kullandığımız, duran makine th' 'nin var olduğu şeklindeki varsayım yanlış olmak zorundadır. Belirli bir hesaplamanın sonlanıp sonlanmayacağı hükmünü vermek için kullanılabilen tekil, genel, evrensel, algoritmik bir işlemin olmadığını kanıtlamış olduk (Turing'in yaptığı versiyonun bundan çok daha tıttiz ve güvenilir olduğundan da emin olun). Bu da şu sonuca işaret eder: Matematik denklemlerinin ve dolayısıyla Hilbert'in Entscheidungsproblem'i-nin çözümünün olmadığına karar vermeyi sağlayan genel bir algoritma yoktur.

Şimdi bu bölümün zirve noktasına, 20. yüzyılda mantıkta elde edilen en büyük başarı olarak nitelenen *Gödel teoremine* geçiyoruz. Avusturyalı mantıkçı Kurt Gödel (1906–1978) Gregor Mendel'in de çalışmalarını yürüttüğü Avusturya-Macaristan'daki Brunn'de (bugün Çek Cumhuriyeti'ndeki Brno'da) doğdu ve Viyana Üniversitesinde okudu. Yahudi (Bertrand Russell'in aksi yöndeki iddiasına karşın) olmasa da Gödel Nazi zulmüne katlanamadı ve 1934'te ABD'ye gitti, 1940'ta kalıcı olarak buraya yerleşti ve yaşamının geri kalanını Einstein'la çok yakın bir arkadaşlık kurduğu Princeton'da geçirdi. Gerçekten de ilerleyen yıllarda Einstein'ın denklemlerinin geçmişe zaman yolculuğuna izin veren hiç beklenmedik bir çözümünü bularak genel görelilik kuramına önemli bir katkıda bulundu. Gödel giyim kuşam anlayışı ve yaşam biçimi açısından alışlagelmiş insanlardan biri değildi. ABD'ye ilk ziyaretinin ardından Avusturya'ya döndüğünde dul bir dansçıyla evlendi ve o dönem orada hâkim olan snoplüğün

onu hiç iyi karşılamayacağını bilmesine karşın eşini kendisiyle beraber Princeton'a getirdi. Yaşamının sonuna doğru klasik depresyon ve paranoya belirtileri gösterdi: Kendisinin öldürülmek istendiğine emindi, öyle ki sonunda yemek yemeyi de kesti, Princeton'ın son derece kirli ve riskli bulunduğu atmosferi kendisine bulaşmasın diye dolaşırken kar maskesi takmaya başladı. Ölüm kaydında yazan "kişilik bozukluğu"nın sonucu olarak "gıdasızlık ve zafiyet" (gıdasızlıktan kaynaklanan bitkinlik) nedeniyle öldüğünde ağırlığı 30 kg'a dek düşmüştü.

Gödel'le bağlantılı bir dizi teorem var. Bizi burada ilgilendiren teoremi 1931 yılında şu isimle yayımlanan makalesindedir: *Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme* (Principia Mathematica'nın ve bağlantılı sistemlerin formel olarak karar verilemez önermeleri üzerine). Bu makalede belitsel matematiksel sistemlerde sistemin belitlerine dayalı formel çıkarımlarla kanıtlanamayan ya da çürütülemeyen metamatematik önermeler olduğunu kanıtladı.

Biz de bunu yapalım. Matematik bir önermeler dizisidir, $1 + 1 = 2$ ve "bu, bu önermenin bir ispatıdır" gibi; ilk önerme Hilbert'in anladığı anlamıyla matematikseldir, ikincisiyse metamatematikseldir. Şimdi temel belitlerden (örneğin Peano'nun belitlerinden ya da Russell ve Whitehead'ın kullandığı dallanmış tipler kuramına dayalı daha incelikli sistemden) çıkarsanması mümkün olan bütün önermeleri kâğıda döktüğümüzü varsayalım. Bu bize $p_0, p_1, p_2, \dots$ diye devam eden önermeleri verir. Önermeleri nasıl numaralandırdığımız önemli değildir, ama bundan sonra okuyacağınız cümleler Gödel'in nasıl devam ettiği hakkında sizlerde bir fikir uyandıracaktır.

Aritmetik formülasyonunda Peano'nunkilere benzeyen sadece birkaç sembol vardır. Örneğin belitlerden biri şudur: "Bir sayının ardılı bir sayıdır." Bunu $x' = sx$ şeklinde yazabiliriz; s "ardıl" anlamına gelir, dolayısıyla daha önce de gördüğümüz gibi $so = 1$, $s1 = sso = 2$ ve benzeri şekilde ilerler. Gödel bir ifadedeki temel işaretlere sayılar verdi. Örneğin "=" işaretine 5, s işaretine 7 dediğini düşünelim. x gibi her bir ayrıık değişkene 10'dan büyük biricik bir asal sayı atanır, dolayısıyla x' e 11 sayısını ve x' e 13 sayısını veriyoruz. Bir önermenin Gödel sayısı bu durumda içerdiği

sembollere karşılık gelen sayıların hepsinin çarpımıdır, dolayısıyla $x' = sx$ önermemize verilen değer 13 (x' için) $\times$ 5 (= için) $\times$ 7 (s için) $\times$ 11 (x için) hesabıyla 5005 olur. Bu işlemle bir önermenin, buna formel bir belit dahil, biricik bir sayı haline geldiğine dikkat edelim,¹⁶ böylece önermeler arasındaki bağıntılar aritmetik kapsamındaki bağıntılar haline gelir. Örneğin bu önermenin daha uzun ve karmaşık bir önerme içerisinde gerçekleşip gerçekleşmediğine dair metamatematiksel bir soruyu, 5 nasıl 75'in çarpanıysa, aynı şekilde 5005'in karmaşık önermenin Gödel sayısının çarpanı olup olmadığını hesaplayarak yanıtlayabiliriz.

Önermeleri Gödel sayılarını kullanarak tanımlayacağız, dolayısıyla 6 sayısı hakkında $x' = sx$ önermesi ($6 = s5$, “6, 5'in ardıdır” şeklinde okunur) $p_{5005}(6)$ önermesidir. Tahmin edebileceğiniz üzere detaylı önermeler çok yüksek Gödel sayılarına sahiptir, ama aktarımımızda $p_1(6)$ ve $p_4(6)$ gibi küçük sayılarla iş görebiliyormuş gibi yapacağız. Örneğin Önerme-4, p_4 6 sayısına uygulandığında “6 yetkin bir sayıdır”ın (asal çarpanlarının, bu örnekte 1 dahil, toplamına eşit olan sayıya yetkin sayı denir, $6 = 1 + 2 + 3$ ve $6 = 1 \times 2 \times 3$ gibi) metamatematiksel ifadesiymiş gibi davranabiliriz, Önerme-5 de asal sayılar hakkında olabilir ve $p_5(11)$ 'i “11 bir asal sayıdır” olarak okuyabiliriz.

Bir matematiksel kanıt, sembol işletim kurallarının uygulanmasıyla birbirinden çıkan bir önermeler dizisinden oluşur. Bu, içerdği önermelerin hepsinin Gödel sayılarına bakarak *bütün bir kanıtlamaya* tek bir sayı atfedebileceğimiz anlamına gelir. Bir kanıt 6, 8 ve 2 Gödel sayılı üç önermeden oluşuyorsa (pratikte bu sayılar dev büyüklükte olur), bu durumda kanıtın toplam Gödel sayısı $2^6 \times 3^8 \times 5^2 = 10\,497\,600$ olur (daha uzun kanıtlarda 2, 3, 5 sayıları asal olarak devam eder). Anlayacağınız üzere incelikli önermelerden oluşan uzun kanıtlar astronomik büyüklükte Gödel sayılarına sahip olur.¹⁷ Bu işlemin esas esprisinin bütün bir kanıtın toptan aritmetik alanına taşınması olduğunu tekrarlaya-

16 Basitleştirme amacıyla sayılandırma işlemi aslında sembollerin gerçekleştiği mertebenin göz önüne alınmaması nedeniyle olmayacak bir noktaya dek indirgedim. Gödel'in işlemi çok daha incelikli ve karmaşıktı.

17 Sayıların sönümlendiği ultrafinitist matematikte incelikli kanıtların anlamsız hale gelecek kadar yüksek Gödel sayıları almasıyla karşılaşılabılır.

lım. Örneğin bir kanıtın başka kanıtlardan faydalanıp faydalanmadığını hükme bağlamak için, $15 = 5 \times 3$ nasıl 5 ve 3'ün 15'in çarpanı olduğunu gösteriyorsa, bahsi geçen başka kanıtların da ilkinin çarpanları olan Gödel sayılarına sahip olup olmadığını tespit eden aritmetik işlemler yapabiliriz.

Şimdi Cantor'un işleminin bir çeşidi ve Turing'in hesaplanabilirlik tartışması bağlamında bu Gödel sayılarını Gödel'in sonucunu çıkarımlamak için kullanacağız. Gödel aslında kanıtının zirvesine ulaşmadan önce kırk ara teorem (mola kampları) oluşturduğu çok daha derin bir yöntem kullandı. Bizim aktaracağımız da işin özünü yansıtıyor: Bunu zirveye helikopterle çıkmak gibi düşünün. Fakat kanıtlama budanıp benim hedeflediğim düzeyde basitleştirilmiş olsa bile zor ilerlediği için isterseniz normal yazı karakteri kullanılan yere kadar atlayabilirsiniz.

0 sayısı hakkında belli bir önerme oluşturduğumuzu varsayalım ve buna $p_0(0)$, aynı önermenin 1 sayısı hakkında olanına $p_0(1)$, böyle devam ederek genel olarak x hakkında oluşturulan önermeye de $p_0(x)$ adını verelim. Önergeler doğru da olabilir, yanlış da olabilir. Örneğin önermeler " x 'in karekökü 1'dir" olabilir, bu durumda $p_0(0)$ yanlıştır çünkü $\sqrt{0} = 0$ olduğunu iddia etmektedir ki bu doğru değildir, ama $p_0(1)$ doğrudur çünkü $\sqrt{1} = 1$ 'dir. Bu önermelerin her biri bizlerin çıkartabileceği belirli bir Gödel sayısına sahiptir ve sonsuz sayıdaki doğal sayıların her biri hakkında bu tür sonsuz sayıda önerme vardır. Bu önermeleri $p_0(x)$, $p_1(x)$ vs şeklinde yazarız: Bazıları anlamsız, bazıları doğrudur. Şimdi bunlara karşılık gelen Gödel sayılarının hepsini dev bir tabloda topluyoruz (hatırlarsınız, astronomik büyükte sayılardır ama biz küçük sayılar kullanmıştık). Tablodaki her girdi karşılığı olduğu önermenin (sahte) Gödel sayısı olmak üzere bu tablonun sol üst kısmı şu tür bir şey olabilir:

Girdi	0	1	2	3
0	1	55	27	4
1	51	3	7	17
2	0	20	30	40
3	13	22	11	2

Buna göre 2 sayısı hakkındaki p_3 önermesinin sahte Gödel sayısı 11'dir.

Şimdi ayrı bir yerde sistemin belitlerinden kanıtlanabilir olan önermelerin hepsinin Gödel sayılarından oluşan bir liste hazırlıyoruz. Bir hesaplamamanın sonlanıp sonlanmayacağına hükmetmek için güvenilir bir Turing makinesi varsayımımızda olduğu gibi, burada da böyle bir listenin oluşturulabileceğini varsayıyoruz, ama bir çelişkiyle karşılaşsak da bu varsayımı reddetmek durumunda kalacağız.

Şimdi Turing argümanındaki gibi yine düşüm noktasına geldik. Şimdi şu önermeyi düşünelim:

Bu diyagonal terimin Gödel sayısı, kanıtlanabilir ifadeler listesinde yoktur.

Bir "diyagonal terim" o önermenin kendi sayısı hakkında bir önermedir; 2 sayısı hakkındaki p_2 önermesi gibi. Bu ifade bir önerme olduğu için, önermelerin o uzun ve yorucu ilk listesinin içinde bir yerlerde geçmek zorundadır. Basit olması için bunun Önerme-2 olduğunu varsayalım. Bunun karşılığı olan diyagonal Gödel sayısını da düşünelim, bu örnekte bu da 30'dur. Bu Gödel sayısı şu önermeye karşılık gelir:

2 sayısı hakkındaki Önerme-2'nin kanıtı yoktur.

Şimdi en önemli noktaya geldik. 2 sayısı hakkındaki Önerme-2'nin kanıtı olmadığıнын kanıtlanabilmesi anlamında, bu önermenin aslında doğru olduğunu kanıtlanabilir ifadeler listesinin bütününe bakma yoluyla bildiğimizi varsayalım, bu durumda bir çelişki doğar, çünkü 2 sayısı hakkındaki Önerme-2'nin kanıtı yoksa, o halde aslında kanıtlanabilir önermeler listesinde yoktur! Bunun yerine 2 sayısı hakkındaki Önerme-2'nin bir kanıtı vardır önermesinin yanlış olduğunu varsayarsak da, yine çelişki doğar, çünkü 2 sayısı hakkındaki Önerme-2'nin kanıtı yoktur yanlışsa, o halde kanıtlanabilir önermeler listesinde değildir, bu durumda da önerme doğrudur!

Bu geldiğimiz noktada kullandığımız belit sisteminin önerme ile değillemesi arasında karar vermeye yeterli olmadığı sonucuna varmak durumundayız. *Matematik tamamlanmamıştır.* Bu doğru olması mümkün ama verili bir belitler kümesinden çıkarılamayan sonsuz sayıda matematiksel ifade olduğu anlamına gelir. Açılıştı söylediğim sözlerden birine geldik. Sayabiliyor olmamız (doğal sayılar bütün sayılar evreninde bu kadar nadir olduğu için) çok şaşırtıcı olmakla kalmıyor, (formel olarak kanıtlanabilir ifadeler bu kadar nadir olduğu için de) ayrıca onlarla aritmetik yapabilmemiz de insanı hayrette bırakıyor.

Gödel'in sonucu matematiğin hüküm gününün geldiği anlamına gelmiyor. Bir kere nasıl satrançta belirli bir pozisyonun şah-mata gidemeyeceği daha genel bir bakışla algılanabilirken, bunu formel olarak kanıtlamak olanaksızsa, aynı şekilde bir ifadenin doğruluğunu ortaya koymanın algoritmik olmayan yöntemleri de olabilir. Diğer bir deyişle formel bir sistem içerisinde kanıtlanamayan bir iddianın metamatematiksel bir kanıtı olabilir. İnsan zihninin bu tür enformel ama tamamen güvenilir kanıtlamaları yapabiliyor olması, düşünme ve kavramanın algoritmik olması gerekmediğini gösterdiği için de bilinçliliğin doğasına dönük yeni bir açılım sunmaktadır.

Matematik tarihinde üç büyük kriz yaşandı. Birincisi Yunanların eşölçülemezliği, irrasyonel sayıların varlığını keşfetmesi ve bunun Pisagorcuların felsefesinin altını oymasıyla yaşandı. İkincisi sonsuz küçüklerle uğraşmanın uygun olmadığından korkulan 17. yüzyılda kalkülüsün ortaya çıkışıydı. Üçüncü kriz 20. yüzyılın başında alanın altını oyuyor gibi görünen Russell çatışkısı ve Berry paradoksu gibi çatışkılarla karşılaşılmasıydı. Bu anlamda matematiğin bir dal olarak hayatta kalması dikkat çekicidir. Bunu biraz da sağduyuya borçludur: Mükemmel biçimde işleyen sayısız harika matematik örneği vardır ve yapısının derinliklerinde saklanan bazı güvenilmez bölgeler olsa bile bu kadar harika başarılarla imza atmış bir alanı elinin tersiyle itmek aptalca olurdu. Çalışan matematikçiler temelde yatan ve gerçek bir uygulamada yüzeye çıkmasının hemen hiç mümkün olmadığını düşünüldükleri çatlaklara rağmen işlerini korkmadan ve aldırmandan sürdürürebilirler. Elbette ikinci neden matematiğin olağanüstü faydalı olması ve fiziksel dünyanın betimlenişinin en üstün dili olmasıdır. Matematik olmasa bilimin, ticaretin, ulaşımın, sanayinin ve iletişimin çoğu olmazdı.

Bu durum, insan zihninin en yüce ürünü matematiğin niçin doğanın betimlenişine bu kadar uygun olduğu sorusunu karşımıza çıkartıyor. Burada kendime tamamen spekülasyon ürünü, bilime dayanmayan, hayal mahsulü ve dolayısıyla otoriteye sahip olmayan son bir şımarıklık için izin vereceğim. Bu benim spekülatif felsefeleriyle hafiften dalgamı geçmeme rağmen kalben bir Yunan (antik bir Yunan) ve Kantçı olduğumu gösteriyor. Burada Yunanları Yunanlıkta aşmaya niyetlenecek, Kant'ı Kantlıkta aşıp aşamayacağımı görecektir ve Platoncu gerçekçilik, Kantçı ve Brouweri sezgicilik ve Hilbertçi formalizm arasında derin bir bağ olup olmadığını keşfedeceğim.

Yüz yüze geldiğimiz problemin iki ucu var. Bir ucu matematiğin insan zihninin iç ürünü olduğudur. Diğer ucu matematiğin dış fiziksel dünyanın betimlenişine için fevkalade uygun görünmesidir. İçsel olan dışsal olana nasıl bu kadar uygun olabiliyor? Beyne ilişkin Kantçı yaklaşımı benimsersek beynin doğal sayılara karşılık gelen kümeler (Kant'ın terimlerini kullanırsak bir

sentetik *a priori*) ile bu sayıların geometri formunda üç boyutta temsilini (yine sentetik *a priori*, ama yalnızca yerel olarak, çünkü Öklit geometrisinin uzak mesafelerde ve kütleli cisimlerin yakınında geçersiz olduğunu biliyoruz) ayırt etme becerisini veren bir tarzda evrim geçirdiğini varsayabiliriz. Kant daha ileri bir tarihte yaşayıp da, bizim irrasyonel sayılar ve Öklit-dışı geometrileri düşünmekte bu kadar zorluk yaşadığımızı görseydi, bunu bu kavramların, yerel çevreye bir tür evrimsel adaptasyondan geçerek nöronal ağlarımızın içerisine girmeye uygun donanımda olmamasıyla açıklar ve özellikleri üzerine düşünmek için hakiki bir entelektüel gayret göstermek durumunda olduğumuzu söylerdi.

Devam edelim; bu kavramların basit manipülasyonlarının yapısal olarak beynin donanımında var olduğunu da varsayabiliriz. Bu fikir altta yatan mantıksal manipülasyonların da içerde olduğuna ve bizlerin fiziksel bağlantılı bir algoritmik kapasiteye sahip olduğumuza işaret eder. Beynin tek kapasitesinin bu olduğunu söylemiyorum: Beynin, bizim bağıntıları algoritmik olmayan bir tarzda düşünmemize olanak sağlayan, yerel-olmayan etkinliklerinin var olduğu şeklinde bugün oldukça fazla ilgi çeken spekülasyon bir görüş var ve (bu görüşün en büyük destekçisi olan Roger Penrose başta olmak üzere) kimileri bilincin ve bilinçliliğin doğası gereği yerel-olmayan bir kuantum olgusu olduğu düşüncesini savunuyor. Bu doğru çıkarsa şaşıracak olsam da, bu benim spekülasyonumun bir parçası değil, çünkü ben beynin içerisindeki algoritmik süreçlere, beynin belki de yerel-olmayan, daha metamatematiksel, daha büyük bir becerisinden doğan Hilbertçi algoritmik bir yardımcı işlemciye odaklanacağım. Kısacası Noam Chomsky'nin insanlarda dil için söylediği doğuştan gelen kapasiteyi akla getirir şekilde, algoritmik işlemler için de "yapısalcı" denebilecek bir pozisyon alabilir ve mantıksal kapasitemizi, beynin evrimsel basınçlar altında ortaya çıkmış fiziksel bağlantılı bir algoritmik bileşenin Kantçı bir dışavurumu olarak düşünebiliriz. Matematiksel bağlantılar yaratma, teoremler çıkarsama becerimiz vs bu yapının bir sonucudur.

Şimdi de kafanın dışına çıkarak fiziksel dünyanın matematiğin eldivenine nasıl el verdiğini düşünmeliyiz. Şimdi

daha da tehlikeli, iyice spekülatif bir alana giriyorum. Sayıların kümelerle bağıntısını ve Frege'nin sayıları belirli kümelerin genişlemeleriyle tanımlamasını görmüştük. Turing'le beraber modern bilgisayarların ebeveyni sayılan şen şakrak Macar-Amerikalı matematikçi John (Johann) von Neumann (1903-1957) da aynı ruhla doğal sayıların belirli bazı çok basit kümeler şeklinde tanımlanabileceğini ileri sürdü. o'ı boş küme $\{\}$, ögesi olmayan küme olarak tanımladı. Ardından 1'i boş kümeyi içeren küme olarak $1 = \{\{\}\}$ şeklinde, 2'yi hem boş kümeyi hem de boş kümeyi içeren kümeyi içeren küme olarak $2 = \{\{\}, \{\{\}\}\}$ şeklinde, 3'ü de $3 = \{\{\}, \{\{\}\}, \{\{\}, \{\{\}\}\}$ şeklinde vs tanımladı.¹⁸ Bu sayede von Neumann sayılar dünyasını mutlak hiçlikten çıkartıp bize aritmetik *ex nihilo* vermiş oldu.

Başka bir yerde mutlak hiçlikten görünen bir şeyin nasıl meydana gelebileceğini görecektir hayal gücünden yoksun olduğum için, evrenin *ex nihilo* ortaya çıkışı için de aynı von Neumann'ın doğal sayıları el çabukluğuyla boş kümeden çıkarması gibi bir şey olsa gerek demiştim. Evrenin kendi yaratılışının ardından hayatta kalması olgusunun bu durumda bu yolla varoluş kazanan varlıkların mantıksal olarak kendinden tutarlı olduğunun bir göstergesi olarak yorumlanması gerekir, zira aksi halde kâinat çökerdi. Bu nedenle evrene özgü, ona içkin bir mantıksal yapı vardır ve aynı yapı aritmetikte de vardır.

Şimdi bu bol köpüklü spekülasyon nehirlerini bir araya getiriyoruz. Matematik fiziksel dünyayla yüz yüze geldiğinde kendi yansımaları görür. Beyinlerimiz ve onların ürünü matematik, fiziksel evrenin kendisiyle, uzayzamanın ve onun içerisinde bulunan varlıkların yapısıyla tam olarak aynı yapıya sahiptir. Bu yüzden, *pace*¹⁹ Wigner ve Einstein, beyinden üreyen matematiğin fiziksel dünyanın betimlenmesi için harika bir dil olması şaşırtıcı değildir.

¹⁸ Bu notasyon şık olsa da karışıklık doğurması çok kolaydır. Küme kuramında boş küme genellikle $\emptyset$ ile gösterilir, böylece doğal sayılar $\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}, \dots$ şeklinde sıralanır ki gösterimsel açıdan bu en azından biraz daha az karışıklık doğurur.

¹⁹ Yazarın aynı fikirde olmadığını belirten ve "alınmasınlar ama" anlamına gelen Latince deyiş -çn.

Tüm bunlar muhtemelen saçmalık elbette. Ama olmadığını varsayın. Bunun anlamı dünyanın derin yapısı matematiktir demektir: Evren, onun içerdiği her şey matematiktir, sadece *matematiktir* ve fiziksel gerçeklik matematiğin müthiş bir dışavurumudur. Bu uç bir Platonculuk, ultra-neoplatonculuk, benim başka bir yerde verdiğim isimle “derin yapısalılık”tır. Bize maddi ve somut görünen (dünya, hava, ateş, su) her şey sadece aritmetiktir. Ama bu doğruysa, o halde Gödel’in teoremi bir anlamda tüm evren için geçerlidir. Evrenin gerçekten de kendinden tutarlı olduğunu hiçbir zaman bilemeyiz. Değilse, o halde belki gelecekte bir anda aniden sonlanacak ya da tutarsızlık yapısına veba gibi yayılacak, ilerlerken mantığı yıkacak ve yapıyı paslanmış çelik gibi yok edecektir. Var olan her şey geldiği yere, boş kümeye, şaşılacak ölçüde kudretli mutlak hiç kavramına geri dönecek.

Bu zaman gelene dek bizler bu kudretin tadını çıkarabiliriz. Eğer bu görüşün herhangi bir geçerliliği varsa, dört bir tarafımızı kendisini bize duyularımız yoluyla, Galileo’nun vizyonundan gelme, o her şeye karışan parmağının simgelediği bilim sayesinde keskinleşerek zekâyla derinleşen duyularımızın verdiği hazla kendisini bize gösteren hiç’in müthiş dallanışı sarmış demektir. Bundan daha etkileyici, daha müthiş bir şey düşünemiyorum.

SONSÖZ

ANLAMININ GELECEĞİ

Galileo'nun parmağı anlamının geleceğine ilişkin hangi yöne işaret ediyor? Son birkaç yüzyılda, özellikle de geçtiğimiz yüzyılda yaşanan çarpıcı ilerleme kolay denecek gibi görünmüyor. Peki, bu ilerleme bizi nereye götürecektir?

Bilim sanki yarı sonsuzmuş gibi görünüyor. Bu dikkatle seçilmiş ifadeyle, uygunsuz olarak "her şeyin kuramı" adı verilen nihai kuram arayışının başarıyla sonuçlanacağını düşünmeleri için iyimserler açısından bir zemin olduğunu, ama bilimin uygulamalarının ve dallanarak genişlemesinin sonsuz olduğunu anlatmak istiyorum. Elbette her yüzyıl bu görüş "bu sefer oldu" diye sevinçle, ısıltı ısıltı ortaya atlar ama sonradan yaşanan ilerlemenin haşin ışığı üzerine düşünce de komik hale gelir. Fakat şimdiki işaretler farklı ve iyimserler (iyimserlik bütün bilim insanlarının karakterinde olması gereken bir özelliktir) 19. yüzyılın "sona çok yaklaştık"çıları ile yirminci yüzyılınkiler arasında var olan özsel farka işaret edebiliyor.

En küçüklerinden tüm ülkeyi saranlarına dek her ölçekten, artarak karmaşılaşıp incelen küçük hünerli araçların dünyasında yetişmiş bir 19. yüzyıl bilimcisi, açıklamayı da hünerli bir araç olarak görürdü. Onlar için nihai kavrayışın vadettiği cennet, gözlemi taklit edebilen bir makinenin yapılmasıydı, zira onların ufku küçük cihazların anlaşılmasına ancak yetiyordu. Daha sonra tekrar değineceğimiz gibi bu görüş modern bilimde tümünden kaybolmadı ama bilim insanları artık cihaz ya da araç şeklinde açıklamanın anlamının sonu ve amacı olarak kabul edilmesini toy bir yaklaşım olarak değerlendiriyorlar. Her marifetli cihaz ya da araç da daha küçük ölçeklerdeki başka marifetli cihazlardan oluşur: Gerçeği söylemek gerekirse özellikleri olan her şey birçok parçadan oluşan bir cihazdır. Bu anlamda baktığımızda kütlesi, yükü ve spiniyle bir elektron da, ona bu temel ayırt edici özellik-

leri verdiği farzedilen yapısıyla bir tür hünerli araçtan başka bir şey değildir.

Hünerli araç ve cihazların çağından geçerek soyutlama çağına sürüklendik. 21. yüzyılın bilimcileri şu anda evrenin derin yapısının yalnızca matematik terimleriyle ifade edilebileceğine inanıyor ve matematiği görselleştirilebilir modellerle ilişkilendirme çabalarının hepsinin tehlike dolu olduğunu düşünüyorlar. Oyunun yeni adı, anlamanın şu anki paradigması artık soyutlama oldu. Eğer varsa nihai bir kuramın, evrenin temel yapısının tamamen soyut bir anlatımı, onun sahip olabileceğimiz ama kavrayamayacağımız bir açıklaması olması çok muhtemel.

Bu (bir açıklamaya ulaşabileceğimiz ama onu kavrayamayacağımız görüşü) herhalde çok uç bir görüş olsa gerek. İnsanlar matematiği, özellikle de fiziği desteklemek için kullanılan matematiği basit terimlerle yorumlamada ustadır, yorumlamanın tehlikesiyle dolu olduğunun bilincindedirler ama yine de yorumlamaktan kaçınmazlar. Bu nedenle elektron spini, zihinsel bir dayanak olarak bir elektronun dönmesi, bir topun kendi eksen etrafında dönmesi olarak kafada canlandırılır; ama arka planda biz “spin”in aslında ayırt edici özellikleri bu klasik imgeyle tam olarak yansıtlamayacak, son derece soyut bir varlık olduğunu ve üstelik klasik imgeden bakmanın da yanıltıcı olduğunu biliriz. Sicim kuramı bunun bir başka örneğidir, orada da üç boyutta salınan gerçek bir sicim olarak düşünerek, matematiksel sicim kavramıyla ne demek istediğimizi anlayabiliyor gibi davranırız. Nihai kuram muhtemelen son derece soyut olsa da onun içeriğinin yalın, fikir verici, kusurlu imgelerine sahip olmayı ve popüler bilim kitabı yazarlarının önlerinde gelecekte karşılaşabileceğimiz nihai kuramları sindirilebilir kılmak için yeni ve hoş yollar bulma açısından sonsuz bir geleceğin uzanmasını bekleyebiliriz.

İyi ama “nihai kuram” derken ne demek istiyoruz? Nihai kuram, bir kez çözüldü mü Güneş’in altındaki ve hatta Güneş’in bizzat kendisindeki bütün özellik ve faaliyetleri açıklayabilecek tek bir denklem olmayacak. Nihai bir kuram, maddi dünyanın temel yapısına yönelik bir bakış açısı ve duruşu bir anlamda (net konuşamıyorum çünkü netlik ve belirginlik ancak tecrübeyle oluşacak) bünyesinde barındıran bir kavramlar kompleksi

olacak. Sizlere kafamda ne olduğuna dair fikir vermek için ancak bundan 50 yıl kadar öncesinde nihai gerçeklik şeylerinin yüklemeler mantığının önermelerinin bir yığılması olup olmadığını sorgulayan, hayal gücü açısından usta isim John Wheeler'in başarısız ama tahayyül dolu girişimine işaret edebilirim. Onun şüphe edip merak ettiği şey şuydu: Acaba mantığın rastlantısal önermeleri kendinden tutarlılığa itilmişse buradan bir evren doğabilir miydi? Büyük Patlama bir mantıksal olarak kendinden tutarlı hale gelme patlaması mıydı? Başka bir şekilde ifade edersek, acaba yaratılış kendi potansiyel anlaşılabilirliğinden varlık kazanma mıydı?

Elbette bu betimleme düzeyi, şu anda sicimler ve kuantum kuramı ile kütleçekimin birleşmesi üzerinden ulaşılmaya çalışılan betimlemeden daha aşağıda, daha derinde yer almaktadır. Eğer geçmiş bize yol gösteriyorsa, şimdiki zaman ile nihai bir kurama ulaşılması arasında son derece önemli en az iki paradigma kayması olacağından emin olabiliriz. Elbette sonsuz bir paradigma kayması dizisinin içine girmiş olmamız ve gerçek anlamının her zaman sarı tuğla yolun ilerisinde" ve bir sonraki paradigma ufkunun ötesinde yer alabilmesi mümkündür. Bu, doğuştan karamsar olan ve bilimin sendelemesinden zevk alan felsefecileri muhtemelen mutlu edecek ama doğuştan iyimser olması gereken bilim insanlarını hayal kırıklığına uğratacaktır.

Kütleçekim ile kuantum kuramının birleşmesi bir paradigma kaymasına neden olacaktır ve bunun alabileceği biçimin işaretleri de şimdiden mevcut. 9. Bölümde değindiğimiz gibi, uzayzamanın gerçek görünümünün sadece olaylar arasındaki ilişkilerin var olmasında görüldüğü görüşü ortaya çıkıyor. Olası bütün geçmişlerin yaşanmış olduğu, dolayısıyla evrenin doğası itibarıyla çok katmanlı olduğu şeklinde derin kuantum yorumları da var. Bu tür paradigma kaymalarını henüz tam anlamıyla tespit etmiş değiliz ve bunlar henüz tam bir kuantum kütleçekim kuramına sahip olmadığımız için teknik itirazlara açık; ama bunun özel görelilik nasıl algımızı kaymaya uğrattıysa, aynısını genel görelilik nasıl yaptıysa, kuantum kuramı nasıl yaptıysa ve yapmaya devam ediyorsa, tam da bu şekilde gerçeklik algımızı müthiş, inanılmaz

1 L. Frank Baum tarafından yazılan *The Wonderful Wizard of Oz* [Oz Büyücüsü] adlı çocuk romanına yapılmış bir gönderme –çn.

ama yine de sadece puslu olarak fark edilebilir bir biçimde değıştirip kaydıracağına hiç kuşku yok. Hatta 20. yüzyılı karakterize eden olaylar düşünöldüğünde, sadece toplumsal düzende büyük bir altüst oluş yaşanmakla kalmadı (ki bu sadece bu yüzyıla özgü de değildi), bizlerin gerçekliğıin yapısını kavrayışımızda da Copernicus'tan bu yana örneğini görmediğimiz derinlikte bir altüst yaşandı. Felsefe bin yıllık faaliyet tarihinde bu kadar büyük bir altüst yaşamamışken, bilim bunu yüzyıl içerisinde en az üç kere yaşadı ve en az bir kez daha, muhtemelen iki kez daha yaşamakla kalmayacak, sonsuza dek art arda yaşamaya devam edecek olması da ihtimal dahilinde.

İkinci paradigma kayması (bu sonuncu olacakmış gibi davranacağız ama kesin olarak bilmemizin de bir yolu yok) bizi kütleçekim ve kuantum kuramlarının birleştirilmesinin bir adım ötesine taşıyacak. Bizi fiziksel gerçekliğıin temellerine götürecek ve bizler bir parçacık olmanın ne demek olduğunu (şimdiden tarihi geçmiş bir terim oldu bile), bir kuvvet olmanın ne demek olduğunu, bir yüke sahip olmanın ne demek olduğunu, fizik yasalarının nasıl ortaya çıktığını, evrenin neden şimdiki halinde olduğunu ve onun görünen gerçekliğıinin hiçbir müdahale olmadan mutlak hiçlikten nasıl doğabildiğini... ve anlaşılır olabildiğini kavrayacağız. 10. Bölümün sonunda bahsettiğim fantastik spekülasyonlarda, Wheeler'ınki gibi spekülasyonlarda ve sicim kuramında çeşitli olasılıkların çok hafif pırıltıları olsa da, bu nihai kuramın ne gibi bir biçim alacağı hakkında en ufak bir fikri olan yok. Bir tek bu nihai aydınlanma yaşandığında bizlerin daha önceki saflığıımıza hayret edeceğimizden emin olabiliyoruz.

Bilimin çözmesi için geriye yalnızca hakikaten derin iki problem, ikinci dereceden milyonlarca problem ve daha alt derecelerden trilyonlarca problem kaldı. Büyük problemlerden biri evrenin kökeni, diğeri de maddenin en kafa karıştıracı özelliklerinden biri olan bilincin doğası. Modern kuantum kütleçekim ve parçacık kuramlarının izinde biraz daha ilerlediğimizde evrenin kökeni belirginleşmeye başlayacak ve bunu birkaç daha büyük fikir şeklinde özetleyebilmeyi umabiliriz. Bilinç problemi çok

daha farklı olabilir ve onun büyük bir fikir geliştirmeden de çözülebileceğini düşünmek mümkün.

Öncelikle ben bilinç gibi karmaşık bir olgunun terimin geleneksel anlamında bir “yasa”yla özetlenebileceğinden kuşkuluyum. Bir bilinçlilik hissi üretme becerisine sahip olduğu bilinen şu andaki tek cihaz, yani beyin çok sayıda faaliyet türlerinden faydalıyor ve bazı işlevlerin yoğunlaştığı ama tam olarak da yerelleşmediği bölgelere sahip, bu yüzden onun işlevini bırakın bir matematiksel formülde toplamayı, bir iki cümlede bile özetlemeyi beklememeliyiz. Zannımca bilincin ve bilinçliliğin anlaşılmasına ancak onu taklit etmeyi başardığımızda ulaşacağız. Bu görüş fizyolojik, farmakolojik, psikolojik biçimlere de sahip mevcut nörobilimsel yaklaşımların önemini kesinlikle reddetmez, zira simülasyonlarımıza katılması gerekenleri tüm ayrıntısıyla bilmemiz gerekir. Fakat nasıl bir uçağın kuştüylerine sahip olması ya da motorlarının göğsünde olması gerekmiyorsa, keşfedilen her şeyi katmak şart olmadığı için de sakınarak davranmalıyız. Bu görüş, bazı çevrelerde şu an revaçta olan örneğin bilinç mekanizmalarını mikrotübüller içerisindeki kuantum olgularına dayandırma düşüncesinin içerelemeyeceği anlamına da gelmez. Aslında nöronal bağlantıların inanılmaz biçimlenebilme özelliği ve kimyasal potansiyelizasyon ve aktarım inceliği dahil olmak üzere yalnızca klasik nörofizyolojiyi taklit eden bir cihaz yaparak (adlandırıldığı şekliyle söylersek) 1. Tip bilinç elde etmek ve ardından bilinçliliğin kaçınılmaz eşlikçisi olduklarına inananların önerdiği yerelleşmesini yitirmiş tipte kuantum etkilerini de kapsayan bir cihaz yaparak 2. Tip bilinçliliğe ulaşmak mümkün olabilir. Bu durumda 2. Tip bir taklitçinin 1. Tip bir taklitçinin yapamadığından ya da yapamayacağı düşünüldenden farklı olarak ne yapabildiğini ya da yapacağının düşünüldüğünü keşfetmek ilgi çekici bir iş olacaktır. Eğer benim tahmin ettiğim gibi bizlerin sadece 1. Tip olduğumuz ortaya çıkarsa, bizim 2. Tip bir bilinçliliğin farklı başarılarını bilinç olarak kabul etmememiz ve başarısızlık olarak değerlendirmemiz düşünülebilir.

Kısacası bir “bilinç kuramı” hiç olmayabilir (hatta bunu düşünmek bile uygunsuz olabilir) ise de, bir taklitin başarılabilmesi

çok yüksek bir olasılıktır. Bu taklitçinin yapılması eylemi bir anlamda bilincin doğasının kavranışına ulaşmak anlamına gelecek. Elbette bizim bilinç türümüz doğal bilinçlilik ile simüle edilmiş tür arasındaki farklılıkların hiç sonlanmayan keşfine çıkılacak ve yapay bilinç doğal bilinçle her yönden aynı mı yoksa asla anlayamayacağımız başka bir şey mi yarattık sorusunun yanıtından tam olarak emin olamayacağız. Belki de görüp görebileceğimiz uzaylılar sadece kendi yarattıklarımız olacak. Yapay olarak yaratılmış ama duyulara sahip bu varlık sayılmayan şeylerin, varlık-olmayanların hakları konusunda etik problemlerle, ölme hakları, sakatlandıklarında özel bakım görme hakları, onları klonlayabilme olasılığımız ve tam olarak yaşadıkları deneyimler, bilinçli varlık-olmayanların farklı ırklar geliştirme ve birbirlerini kabul edilemez bulmaları olasılığı, birey ya da kabile halindeki taklitçiler arasında eylemlerinin varsayılan akılcılığına zarar veren inanç sistemlerinin ortaya çıkma olasılığı, bu zekâ sahiplerinin insan bilinci taşıyan kimselerin tuhaf davranışlarından bıkmama ve (insanların gezegene yük olduğu şeklinde karamsar ama gerçekçi bir değerlendirmenin ardından) gereken önlemleri almaya girişmeleri olasılığı gibi sorunlarla uğraşmayı bizden sonraki kuşaklara bırakabiliriz. Burada yeni bir Gulliver'in yolculuğa çıkmasına uygun çok geniş bir ölçekle karşı karşıya olduğumuz kesin.

Bilimin değişen paradigmalarına değindim. Bize, evimize daha yakın, aramızda, hatta evimize girmiş iki paradigma değişimi daha var.

Bilgisayarın ve onun devasa sayısal hesaplamalarla büyük bir netlikle başatma becerisinin yükselişiyle analizden (denklemlerin kuruluşu ve çözümü) sayısal hesaplama doğru bir kayma görüyoruz. Doğru kullanıldığında bu kayma muhteşem, çünkü artık bir kuramdan çözülemeyen bir denklem çıktığında kollarını bağlayıp beklemek yerine onu bilgisayarda çalıştırıp tüm sonuçlarını analiz edebilen bilim insanlarının erişimini genişletiyor. Şimdi artık masum görünümlü minik denklemlerin olağanüstü anlamlar taşıyabildiğini görebiliyoruz. Bu gücü ve onu sayısal olarak didikleme becerimizi takdir etmemiz gerek, zira

Önsözde büyük fikir olma ölçütlerini ele alırken aynı ölçütü ben de hayranlıkla kullandım.

Ama iki yönlü bir tehlike de var. Birincisi çok önemli değil: Biraz sıkı çalışmayla analitik çözüm bulunabileceksen hemen sayısal hesaplamaya başvurabiliyoruz. Bu resmen tembellik, fakat analitik ifadenin güzellikleriyle yetiştirilmiş bizler için üzücü bir durum olsa da, muhtemelen öyle çok da önemli değil. İkinci tehlike daha derin: Sayısal çözüme başvurmak bizi anlamaktan uzaklaştırabilir. Bir analitik çözüm bulunduğunda sonucu *anladığımızı* iddia edebiliriz, çünkü ilkesel anlamda çözüme götüren argümanın her adımını tek tek kavrayabiliriz. Bir sayısal sonuç bulunduğunda, tohum (denklem) ile ürün (sonuç) arasındaki bağlantının doğrudan kavranışı daha azdır ve sonucu, analitik bir türetme yaparken adım adım ilerleyişimizde olduğu kadar kendi varlığımızın bir parçası gibi hissetmeyiz. Yine de hiç çözüm elde etmemektense sayısal bir sonuca ulaşmak iyidir ve zaman geçtikçe bu konuda kendimizi giderek daha rahat hissedecek ve sayısal hesaplamaları benimsemenin yolunu ya da yollarını bulacağız. Elbette bu hesaplamaların durumunu kurtaran şey de, artık içeriklerinin gösterilmesi için grafiklerin harika bir biçimde kullanılabilir olması. Şu anda zarif bir analitik çözümün güzelliğini görmekten hesaplanmış bir çözümün şık tasvirinin güzelliğini görmeye doğru yaşanan geçişin tam ortasındayız.

İkinci kayma çok daha dikkatle ele alınması gereken bir konu. Metinde birkaç yerde bazı durumlarda bilimin kendisinin ana kaynağı olan özelliklerden ihtiyatlı bir şekilde uzaklaştığına değinmiştim: Filli deney. Kozmolojide hiçbir zaman yapılamayacak deneyler vardır; bu bazen gereken enerjinin kozmik büyüklükte olmasından, bazen de görünüşe göre tek ve önceden var olan bir evrenin gözlemleriyle sınırlanmış olduğumuz içindir. Hatırlanırsa 6. Bölümde sicim kuramını deneysel olarak sınamamaz gibi görünen kuramlara örnek göstermiştim.

Deney yapmaya boşverilmesine gösterilen en az iki tepkinin olduğu söylenebilir. Biri bu tür bütün sınamamaz kuramları bilim dışı olarak görmek ve Aristoteles'in hükümlerinden bakıldığında artık hiçbirinin gerçeğe işaret etmediğini

düşünmektir. Bu noktada Galileo'nun parmağı ikaz işareti yapıyor. Bunlar sevimli düşünsel faaliyetlerdir, ama bilim değildir. Kimilerinin sicim kuramı için de bu görüşte olduğuna hiç kuşku yok. Başka insanlar da, çok daha uygunsuz olsa da, aynı görüşü doğal seçimde savunuyor. Bir diğer alternatif, bilimi, gerçekliği doğrulanabilir olmayan kuramların ihtiyatlı bir biçimde geçerli olarak görülebileceği bir noktaya dek olgunlaşmış olarak görmektir. Bu nedenle eğer bir kuram temel parçacıkların kütlelerini açıklıyor ve dünyanın üç boyutlu olduğunu öngörüyorsa, o halde bunu sınanmanın bilinen bir yolu, en azından pratik bir yolu olmasa bile, kuramın fahri geçerliliğe sahip olduğu kabul edilebilir. Bilimsel bilginin külliyatı zayıfken bu tür bir tutum kabul edilemez olurdu, ama şimdi (bilinen gerçekler birikimiyle uyuşmazlıklara işaret etmediği sürece) belki de, ihtiyatlı davranarak ama, bu tür bir sınanamaz kuramı geçerli olarak kabul edebiliriz. Şimdi de Galileo parmağını dikkat edin dercesine sallıyor. Bilimsel püristlerin yapmakta kendilerince haklı oldukları gibi eğer bizler de doğrulanabilirlik için diretirsek, o zaman da ödenecek bedel temel şeylerin keşfi açısından bilimsel ilerlemenin sona ermesi olur; bu argümanın elbette deneyin büyük olasılıkla hiçbir zaman aynı şekilde kırılıp atılamayacak olduğu bilimin uygulanması üzerinde herhangi bir etkisi olmaz.

“Doğrulanabilir” kavramını kullandım. Bu beni Karl Popper’la temasa geçiriyor. Hatırlarsanız, kuramların kelimenin dar anlamıyla hiçbir zaman doğrulanabilir olmadıklarını, fakat bilimsel olarak değerlendirileceklerse yanlışlanabilir olmaları gerektiğini savunan çok ünlü bir görüşü ortaya atmıştı. Bu şu demek; kuramın yanlış olduğunu gösterebilen bir deney ilkesel anlamda var olmalı. Doğal seçim (kimilerinin düşündüğünün aksine) yanlışlanabilirdir, çünkü örneğin 1. Bölümde de gördüğümüz gibi moleküler biyoloji için de çıkarımları vardır. Genel görelilik yanlışlanabilirdir, çünkü 9. Bölümde de gördüğümüz gibi Merkür’ün yörüngesinin devinimi ve galaksilerin ışığı bükmesi gibi örneklerde görülen nesnelerin ağır cisimlerin yakınındaki hareketine ilişkin çıkarımları vardır. Enerjinin korunumu yasası ve entropi artışı yasası (termodinamiğin birinci ve ikinci yasaları)

yanlışlanabilir, çünkü başka çıkarımları yanında örneğin daimi hareket makinelerinin varlığı konusunda çıkarımlara sahiptir.

Sicim kuramı yanlışlanabilir midir? Şu anda çok muğlak ve bilmemize yetmeyecek kadar az iyi tanımlı öngörüye sahip. Fakat yanlışlanabilir olmadığını varsayalım: M-kuramının gelecekteki bir versiyonunun temel parçacıkların bilinen bütün kütlelerini, temel sabitlerin bütün değerlerini ve uzayzamanın yapısını öngören bir biçim kazandığını, ama kesinlikle hiçbir deney olanağı da sunmadığını varsayalım. Evrenin bilinen temel özelliklerinin hepsini isabetli bir biçimde öngördüğü için yanlışlanabilir olmayacaktır ama ben açıkçası bizim onun geçerli olduğu görüşünde olmayacağımızdan ve hatta onu bilimsel başarının zirvesi olarak kucaklamayacağımızdan hiç emin değilim.

Her Şeyin Kuramına ulaşıldığında ve bu kuram evrenin bilinen özelliklerinin hepsini tahmin etmek için kullanıldığında bilim insanları ne yapıyor olacak? Kimileri diğer yöne yüzünü dönecek ve bu nihai kuramın alt dallarını keşfedecek. Uygarlığın devam edeceğini varsayarsak bu onları sonsuza dek meşgul edecektir. Fakat kimileri de kafalarında Gödel'in teoremi ve onun bu tür kanıtların sağlanması konusundaki negatif çıkarımları olduğu için (bkz. 10. Bölüm) bu nihai kuramın kendinden tutarlılığı konusunda kaygı duyacak. Kendinden tutarlılık konusunda kaygılanmayanların geceleri uykuları kaçacak ve nihai kuramın biricik olduğunu kanıtlamanın olanaksızlığı onları rahatsız edecek. Hatta belki de tamamen aynı çıkarımlara sahip, ama rakip kurama matematiksel olarak özdeş olmanın yanında, evrenin o zamana dek varsayılandan büsbütün farklı olduğuna işaret eden, görünüş itibarıyla tamamen farklı bir her şeyin kuramı keşfedecekler. Ama bu da bilim işte.

Ek Okumalar

Bunlar bu kitabı yazarken yararlandığım temel kaynaklardır. Kendi bölümlerime koymak için ihtiyaç duyduğum bilgileri aldığım için yazarların hepsine büyük teşekkür borçluyum.

1. Bölüm: Evrim

DARWIN, CHARLES, *The origin of species*. İlk basım John Murray, 1859; Penguin'den ulaşılabilir, 1968.

DAWKINS, RICHARD, *The selfish gene*. Oxford University Press, 1976.

DESMOND, ADRIAN ve JAMES MOORE, *Darwin*. Penguin, Londra, 1991.

FUTUYAMA, DOUGLAS, *Evolutionary biology*. Sinauer, Sunderland, Mass., 1998.

GOULD, STEPHEN JAY, *The structure of evolutionary theory*. Harvard University Press, 2002.

LEWIN, ROGER, *Human evolution*. Blackwell Science, Oxford, 1999.

MAYNARD SMITH, JOHN ve EÖRS SZATHMARY, *The origins of life*. Oxford University Press, 1999.

RIDLEY, MARK, *Evolution*. Blackwell Science, Oxford, 1996.

RIDLEY, MARK, ed. *Evolution: an Oxford reader*. Oxford University Press, 1997.

TUDGE, COLIN, *The variety of life*. Oxford University Press, 2000.

2. Bölüm: DNA

DAVIES, KEVIN, *The sequence: Inside the race for the human genome*. Weidenfeld and Nicolson, Londra, 2001.

HENIG, ROBIN, *A monk and two peas: The story of Gregor Mendel and the discovery of genetics*. Weidenfeld and Nicolson, Londra, 2000.

KRAWCZAK, M. ve J. SCHMIDTKE, *DNA fingerprinting*. Bios Scientific Publishers, Oxford, 1998.

MADDOX, BRENDA, *Rosalind Franklin: The dark lady*. HarperCollins, 2002.

RIDLEY, MATT, *Genome: The autobiography of a species in 23 chapters*. Fourth Estate, Londra, 1999.

SULSTON, JOHN ve GEORGINA FERRY, *The common thread*. Bantam Press, Londra, 2002.

SUZUKI, DAVID, ANTHONY GRIFFITHS, JEFFREY MILLER ve RICHARD LEWONTIN, *An introduction to genetic analysis*. W. H. Freeman, New York, 1989.

3. Bölüm: Enerji

BARBOUR, JULIAN, *The discovery of dynamics*. Oxford University Press, 2001.

HARMAN, P. M. , *Energy, force, and matter: The conceptual development of nineteenth- century physics*. Cambridge University Press, 1982.

LIGHTMAN, BERNARD, ed. *Victorian science in context*. University of Chicago Press, 1997.

NEWTON, ISAAC, *The Principia: Mathematical principles of natural philosophy*. Çeviri İ. Bernard Cohen ve Anne Whitman, University of California Press, 1999.

SMITH, CROSBIE, *The science of energy: A cultural history of energy physics in Victorian Britain*. Athlone Press, Londra, 1998.

4. Bölüm: Entropi

ATKINS, PETER, *The second law*. W. H. Freeman, New York, 1987.

ATKINS, PETER ve JULIO DE PAULA, *Physical chemistry*. Oxford University Press ve W. H. Freeman, New York, 2002.

COVENEY, PETER ve ROGER HIGHFIELD, *The arrow of time*. HarperCollins, Londra, 1991.

SMITH, CROSBIE, *The science of energy: A cultural history of energy physics in Victorian Britain*. Athlone Press, Londra, 1998.

5. Bölüm: Atomlar

ATKINS, PETER, *The periodic kingdom: A journey into the land of the chemical elements*. Weidenfeld and Nicolson, Londra, 1995.

- ATKINS, PETER ve LORETTA JONES, *Chemical principles*. W. H. Freeman, New York, 2001.
- EMSLEY, JOHN, *Nature's building blocks*. Oxford University Press, 2001.
- LUCRETIVS, *On the nature of the universe*. Çeviri R. E. Latham, Penguin, Londra, 1951.
- STRATHERN, PAUL, *Mendeleyev's dream: The quest for the elements*. Hamish Hamilton, Londra, 2000.

6. Bölüm: Simetri

- DAVIES, P. C. W. ve J. BROWN, ed. *Superstrings: A theory of everything?* Cambridge University Press, 1988.
- GREENE, BRIAN, *The elegant universe: Superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory*. Vintage, Londra, 2000.
- HEILBRONNER, EDGAR ve JACK DUNITZ, *Reflections on symmetry: In chemistry ... and elsewhere*. VCH, Weinheim, 1993.
- KANE, GORDON, *Supersymmetry: Squarks, photinos, and the unveiling of the ultimate laws of nature*. Perseus Publishing, Cambridge, Mass., 2000.
- LOCKWOOD, E. H. ve R. H. MACMILLAN, *Geometric symmetry*. Cambridge University Press, 1978.
- MARTIN, B. R. ve G. SHAW, *Particle physics*. John Wiley, Chichester, 1997.
- PEAT, DAVID, *Superstrings and the search for the theory of everything*. Abacus, Londra, 1992.
- SUNDARESAN, M. K. , *Handbook of particle physics*. CRC Press, Boca Raton, 2001.

7. Bölüm: Kuantum

- ALBERT, DAVID, *Quantum mechanics and experience*. Harvard University Press, 1992.
- ATKINS, PETER, *Quanta: A handbook of concepts*. Oxford University Press, 1991.
- ATKINS, PETER ve R. S. FRIEDMAN, *Molecular quantum mechanics*. Oxford University Press, 1997.

- ATKINS, PETER ve JULIO DE PAULA, *Physical chemistry*. Oxford University Press ve W. H. Freeman, New York, 2002.
- BAGGOTT, JIM, *The meaning of quantum theory*. Oxford University Press, 1992.
- DICKSON, MICHAEL, *Quantum chance and non-locality: Probability and non-locality in the interpretations of quantum mechanics*. Cambridge University Press, 1998.
- GHOSE, PARTHA, *Testing quantum mechanics on new ground*. Cambridge University Press, 1999.
- GREENSTEIN, GEORGE ve ARTHUR ZAJONC, *The quantum challenge: Modern research on the foundations of quantum mechanics*. Jones and Bartlett, Sudbury, Mass., 1997.
- KRAGH, HELGE, *Quantum generations: A history of physics in the twentieth century*. Princeton University Press, 1999.
- OMNES, ROLAND, *Quantum philosophy: Understanding and interpreting contemporary science*. Princeton University Press, 1999.
- YOURGRAU, WOLFGANG ve STANLEY MANDELSTAM, *Variational principles in dynamics and quantum theory*. Pitman, Londra, 1968.

8. Bölüm: Kozmoloji

- BARROW, JOHN ve FRANK TIPLER, *The anthropic cosmological principle*. Clarendon Press, Oxford, 1986.
- CARROLL, BRADLEY ve DALE OSTLIE, *An introduction to modern astrophysics*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1996.
- LAYZER, DAVID, *Cosmogogenesis: The growth of order in the universe*. Oxford University Press, New York, 1990.
- PEACOCK, JOHN, *Cosmological physics*. Cambridge University Press, 1999.
- REES, MARTIN, *Just six numbers: The deep forces that shape the universe*. Weidenfeld and Nicolson, Londra, 1999.
- SCHWINGER, JULIAN, *Einstein's legacy*. Scientific American Library, W. H. Freeman, New York, 1986.
- WHEELER, JOHN, *A journey into gravity and spacetime*. Scientific American Library, W. H. Freeman, New York, 1990.

9. Bölüm: Uzayzaman

- BERRY, MICHAEL, *Principles of cosmology and gravitation*. Cambridge University Press, 1976.
- CALLENDAR, CRAIG ve NICK HUGGETT, *Physics meets philosophy at the Planck scale: Contemporary theories in quantum gravity*. Cambridge University Press, 2001.
- D'INVERNO, RAY, *Introducing Einstein's relativity*. Clarendon Press, Oxford, 1992.
- GRAVES, JOHN COWPERTHWAIT, *The conceptual foundations of contemporary relativity theory*. MIT Press, Cambridge, Mass., 1971.
- GREENE, BRIAN, *The elegant universe: Superstrings, hidden dimensions, and the quest for the ultimate theory*. Vintage, Londra, 2000.
- MISNER, CHARLES, KIP THORNE ve JOHN WHEELER, *Gravitation*. W. H. Freeman, San Francisco, 1970.
- PEACOCK, JOHN, *Cosmological physics*. Cambridge University Press, 1999.
- SMOLIN, LEE, *Three roads to quantum gravity*. Weidenfeld and Nicolson, Londra, 2000.
- WEINBERG, STEVEN, *Gravitation and cosmology: Principles and applications of the general theory of relativity*. John Wiley, New York, 1972.

10. Bölüm: Aritmetik

- ATKINS, PETER, *Creation revisited*. Penguin, Londra, 1992.
- BELL, JOHN, *The art of the intelligible: An elementary survey of mathematics and its conceptual development*. Kluwer, Dordrecht, 2001.
- BENSON, DONALD, *The moment of proof: Mathematical epiphanies*. Oxford University Press, 1999.
- IFRAH, GEORGES, *The universal history of numbers: From prehistory to the invention of the computer*. Harvill Press, Londra, 1998.
- JACQUETTE, DALE, ed. *Philosophy of mathematics: An anthology*. Blackwell, Oxford, 2002.
- KATZ, VICTOR, *A history of mathematics: An introduction*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1998.
- NAGEL, ERNEST ve JAMES NEWMAN, *Gödel's proof*. Routledge, Londra, 1958.

PENROSE, ROGER, *The emperor's new mind: Concerning computers, minds, and the laws of physics*. Oxford University Press, 1989.

PENROSE, ROGER, *Shadows of the mind: A search for the missing science of consciousness*. Oxford University Press, 1994.

SHANKER, S. G., ed. *Gödel's theorem in focus*. Routledge, Londra, 1988.

YANDELL, BENJAMIN, *The honors class: Hilbert's problems and their solvers*. A. K. Peters, Natick, Mass., 2002.

Teşekkürler

Bu kitabın bazı bölümlerini okuyarak beni yönlendirdikleri için aşağıdakilere teşekkür ederim:

Profesör Richard Dawkins, FRS (Oxford Üniversitesi)

Profesör Sir Roger Penrose, OM, FRS (Oxford Üniversitesi)

Profesör Sir Martin Rees, FRS (Cambridge Üniversitesi)

Profesör Sir Michael Berry, FRS (Bristol Üniversitesi)

Profesör Lane Hughston (Kings College, Londra),

Rahip John Polkinghorne, KBE, FRS (Cambridge Üniversitesi)

Profesör Michael Rowan-Robinson (Imperial College, Londra) ve

Profesör Alex Wilkie (Oxford Üniversitesi)

Kendilerinin dostane, bilge ve yardımsever katkılarına değer biçilemez. Meslektaşım Nigel Wilson'a (FBA) kitabın başındaki resimli sayfadaki yazının çevirisini sağladığı minnettarım. Editörüm Michael Rodgers'ın usta rehberlik ve teşvikini de anmak isterim.

Çizim Hakları

Çizimlerin hemen hemen hepsini ben çizdim, ama birçoğu başkalarınca yayımlanmış eserlere dayanıyor. Bu yüzden ilham kaynakları olarak aşağıdakileri anmak isterim:

- 1.3, 1.7 *Encyclopedia Britannica*. 15. baskı
- 1.5, 1.6, 1.9, 1.12 Douglas Futuyama, *Evolutionary biology*. Sinaur, Sunderland, Mass., 1998.
- 1.10 Roger Lewin, *Human evolution: An illustrated introduction*. Blackwell Science, Oxford, 1999.
- 2.2, 2.3 David Suzuki, Anthony Griffiths, Jeffrey Miller, Richard Lewontin, *An introduction to genetic analysis*. W.H. Freeman & Co., New York, 1989.
- 2.9 *Life: the science of biology*. William Purves, Gordon Orians ve Craig Heller, Sinauer, Sunderland, Mass., 1992.
- 2.11, 2.16 M. Krawczak ve J. Schmidtke, *DNA fingerprinting*. Bios, Oxford, 1998.
- 2.13 C.K. Mathews ve K.E. van Holde, *Biochemistry*, Benjamin/Cummins, Menlo Park, 1996.
- 4.13 Roger Penrose, *The emperor's new mind*. Oxford University Press, 1989.
- 5.1 William Brock, *The Fontana history of chemistry*. HarperCollins, London, 1992.
- 8.3 NASA, COBE Science Working Group; *Ap. J. Lett.*, 354, L37, 1990.
- 8.7 Bradley Carroll ve Dale Ostlie, *An introduction to modern astrophysics*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1996.
- 8.11 Brian Greene, *The elegant universe*. Vintage, London, 2000.
- 9.3, 9.4 Thomas Banchoff, *Beyond the third dimension*. Scientific American Library, W. H. Freeman & Co., New York, 1990.
- 9.8, 9.13, 9.15, 9.16 John Wheeler, *A journey into gravity and spacetime*. Scientific American Library, W. H. Freeman & Co., New York, 1990.
- 10.1 Georges Ifrah, *The universal history of numbers*. Harvill Press, London, 1998.

Özel kaynaklar şunlar:

Kitabın başındaki (s. 23) resimli sayfadaki fotoğraf: Franca Principe, IMSS.

- 1.2 Halka kuyruklu lemur, örümcek maymunu, şempanze: © Adrian Warren/Oxford Scientific Films; Hint şebegi: © Belinda Wright/Oxford Scientific Films; Yazarın portresi: Studio Edmark.

- 1.4 Dr Jeremy R. Young, Doğa Tarihi Müzesi, Londra.
1.8 Michael Wood.
1.11 Ulusal Bilim Müzesi'nin izniyle, Tokyo.
1.13 Mauricio Anton/Oxford University Press.
1.14 Mauricio Anton/Oxford University Press.
2.1 © James King-Holmes/Science Photo Library.
2.6 © Science Photo Library.
2.17 Cellmark Diagnostics, Abingdon, Oxon.
3.1 Hulton Archive.
3.2 Voyager 1 uzay aracı: NASA/Science & Society Picture Library.
3.4 Science Museum/Science & Society Picture Library.
3.12 Rolls-Royce plc. izniyle.
4.1 Science Museum/Science & Society Picture Library.
4.9 © Astrid & Hanns-Frieder Michler/Science Photo Library.
5.2 Kısa kırıklı analitik terazi, 1876: Science Museum/Science & Society Picture Library; Modern laboratuvar terazisi: County Scales Group izniyle.
5.3 Science Museum/Science & Society Picture Library.
8.8 © Celestial Image Co./Science Photo Library.
9.1 © Thomas Banchoff, Brown University, and Davide P. Cervone, Union College, NY

DİZİN

A

Abderalı Demokritos 174
acayip kuark 234
açısal momentum 118, 119, 189, 191
adenozin
 difosfat 165
 trifosfat 165
ADP 165, 166
AIDS 101
Akıllı Tasarım 30
akraba seçilimi 49
aktüel enerji 121
algoritma 404, 432
algoritmik hesaplama 426
Allah 394
alt familya 20
alt kuark 234
alt şube 20
aminoasit 77, 87, 89-91, 93, 95, 98, 100
Anaksimenes 19
Andromeda bulutsusu 300
antikodon 95, 98
antropoitler 57
a posteriori 420
a priori 90, 305, 420, 421, 439
Arago, F. 259
ardalan ışıması 305, 308, 317
Argoslu Polykleitos 205
Aristoteles 18, 66, 110-112, 173, 175, 298,
 338, 354, 378, 422, 449
aritmetik ex nihilo 440
artık kuvvet 231
Asoka 396
aşağı kuark 234
Aşölyen 60, 62

atom ağırlığı 178, 190, 199
atomaltı parçacık 180, 182, 371
atom hipotezi 176, 177, 178, 212
atom numarası 182, 190, 193, 202
atom yörüngeselleri 185
ATP 165, 166
Austroplithecus 59
Avery, O. 77, 78
ayrıştırmalı (allopatrik) türleşme 32

B

Babilliler 344, 395
Bacon, F. 13, 408
Bateson, W. 73
bazlarda yer değiştirme 100
Beagle 35, 36, 45
Bell, E. T. 410
Bell, J. 289, 290, 291
Bell teoremi 290
Bering Denizi 29
Berry paradoksu 418, 438
Berzelius, J. 196
beyaz cüce 338, 339, 340
birinci mitoz bölünme 76
bir kuvvetin erimi 228
bir yıldızın çalkantılı yaşamı 320
bitişik tekrarlar 104, 105
biyolistik (biyobalistik) 103
biyolojik tür kavramı 23, 24, 25
biyom 56
Blake, W. 109
Bohr, N. 184, 185, 189, 262, 283-285, 287,
 288, 290
Boltzmann, L. 256
Bondi, H. 305
Born, M. 270, 272

Born yorumu 272
Bose, S. N. 227
Boveri, T. 73
Boyle, R. 194
bozon 227, 231, 235, 239, 241-243, 246, 334
Bragg, L. 83, 84
Brahmi yazısı 396
Brand, H. 195
Bravais, A. 214
Bravais kafesi 214
Brenner, S. 93
Bridgewater treatises 35
Brout, R. 240
Brouwer, L. E. J. 421
büyük birleşik kuram 242
Büyük Çekici 303, 308
Büyük insansı maymunlar 20, 58
Büyük Patlama 91, 304, 305, 307, 308, 310, 311, 317, 320, 323, 326-328, 331, 332, 336, 341, 389, 445
Büyük Rift Vadisi 56

C

Cahuilla Yerlileri 19
Calabi, E. 249
Calabi-Yau uzayı 249, 250, 251, 335
Cannizzaro, S. 179, 196
Cantor, G. F. L. P. 408, 409, 411, 412, 414, 423, 429, 431, 435
Carnot, S. 141, 142, 143, 161
Castor ve Pollux 364, 382
Cebir 404
cebirsel denklem 404
cebirsel sayı 398, 408, 410
Cepheid değişkeni 300
Chambers, R. 35
Chargaff, E. 81, 84, 85
Chase, m. 78
Châtelperronian 62

Church, A. 424, 426
Clausius, R. 141, 145, 146-152, 154, 155, 156, 167, 169
Clerk Maxwell, J. 135, 226
Codex Vigilanus 397
Cohen, P. 411
Conrad, J. 371
Copernicus 297, 446
Correns, C. E. 68
Coulomb potansiyel enerjisi 218
CPT değişmezliği 246
Crick, F. 81, 83, 84, 86, 93, 106
Cro-Magnon 63
Cuvier, G. L. D. C. 45

Ç

çalı bebeği 57
çekinik 70, 77
çerçevesi kaymış okumalar 93, 94
çoklu dünyalar yorumu 290
çokluevren 332, 333
çöp DNA 100

D

daimi hareket makinesi 130
dalga boyu 254, 255, 256, 264, 266, 268, 269, 275, 301, 304
dalga fonksiyonu 222, 223, 237, 271, 272-277, 280, 284, 286-290
dalga fonksiyonunun çöküşü 286
dalga mekaniği 268
Dali, S. 353
dallanmış tipler kuramı 418
Dalton, J. 176, 177, 178, 179, 180, 196, 212, 225
Darwin, C. R. 35-40, 45, 54, 56, 65-67, 453
da Vinci, L. 259
Davisson, C. 267
Davy, H. 195, 196
Dawkins, R. 2, 51, 54, 458

de Broglie, Prens L. 262, 266, 267, 268, 269, 271, 274, 294
Debye, P. 261
değişken sayılı bitişik tekrarlar 104
de Sitter, W. 329
determinizm (belirlenimcilik) 286, 287, 295
dev asallar 400
Devoniyen 46, 47
dışarlama ilkesi 191, 222, 223
diğerkâmlık 49
dimorfizm 55
diploit 74, 76, 88
Dirac, P. A. M. 295
DNA genetik parmak izlemesi 103
DNA klonu 102
DNA profillemesi 103
DNA rekombinant 102
doğrusal momentum 116, 117, 187, 275, 370
Doppler etkisi 301, 304
Döbereiner, J. 196, 197
Döbereiner üçlemesi 197, 200, 224, 225, 232
döllenmesiz üreme 53
Dönme momenti 383
dönüşümcülük (transformizm) 30
Drosophila 25, 71
Dryopithecus 58
Dulong, P.-L. 261
durağan evren kuramı 304, 305
dünya çizgisi 361, 362, 364
dürtme yükselteci 293
Düzülke 220
d-yörüngeseli 188, 189, 203
Dyson, F. 13
E
Ebu Abdullah Muhammed bin Musa el-Harizmi 404
Eddington, A. S. 320

Edinilmiş Bağışıklık Eksikliği Sendromu 101
Efesli Heraklitos 173
Egerton, H. 35
Einstein 169, 207, 220, 226, 227, 239, 258-262, 279, 287, 289, 295, 309, 311, 338, 354-359, 369, 372, 373, 375, 376, 382, 383, 384, 387, 388, 392, 432, 440, 456, 457
eklenme mutasyonu 100
ekson 99
Eldridge, N. 32
elektrik enerjisi 124
elektromanyetik 124, 224, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 235, 238-240, 242, 254, 255, 256, 257, 258, 260, 262, 269, 271, 314, 317, 319, 340, 341, 356
elektron 29, 180-194, 202, 203, 220-223, 226-228, 233, 234, 236, 238, 241, 243, 260, 285, 316, 341, 443, 444
elektroporasyon 103
elektrozayıf etkileşim 231
element 172, 173, 177, 182, 190, 193-197, 199, 200, 201, 319, 321
elementlerin periyodikliği 194
elmas kodu 91
 $E = mc^2$ 135, 220, 227
Empedokles 18, 173
Englert, F. 240
Entscheidungsproblem 423, 426, 432
eşevresizlik 288, 292, 294
Eukleides 113, 345, 347, 348, 349, 353, 364, 373, 378, 399, 400, 418, 421, 423
Euler, L. 265, 401, 402
Everett, H. 290, 291
evrenin genişlemesi 136, 313, 323, 338
evrenin kökeni 91, 446
evrenin ölçeği 137, 312, 314, 330
evrensel Turing makinesi 429
evrim 24, 31, 32, 42, 43, 44, 50, 57, 89, 93, 103, 310, 439
ex nihilo 330, 440

Eyfel Kulesi 299

F

Faraday, M. 226, 356

Faulds, H. 103

faz geçişi 331, 332

fenetik 25

fenotip 49, 70

Fermat, P. de 263

Fermi, E. 227

fermiyon 227, 235, 243, 244, 246

feromon 25

Feynman, R. 222, 296

filogenetik 25, 59

filogeni 72

Fisher, R. A. 67, 71

Fitzgerald, G. 357

Fitzgerald-Lorentz büzülmesi 357

fiziksel önem 152, 236, 271

Fleming, W. 72

Fock, W.E. 67

formalizm 424, 438

fotino 243

fotoelektrik etki 239, 260

foton kütsesizliği 227, 239

Fraenkel, A. 414

Franklin, R. 81, 82, 83, 84, 453

Frege, F. L. G. 412-418, 440

Fresnel, A. 259

Friedmann, A. A. 311, 312, 313, 330

friz örüntüleri 210

fructifera 13, 14

G

galaksilerin dağılımı 318

Galapagos adaları 36

Galileo 6, 11-14, 30, 111-113, 120, 299, 353, 355, 356, 441, 443, 450

Gallo, R. 101

Gamow, G. 91

Gauss, F. 378

Gelfond, A. 404

gelgit etkisi 384

Gell-Man, M. 230

gen akışı 24, 50

Genom Projesi 106

genotip 49

geometrik optik 264

Gerbert d'Aurillac 397

gerçek vakum 329, 331

germ hattı mutasyonu 99

Gibon 58

Gibongiller 21, 58

Giotto di Bondone 350

Glashow, S. 239

Gliner, E. 331

gluino 243

gluon 231, 241

Goldbach, C. 401, 411, 422

Gold, T. 305

Gondvana 44

Gorillinae 58

Gould, S. J. 32

Gödel, K. 423, 432-437, 441, 451, 457, 458

Gödel sayısı 433, 434, 435, 436

görelilik

genel görelilik kuramı 376

özel görelilik kuramı 355

görelilikçi kuantum mekaniği 295

görünür evren 304, 310, 311, 324

gösterge kaydı 285

graviton 229, 231

Griffith, F. 78

guanin 80, 81, 84, 86

GUT 242, 319, 334

Guth, A. 331

gülen felsefeci 174

günahtan kurtarıma 56

günberi 387

günberi noktasının devinimi 387

H

Haeckel, E. 72

Haldane, J. B. S. 49

Hamilton, W. 54, 55, 455

Hammurabi 345, 346, 347, 349, 356,
357, 358, 359, 380

haploit 76, 88

Haüy, R. -J. 213

Hawking ışıması 340

Hawking, S. 2, 340, 341

Heisenberg, W. 224, 268, 269, 270, 271,
283, 284

Helmholtz, H. von 127

helyum yanması 322

Hennig, W. 22

Herschel, W. 299

Hershey, A. 78, 79

her şeyin kuramı 423, 443, 451

Hertz, H. 226

HIV 101

Higgs 239, 240, 243, 314

Hilbert, D. 406, 412, 422, 423, 424, 426,
432, 433, 458

Hint şebegi 23, 459

hiperbol 374, 403

hiperküp 351, 353, 382, 383, 412

histon 85, 88

Holosen 47

Homininae 58

Homo

erectus 24

ergaster 60

habilis 59

neanderthalensis 62, 63

rudolfensis 59, 60

sapiens 20, 24, 56, 60, 62, 63

Hooker, J. 38, 299

Hoyle, F. 304, 305

Hubble, E. P. 300, 302, 304, 306, 309,
338

Hubble sabiti 302

Hutton, J. 45

Huxley, T. 37

I

ışık

dalga kuramı 263

hızı 227, 228, 254, 316, 324, 328,
362, 365, 372

yılı 299, 300, 302, 303, 310

ışık konisi 362, 363

İ

iç geçiş metalleri 201

iç simetri 223, 237

ikili sarmal 51, 82, 84, 85, 87, 88

ikizler paradoksu 365

ilksel nükleosentez 319

ince ayar problemi 325

İngiltere Kraliyet Gemisi Beagle 35

İnsan Bağışıklık Yetmezliği Virüsü 101

intron 99, 100, 104

irrasyonel sayı 402, 404, 408, 409, 429,
438

İskenderiyeli Heron 262

izospin 224, 232, 239

J

Jacobson, T. 169

James, E. 283

Java insanı 60

Jeans, J. 320

Jeans kütlesi 320

Jeffries, A. 103

Jeodezik 381

jeodezik boyunca ilerlemek 381

Jiuzhang suanshu 347

Johannsen, W. L. 70

Jordan, P. 270

Joule, J. 129

Jura 28, 47

K

kahverengi cüce 340

kalorik 127, 142, 143, 177, 195

Kambriyen 28, 46, 47

Kant, I. 377, 420, 421, 422, 438, 439

kaotik şişme 331

kara cisim ışıması 256, 258, 308, 341

kara delik 323, 339, 340

karahindiba 24

karar verme problemi 423

karasallık 57

Karbonifer 28, 47

karışmalı kalıtım 66, 68

karmaşık sayı 405, 406, 424

karşılıklı diğerkâmlık (özgecilik) 49

karşı-madde 233

karşı-parçacık 233, 340, 341

karşı-sicim 336, 337

Kashin-Beck sendromu 89

katastrofizim (kıyamet kuramı) 45

kavrama dayalı bilim 13

Kehribar 27

Kelvin 120

Kelvin, Lord 120, 124, 141, 143, 144, 147, 148, 150, 151, 152, 167, 256

kendi kendisine tozlaşma 68

kendinden tutarlı hale gelme patlaması 445

keseliler 43

kesintili denge 32

kırmızı dev 321, 339

kırmızıya kayma 301

kızılaltı ışıma 255

Kızıl Kraliçe hipotezi 43

kimyasal enerji 124, 134, 225

kimyasal özellik 172

kimyasal porasyon 103

kinetik enerji 121, 122, 125, 127, 134, 136, 137

kişisel zaman 358

klad 20, 22, 23, 101

kladistik 20, 23

kladogram 23

klasik mekanik 116, 278, 387

Knidoslu Eudoksos 298

kokolitofor 29

Konik kesitler 374, 397

konumsal düzensizlik 153, 156

Kopenhag yorumu 284

kozmik 48, 135, 154, 228, 244, 251, 298, 303, 305, 308, 309, 311, 323, 332, 340, 363, 389, 449

kozmolojik ilke 304

kozmolojik sabit 338

kör yılan 53

Kraliyet Kurumu 110

Kral Knud 385

Kretase 28, 46, 47

kritik yoğunluk 324, 325

kromatit 74, 75, 76

kromozom 51, 54, 72, 73, 75, 76, 87, 88

Kronecker, L. 391

kronotürler 24, 59

kuantizasyon (nicemleme) 258, 279, 281

kuantum mekaniği 254, 268, 276, 284, 286, 289, 290, 292, 295, 404

kuark 230, 231, 233-235, 241, 243, 314

Kuaterner 46, 47

kuram

bilinç 447

her şeyin 423, 443, 451

tipler 417, 418

Kuran 173

kuyruğu kordalılar 33

kütleçekim 122, 137, 169, 228, 229, 384, 445

L

Lagrange, J. L. 265
Lamarck, J. B. de M. 33, 34
Lander, E. 107
Latino sine flexione 413
Lavoisier, A. L. de 128, 176, 194, 195
Lavrasya 44
Leakey, L. 59, 60
Leavitt, H. 300
Leclerc, G. -L., Comte de Buffon 18
Leibnitz, G. 398
Lemaître, Abbé G. 311
lemur 459
lepton 233, 334
levha tektoniği 27
Lewis, G. N. 227
ligaz 102
Linnaeus 20, 21, 22, 38
Linné, C. von 20
litosfer 27
Lorentz, H. 357
loris 57
Lowell Gözlemevi 300
Löwenheim-Skolem teoremi 404
lucifera 13, 14
Lucretius 175
Lyell, C. 38, 45

M

MACHO 326
madde dalgası 271
madde karşı-madde karşılaştırması 334
makroevrim 31
Malthus, T. 37, 38, 40
man kedisi 72
mantıkçı okul 416
manyetik tek kutup 326
matematiksel
ontoloji 393

tümevarım 413
matris mekanığı 268
Matthaei, H. 94
Maupertuis, L. M. de 264, 265
Maxwell, C. 135, 226, 231
Maya yılı 395
mayoz 51, 54, 74, 75, 104
mayoz rekombinasyon 51
Melville, H. 36
Mendel, G. 40, 66-73, 77, 106, 108, 432, 453
Merkür 386, 387, 450
Mersenne asalı 400
mesajcı parçacık 227, 228
mesajcı RNA 95, 97
metamatematik 424, 433
mikrodalga ardalan ışıması 308
mikroenjeksiyon 103
mikroevrim 31
Miletli Anaksimandros 19
Miletli Leukippos 174
Milmaki 19
Minkowski, H. 359-361, 364, 375, 376
mitoz 74, 76, 87, 88
Miyosen 47, 58
M-kuramı 248, 250, 251, 336
modern sentez 39
moleküler genetik saat 100
momentumenerji 370
Mommensen, T. 396
Monge, G. 350
Montagnier, L. 101
morötesi ışıma 255
Moseley, H. 183
Mozart 206
Mullis, K. 104
Musteryen 62
mutasyon 51, 53, 55, 71, 99, 100
mutlak hareket özgürlüğü 264
mutlak hiçlik 329

mutlak uzay 354

N

Nagaoka, H. 184

Nägeli, K. W. von 71

Neandertal 62

Nenizili Gregor 19

Neojen 47

Neumann, J. von 440

Newlands, J. 196

Newton, I. 112-116, 118, 120, 121, 125, 126, 130, 254, 258, 259, 262, 265, 266, 268, 313, 353-355, 359, 372, 387, 388

Nirenberg, M. 94

Noether, E. 217, 218

nötrino 233, 243, 315, 316

nötron 182, 190, 223, 224, 227, 229, 232, 234, 239, 240, 314, 316, 319, 322, 339, 371

nötron yıldızı 322

Nuh tufanı 45

Nuh'un gemisi 43

nükleer

enerji 124

fisyon (bölünme) 371

füzyon 318

nükleon 319

nükleosentez 319, 322

nükleotit baz 51, 80, 86, 93, 101, 104, 106

O

Olbers, H. W. 306, 307, 317

Oligosen 44, 46, 47, 57

omurgasızlar biyolojisi 33

On the origin of species [Türlerin Kökeni Üzerine] 38

ontoloji 72, 393

orangutan 59

Ordovisyan 28, 46, 47

Orinyasiyen 64

orojenez (dağ oluşumu) 27

ortogonal (dikey) 209

Oughtred, W. 398

ova çekirgesi (*Brachystola magna*) 73

Owen, W. 183

Ö

Öklit-dışı geometri 348

örtüşümlü şifre 91

özel görelilik kuramı 355

özgün hareketi 303

P

Paleojen 47

paleontoloji (fossilbilim) 24, 26

Paleosen 44, 46, 47, 57

Paley, W. 19, 33

parabol 373, 403

paralel evrenler 290, 291

parazit 40, 54

parçacık hızlandırıcı 201, 225

parça değişimi 76

parite korunumu 245

partenogenez 53

partenokarpi 53

Pauli dışarlama ilkesi 202, 222, 223

Pauling, L. 84

Pauli, W. 191, 246

PCR 102, 104, 105

Peano belitleri 413, 433

Peano, G. 412, 413, 417, 433

Pelion ve Ossa 299

Penrose, R. 2, 167, 439, 458, 459

Penzias, A. 307

Pergamonlu (Bergamalı) Galen 205

periyodik tablo 198, 200, 202, 221

Permien 46, 47

permütasyon simetrisi 222

Perutz, M. 84

Petit, A. -T. 261

Piero della Francesca 350, 353

Piltown sahteciliği 59
 pirimidin 80, 82, 85
 Pisagorcular 402
 Piskopos Ussher 310
 Planck
 kütlesi 247
 sabiti 228, 257, 266, 270
 sıcaklığı 313
 uzunluğu 247, 309, 388
 zamanı 310, 313, 388
 Planck, T. 68
 Platon 22, 175
 Platoncu gerçekçilik 425, 438
 plazmid 102
 pleiotropik 71
 Pleistosen 47
 Pliyosen 47
 Poisson noktası 259
 Poisson, S. D. 259
 polimeraz zincirleme tepkimesi 104
 polimorfizm (çokbiçimcilik) 104
 polipeptit 87, 89, 96
 pongidae 21
 pongo 58
 Popper, K. 450
 potansiyel enerji 123, 124, 125, 127, 134, 136, 137, 218, 220, 279, 280
 pozitivizm 234, 284
 pozitron 234, 334, 341
 primatlar 20, 21, 57
principia mathematica 113, 354
Proconsul 58
 prosimian (önmaymun) 57
 proteaz 78
 protein 26, 27, 78, 83, 87-90, 93, 96, 98, 100
 proton 182, 190, 223, 224, 229, 231, 232, 239, 240, 241, 247, 316, 319, 322, 340, 371
 psödogen 31

Ptolemaios (Batlamyus) 297
 pürin 80, 82, 85
 p-yörüngeseli 188, 189, 193, 218
 Pythagoras (Pisagor) 344, 345, 347, 349, 359, 392, 402

Q

quintessence (beşinci öge) 173

R

radyo dalgaları 226
Ramapithecus 59
 Rankine, W. M. 124
 rasyonel sayı 398, 401, 402, 406, 407, 408
 Recorde, R. 399
reductio ad absurdum 422
 reel sayı 402, 403, 405, 409, 410
 rekombinant DNA 102
 restriksiyon enzimi 101
 retrovirüs 101
 ribonükleik asit 96
 ribozom 96, 97, 98
 Riemann, B. 378
 Riemann hipotezi 423
 RNA polimerazı 97
 Roma rakamları 395
 Rosetta Taşı 110
 Rumford, Kont (Thompson, B.) 128
 Rutherford, E. 180, 184

S

sağ el kullanımının yeğlenmesi 244
 sağ ellilik 84, 244, 245
 sahte vakum 329, 331
 Sakharov, A. 334
 saklı değişkenler 289, 290, 291
 Salam, A. 239
Salvasutras 347
 Samoslu Epikuros 174

- sanal parçacık 228
 Sanger, F. 90, 107
 santral dogma 98
 sayı
 asal 423, 433
 aşkın 404, 405, 410
 cebirselsel 398, 404, 408
 doğal 400, 406, 421
 Gödel 433, 435, 436
 irrasyonel 404
 karışık 405, 406, 424
 rasyonel 398, 401, 402, 406, 407, 408
 reel 402, 405, 409, 410
 sanal 405
 sonlu-ötesi 410
 Schrödinger
 denklemleri 237, 271, 273, 292
 kedisi 286, 287
 Schrödinger, E. 185, 268
 Schwarzschild
 çözümü 383, 384
 yarıçapı 383
 Schwarzschild, K. 383
 Sedgwick, A. 73
 seksüel dimorfizm 55
 selektron 243
 semender 72, 88
 sentetik *a priori* önerme 420
 sentetik önerme 420
 sentromer 75
 serbest düşüş 322
 sezgicilik 420, 438
 Shelley, P. B. 297
 sıfır noktası titreşimleri 247
 sicim kuramı 246, 248, 249, 335, 450
 Sidney, P. 109
 silikon yanması 321
 silinme mutasyonu 100
 Silüryen 46, 47
 simetri işlemi 206, 208, 218
 simetri kırınımı 220, 239, 243, 334, 335
 simplezyomorfiler 22
 sinapomorfiler 22
 sitoplazma 75
 sitozin 80, 81, 84, 86
Sivapithecus 58, 59
 Skolem, T. 403, 404
 skuarık 243
 Slipher, V. 300, 301
 Snow, C. P. 139
 snötrino 243
 SO(3) 209
 solipsizm (tekbencilik) 421
 somatik mutasyon 99
 sonlu-ötesi sayı 410
 Sosyal Darwincilik 40
 soy gaz 194
 soyiçi tedricilik 31
 sparçacık 326
 Spencer, H. 40
 spin 22, 191, 222, 224, 227, 229, 241, 243, 251, 444
 Stefan-Boltzmann yasası 256
 Stefan, J. 256, 257
 SU(2) 209, 239, 241, 242
 SU(3) 209, 241, 242
 SU(5) 242
 Sutton-Boveri kuramı 73
 Sutton, W. 73
 süpernova 322, 323, 338
 süpersarım 85, 88
 süpersicim kuramı 246
 süpersimetri grubu 243
 süpersimetrik eş 243
 süreklilik hipotezi 410
 s-yörüngeseli 186, 188, 189, 190, 193, 218
 Szent-Györgyi, A. 144

Ş

şempanze 23, 58, 61, 73
şişme alanı 329, 330

T

takson 22, 24, 31
tarama tünelleme mikroskobu 179
taşıyıcı RNA 95, 96, 97, 98
tedricilik 31, 32
tektonik 28
Teller, E. 400
telomer 75
termodinamik 135, 139, 141, 143, 147, 151,
155, 159, 163, 167, 260, 372
Tersiyer 46, 47, 57
ters transkriptaz 101
Thales 19, 172, 173
Thompson, B. (Kont Rumford) 128
Thomson, G. P. 267
Thomson, J. J. 180, 267
Thomson, W. (Lord Kelvin) 120, 141, 143
tılsım kuark 234
tipler kuramı 417
tipolojik taksonomistler 22
Titanlar 299
T-lenfosit 101
tork 118, 119
Torres Boğazı Adaları'nda yaşayanlar
394
transkriptaz 101
Trias 46, 47
Turing, A. M. 426
Turing makinesi 426, 427, 428, 430, 436
Turkana Çocuğu 60, 61
türlerin kökeni 22, 38
türün menfaati 50

U

U(1) 237, 238, 239, 241, 242
ufuk problemi 324, 327

Ulam, S. 400

Ulam sarmalı 401

Ussher, Piskopos 310

uzay gemisi 358

uzayzaman 15, 126, 168, 248, 341, 343,
360, 361, 363, 364, 369, 373, 375, 376,
381-386, 388, 389

Ü

üçlü şifre 90
üçüncü halin olanaksızlığı 422
üniformitarianizm (tekdüzecilik) 45
üst familya 20

V

vakum 329, 330, 331
vektör bozonu 236
Vela 323
Venter, C. 107
Vinogradov, I. M. 401
virgülsüz şifre 94
VNTR 104
volan 118, 119
Voyager 1 ve 2 115, 460
Vries, H. de 68

W

Waldeyer, W. von 72
Walker, A. G. 383
Wallace, A. R. 37, 38, 39
Wallis, J. 397
Watson, J. D. 81, 83, 84, 86, 106
Wegener, A. 27
Weinberg, S. 239
Weismann, A. 34
Wheeler, J. 222, 445, 446, 459
Whitehead, A. N. 416, 417, 433
WIMP 326
Wien, W. 256, 257
Wigner, E. P. 392, 440

Wilkins, M. 81, 82, 83, 84
Williams, G. 51
Wilson Dağı Gözlemevi 299
Wilson, R. 307
Wino 243
W parçacığı 239

X

X ayar bozonu 334
X ışını 81, 82, 83, 84

Y

Yahuna Yerlileri 18
yakınsak evrim 43
yapay bilinç 448
yaratılışçılık 30
yarasaların yön bulması 269
Yau, S. -T. 249
yeğın kuvvet 226, 229, 231, 232, 235, 242,
313, 314, 319

yerel olmayan saklı değişkenler 290
yerel saklı değişkenler 290, 291
Yerkes, C. 299
yin ve yang 172
Young, T. 110, 121
yörüngesel yol 184
yük eşlenikliği 246
Yüksüz K mezonları, kaonların bozu-
numu 245

Z

Zaman-simetrik evren 245
zaman tersinirliği değişmezliği 245
zarif çıkış 332
zayıf kuvvet 229, 242, 314
Zermelo, E. 414
Zermelo-Fraenkel kuramı 414
Zino 243
Z parçacığı 239
Z vektör bozonu 231



Fotoğrafta Galileo'nun sağ elinin orta parmağı görölmektedir. Ölümünden bir yüzyıl kadar sonra vücudundan kopartılarak tutkulu hayranlarına gösterilmeye başlanmıştır. Bugün de Floransa'daki Bilim Tarihi Müzesi'nde sergilenmektedir.

*Atkins karmaşık ilkeleri çok açık hale getirme hünerine sahip... Bu kitap, bilimi hep daha derinden kavramak istemiş ama nereden başlayacağını bilememiş, bilimin dışından zeki insanlar için mükemmel bir rehber."

Mark Henderson, The Times

*[Atkins] en büyük bilimsel fikirleri... güvenilir bir biçimde açıyor."

The Independent

*...Genel okurun modern bilimin esaslarını anlaması için gereken her şey. Önemli her şey var burada... Bilim insanı değilseniz de okumalı mısınız? Evet... işlenen malzemenin genişliği ve özgünlüğü açısından Galileo'nun Parmağı gerçek bir model ve bildiğim kadarıyla böylesi başka bir yerde yok."

Times Yüksek Öğrenim Eki

*Çok sayıda sade çizimle süslenmiş, kolay anlaşılan, hoş bir yazı dili kullanarak Atkins matematiksel birikime sahip olmayan okurlarına bilimsel disiplinlerin derin kavramsal temellerini aktarmayı genellikle nefis başarıyor... Zarif stili, çok geniş kapsama alanı ve kafa karıştırıcı muğlaklıkların nadir görülen bir yüksek oranda aydınlatıcı şekilde açıklanması bu kitabı kendi türünün en iyilerinden birisi yapıyor."

Publishers Weekly Online

*... kozmolojiden, atomaltı "kuantum" diyarlarında, hayatın evriminden ve matematiğin hem doğanın bütünündeki hem de insan zihnindeki öneminden geçen derin bağlantıları alışılmadık bir netlikle açıklıyor. Bilim alanı dışından okurlara bu konuların derli toplu bir aktarımını yapmak zaten yeterince zor. Fikirlerin uyandırdığı heyecan, doğurduğu karmaşa ve drama duygusunu aktarırken büyük bir senfoninin orkestra şefliğini yapmayı başarmasıysa büyük bir başarı. Bilim ve matematiğe genel bir bakış sahibi olmak isteyen herkesin eline bu kitabı tutuşturmak istiyorum... Bu kitap, doğanın bize sunduğu olağanüstü simetri, incelik ve gizeme panoramik bir bakış yönünden en iyi işlerden biri.

John Cornwell, Sunday Times

"Nobel Edebiyat Ödülü bir bilim insanı tarafından hiç kazanılmadı. Bence bunun vakti geldi de çattı ve eğer bir aday önerecek olsaydım, benimki Peter Atkins olurdu."

Richard Dawkins

Gen Bencildir (The Selfish Gene) ve Gökkuşağını Çözmek'in (Unweaving the Rainbow) yazarı.



Patika : 27
Bilim : 02

34 TL

ISBN-13: 978-6058378377



9 786058 378377