

BRIAN GREENE

EVRENİN *Dokusu*

uzay, zaman ve
gerçekliğin dokusu



TÜBİTAK
POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

Evrenin dokusunu oluşturan uzay ve zaman... En gizemli kavramlar.

Uzay bir varlık mı? Neden zamanın bir yönü var? Uzay ve zaman olmadan evren olabilir miydi? Geçmişe dönebilir miyiz?

Brian Greene bizi Newton'un uzayı ve zamanı değişmez gören anlayışından Einstein'ın akışkan uzay-zaman kavramına, kuantum mekaniğinin birbirlerinden çok uzaktaki cisimlerin davranışlarını anında birbirlerine göre belirledikleri "dolanık" uzayına doğru gerçekten de aydınlatıcı bir yolculuğa çıkarıyor. Yani gerçekliğin, fizikçilerin gündelik dünyamızın hemen altında yatmakta olduğunu keşfettiği, yeni katmanlarına.

Evrenin Dokusu aynı yazarın daha önce yayımladığımız *Evrenin Zarafeti* adlı kitabını tamamlar nitelikte.

İçindekiler

Önsöz	I

1 Gerçekliğin Alanı

I. Bölüm	
Gerçekliğe Giden Yollar	3
II. Bölüm	
Evren ve Kova	29
III. Bölüm	
Görelilik ve Mutlak	49
IV. Bölüm	
Dolanık Uzay	95

2 Zaman ve Yaşananlar

V. Bölüm	
Donmuş Nehir	155
VI. Bölüm	
Olasılık ve Ok	175
VII. Bölüm	
Zaman ve Kuantum	217

3 Uzay-Zaman ve Kozmoloji

VIII. Bölüm	
Kar Taneleri ve Uzay-Zaman Hakkında	267

IX. Bölüm	
Boşluğun Buharlaşması	305
X. Bölüm	
Patlama'nın Çözümlemesi	331
XI. Bölüm	
Elmaslarla Bezeli Gökyüzündeki Kuantumlar	369
4 Kökenler ve Birleşme	
XII. Bölüm	
Bir Sicimin Üzerindeki Dünya	395
XIII. Bölüm	
Zar Üzerindeki Evren	453
5 Gerçeklik ve Hayal Gücü	
XIV. Bölüm	
Yukarıda Göklerde ve Aşağıda Yerde	499
XV. Bölüm	
Tele-Taşıyıcılar ve Zaman Makineleri	525
XVI. Bölüm	
Bir Anıştırmanın Geleceği	565
Notlar	595
Sözlük	635
Dizin	639

Önsöz

Uzay ve zaman, hayal gücünü başka hiçbir bilimsel konuya benzemeyen bir biçimde esir alır. Boşuna değil. Bunlar gerçekliğin alanını, evrenin en temel dokusunu oluşturur. Tüm varlığımız -yaptığımız, düşündüğümüz ve yaşadığımız her şey- uzayın belirli bir bölümünde ve belirli bir zaman diliminde gerçekleşir. Ama bilim hâlâ uzayın ve zamanın aslında ne olduğunu anlamaya çalışıyor. Bunlar gerçek fiziksel varlıklar mı, yoksa yalnızca yararlı fikirler mi? Eğer gerçeklerse temel yapılar mı, yoksa daha da temel bileşenlerden mi oluşuyorlar? Uzayın boş olması ne anlama geliyor? Zamanın bir başlangıcı var mı? Ortak deneyimlerimizin gösterdiği gibi, geçmişten geleceğe doğru karşı konulmaz biçimde akan bir yönü var mı? Uzay ve zaman üzerinde etki oluşturabilir miyiz? Bu kitapta, tutkuyla yürütülen üç yüzyıllık bilimsel araştırmaları izleyerek, evrenin doğası hakkındaki böylesine basit ama derin soruların yanıtlarını ya da bu yanıtlara ilişkin ipuçlarını bulmaya çalışacağız.

Bu yolculuk bizi tekrar tekrar konuyla yakından ilişkili, kapsayıcı olduğu kadar anlaşılması zor bir soruya götürüyor: Gerçeklik *nedir*? Biz insanlar yalnızca algılama ve düşünce gibi içsel deneyimlere sahip olduğumuza göre, bunların dış dünyayı doğru yansıttığından nasıl emin olabiliriz? Filozoflar çok uzun zamandır bu sorunun farkındaydı. Film yapımcıları, bu soruyu yalnızca kahramanlarının zihninde var olan, çok iyi ayarlanmış sinirsel uyarımlarla yaratılan yapay dünyaları kapsayan olay dizileri aracılığıyla yaygınlaştırdılar. Benim gibi fizikçiler de, gözlediğimiz gerçekliğin -uzay ve zaman sahnesinde evrilen madde-dışarıdaki gerçeklikle, o da eğer varsa, ilgisiz olabileceğinin çok iyi farkındadır. Yine de elimizde yalnızca gözlemlerimiz olduğu için, onları ciddiye alırız. Sınırsız düş gücü ve fasılasız bir kuş-

kuculuk yerine sağlam verileri ve matematiksel çerçeveyi kılavuz olarak seçiyor, bugünkü ve gelecekteki deneylerin sonuçlarını öngörme ve açıklama kapasitesine sahip, en basit ama kapsamı en geniş kuramları araştırıyoruz. Bu da peşlerinden gittiğimiz kuramları ciddi bir biçimde sınırılıyor. (Bu kitapta, örneğin benim şimdi içi su dolu bir tankta, beynime binlerce uyarıcı tel bağlı olarak yüzmekte olduğumu ve yalnızca bu metni yazdığımı *düşündüğümü* gösteren hiçbir ipucu bulamazsınız.) Ama geçen yüzyılda fizik alanında yapılan keşifler, gündelik gerçekliği kavrayışımızda yaratıcı bilim kurgu ürünleri kadar olağandışı, akıl almaz ve paradigma sarsıcı değişiklikler yapmamızı gerektirmiştir. izleyen sayfalaradaki gezintimizin çerçevesini bu devrim niteliğindeki değişiklikler belirleyecektir.

Cevabını bulmaya çalışacağımız sorular çağlar boyunca değişik biçimlerde Aristoteles, Galileo, Newton, Einstein ve daha başka sayısız bilim insanını uğraştıran sorularla aynıdır. Bu kitap, bilimin yapılmakta olduğu sırada neler olduğunu aktarmayı amaçladığından, bu soruların bir kuşak tarafından nasıl "cevaplandı" diye nitelendiğini, izleyen kuşaklarca nasıl altüst edildiğini ve sonraki yüzyıllarda yaşayan bilim insanlarının nasıl geliştirilip yeniden yorumlandıklarını izleyeceğiz.

Örneğin boş uzayın, tıpkı boş bir tuval gibi, gerçek bir varlık mı yoksa sadece soyut bir fikir mi olduğu gibi karmaşık bir sorunun nasıl ele alındığını bilimin tarihsel sarkacında göreceğiz: On yedinci yüzyılda Isaac Newton uzayın gerçek olduğunu ilan etmiş, on dokuzuncu yüzyılda Ernst Mach gerçek olmadığı sonucuna varmış, yirminci yüzyılda ise Einstein uzayı ve zamanı birleştirerek sorunun kendisini tamamen yeniden biçimlendirmiş ve Mach'ın büyük ölçüde hatalı olduğunu göstermiştir. Bunu, "boş" kavramının anlamını yeniden tanımlayarak soruyu bir kez daha dönüştüren, yani uzayın kaçınılmaz olarak kuantum alanları denen alanlarla ve belki de kozmoloji sabiti adı verilen dağınık, tekbiçimli bir enerjiyle dolu olduğunu -eski ve artık itibar görmeyen, uzayı doldurduğu varsayılan *esir* kavramının modern yansımaları- öne süren keşifler izliyor. Dahası yakında

uzayda yapılacak deneylerin, Mach'ın elde ettiği, Einstein'ın genel görelilik kuramı ile uyuşan bazı sonuçlarını kanıtlayabileceğini anlatarak bilimsel ilerlemenin olağanüstü ve karmaşık ağına bir örnek vereceğiz.

Kendi çağımızda ise şişme kozmolojisinin bize kazandırdığı zamanın okuna dair kavrayışlara, sicim kuramının fazladan uzamsal boyut çeşitlerine, M-kuramının yaşadığımız uzayın daha büyük bir evrende yüzen bir kıymığa benzediğı önerisine ve gördüğümüz evrenin kozmik bir hologramdan başka bir şey olmayabileceğı yolunda çılgınca kurgulara rastlıyoruz. Henüz bu yeni kuramsal önermelerin doğru olup olmadığını bilmiyoruz. Ama bize tuhaf gibi görünseler de, bu kuramları ayrıntılı olarak araştırıyoruz, çünkü evrenin en derinlerde yatan yasaları hakkındaki ısrarlı araştırmalarımız bizi bu kuramlara yönlendiriyor. Garip ve bize tanıdık gelmeyen bir gerçeklik yalnızca bilim kurğunun verimli düş gücünden değil, modern fiziğın en son buluşlarından da kaynaklanabilir.

Evrenin Dokusu esas olarak çok az bilim eğitimi almış ya da hiç almamış, ama evrenin işleyişini anlamaya duydukları istek sayesinde bir çok karmaşık kavramla uğraşma cesareti bulan genel okuyucuya yöneliktir. İlk kitabım *The Elegant Universe*'te^o (*Evrenin Zarafeti*) olduğı gibi, temel bilimsel fikirlerden uzaklaşmadım, ama matematiksel ayrıntılar yerine benzetmeler, öyküler ve şekiller kullanmayı tercih ettim. Kitabın en zor bölümlerine geldiğimizde okuyucuyu önceden uyardım ve daha karmaşık konuların ele alındığı bu bölümleri atlamak ya da yalnızca şöyle bir bakıp geçmek isteyen okuyucu için kısa özetler koydum. Böylece, okuyucu keşifyolunda yürürken yalnızca çağdaş fiziğın dünyaya bakışı konusunda bilgilenmekle kalmayacak, bu dünya görüşünün nasıl ve neden diğerlerine üstünlük sağladığını da anlayacak.

Öğrenciler, popüler bilim kitaplarını hevesle okuyanlar, öğretmenler ve profesyoneller de bu kitapta ilgilenecekleri konular

* *Evrenin Zarafeti*, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, 2008.

bulacak. Her ne kadar ilk bölümler görelilik ve kuantum mekaniğiyle ilgili standart ama gerekli bazı temel konuları kapsıyorsa da, uzay ve zamanın fiziksellikğine basmakalıp bir biçimde odaklanan bir yaklaşım içermiyor. Sonraki bölümlerde pek çok konu ele almıyor (Bell teoremi, geciktirilmiş seçim deneyleri, kuantum ölçümü, ivmelendirilmiş genişleme, gelecek kuşak parçacık hızlandırıcılarında kara delik oluşturulması olasılığı, solucan deliklerinden oluşan düşsel zaman makineleri bu konulardan bazıları). Böylece okuyucular başlangıçta umut verip sonra gerçekleştirmemiş, çok tartışılmış bazı konuları da öğrenecek.

Burada ele aldığım konulardan bazıları tartışmalıdır. Havada kalan bu konularla ilgili olarak farklı bakış açılarına ana metinde yer verdim. Üzerinde az çok fikir birliğine varıldığını düşündüğüm tartışmalı konularla ilgili farklı bakış açılarına ise notlar bölümünde yer verdim. Bazı bilim insanları, özellikle de savundukları görüş açısından azınlıkta olanlar, bazı fikirlerimden rahatsız olabilirler, ama ana metinde olsun notlarda olsun, dengeli bir yaklaşım göstermeye çalıştım. Notlar bölümünde, özellikle çalışkan okuyucular, basitleştirdiğim konulara ilişkin tamamlayıcı açıklamaları ve dikkat edilmesi gereken noktaları bulacaklar; matematiğe ilgi duyan okurlar da hiç denklem kullanmadığım ana metni tamamlayan kısa, matematiksel açıklamalar bulacak. Arkadaki kısa sözlük, bazı bilimsel terimler için bir başvuru kaynağı olarak düşünüldü.

Bu uzunlukta bir kitap bile uzay ve zaman gibi büyük konuları baştan sona incelemeye yetmiyor. Hem modern bilimin ortaya koyduğu haliyle gerçekliği tam olarak anlamak için gerekli olan hem de heyecan verici bulduğum konulara odaklandım. Kuşkusuz bu seçimlerden çoğu benim kişisel tercihlerimi yansıtıyor, bu nedenle çalışmalarına veya ilgilendikleri alanlara kitapta yeterince yer verilmemiş olduğunu düşünenlerden özür dilerim.

Evrenin Dokusu'nu yazarken bazı adanmış okuyucuların değerli geribildirimlerini alma şansım oldu. Raphael Kasper, Lubos Motl, David Steinhardt ve Ken Vineberg el yazmasının değişik biçimlerini, bazen tekrar tekrar okuyup sunumun hem an-

laşılır hem de doğru olmasına katkıda bulunan ayrıntılı ve sezgi dolu önerilerde bulundular. Onlara içten teşekkürlerimi sunuyorum. David Albert, Ted Baltz, Nicholas Boles, Tracy Day, Peter Demchuk, Richard Easter, Anna Hall, Keith Goldsmith, Shelley Goldstein, Michael Gordin, Joshua Greene, Arthur Greenspoon, Gavin Guerra, Sandra Kauffman, Edward Kastenmeier, Robert Krulwich, Andrei Linde, Shani Often, Maulik Parikh, Michael Popowits, Marlin Scully, John Stachel ve Lars Straeter de el yazmasının bir bölümünü ya da tamamını okudular, onların önerileri de çok yararlı oldu. Andreas Albrecht, Michael Bassett, Sean Carrol, Andrea Cross, Rita Greene, Wendy Greene, Susan Greene, Alan Guth, Mark Jackson, Daniel Kabat, Will Kinney, Justin Khoury, Hiranya Peiris, Saul Perlmutter, Koenraad Schalm, Paul Steinhardt, Leonard Susskind, Neil Turok, Henry Tye, William Warmus ve Eric Weinberg ile yaptığım konuşmalardan çok yararlandım. Özgün tartışmalar konusunda keskin bir duyuya sahip olan ve çeşitli çalışmalarımı eleştirmekteki istekliliği benim için çok değerli olan Raphael Gunner a özel bir teşekkür borçluyum. Kitabın basım aşamasında Eric Martinez yorulmak bilmeden önemli yardımlarda bulundu, Jason Servers ise çizimlerde harika bir iş çıkardı. Temsilcilerim Katinka Matson ve John Brockman'a teşekkür ediyorum. Desteği, tavsiyeleri ve kitabın kalitesini önemli ölçüde artıran keskin sezgileri ve öngöruları için editörüm Marty Asher'e minnet borçluyum.

Meslek yaşamım boyunca Enerji Bakanlığı, Ulusal Bilim Vakfı ve Alfred P. Sloan Vakfı araştırmalarımı destekledi. Desteklerini burada şükranla anıyorum.

1

Gerçekliğin Alanı

I. Bölüm

Doğanın Armağanları

Uzay, Zaman ve Her Şeyin
Böyle Oluşunun Nedeni

Babamın eski, tozlu kitaplığındaki hiçbir kitap yasak değildi. Ama gene de çocukluğumda hiç kimsenin oradan bir kitap aldığını görmedim. Çoğu -kapsamlı bir uygarlık tarihi, batı edebiyatına ait cilt cilt büyük eserler, ve şimdi hatırlayamadığım diğerleri- zamanla aşağıya doğru bel veren raflara kaynamış gibi görünen kalın ciltli, kocaman kitaplardı. Ama en üst rafta ara sıra gözümün takıldığı ince bir kitap vardı. Sanki devler ülkesindeki Gülliver gibi yerine yabancı dururdu. Şimdi düşününce o kitaba göz atmak için neden o kadar bekledim, bilmiyorum. Belki de yıllar içinde, kitaplar okunmak için yapılmış nesneler değil de, uzaktan bakılan aile yadigârı eşyalar gibi görünmeye başlamıştı. Sonunda o saygı yerini bir yeni yetme düşüncesizliğine bıraktı. Kitaba uzandım, tozlarını silkeledim ve birinci sayfayı açtım. İlk satırlar, en hafifinden ürkütücüydü.

"Gerçekten felsefi olan yalnızca bir sorun vardır, o da intihar-
dır." diye başlıyordu metin, irkildim. "Dünyanın üç boyutu olup
olmadığı veya zihinde dokuz kategori mi yoksa on iki kategori
mi olduğu daha sonra gelir." diye sürüyordu. Metne göre böyle-
si sorular insanlığın oynadığı oyunun bir parçasıydı, ama ancak
o tek gerçek konu yerli yerine oturtulduktan sonra üzerlerinde
düşünlmeyi hak ediyorlardı. Kitap *Sisyphos Söyleni* idi. Ceza-
yir doğumlu, Nobel Edebiyat Ödülü nı kazanmış bir düşünür
olan Albert Camus tarafından yazılmıştı. Bir an sonra bu buz
gibi sözler kavrayışın sıcaklığı altında eridi. Tabii, öyle ya, di-
ye düşündüm, isterseniz çıkmaz ayın son çarşambasına kadar şu
konu üzerinde düşünüp bu konuyu analiz edebilirsiniz, ama asıl
soru, düşüncelerinizin veya analizlerinizin sizi hayatın yaşanma-
ya değer olduğuna ikna edip edememesidir. Her şeyin gelip da-
yandığı nokta budur. Geri kalan her şey ayrıntıdır.

Camus'nün kitabıyla şans eseri karşılaşmam, kolayca etki al-
tında kaldığım bir döneme rastlamış olmalı, çünkü onun bu söz-
leri okuduğum her şeyden daha çok aklımda kaldı. Zaman za-
man, karşılaştığım, adlarını duyduğum, televizyonda gördüğüm
çeşitli insanlar bu en temel soruyu nasıl cevaplardı diye düşü-
nürdüm. Geriye baktığımda, aslında, kitaptaki bilimsel ilerle-
meye ilişkin ikinci iddianın benim için özellikle önemli olduğ-
nu fark ediyorum. Camus, evrenin yapısının anlaşılmasının de-
ğerli olduğunu kabul ediyordu, ama anlayabildiğim kadarıyla,
bu kavrayışın, hayatın yaşamaya değer olup olmadığı konusun-
daki değerlendirmemizi değiştirebileceği olasılığını reddediyor-
du. Tabii benim ilkgençliğimde varoluşçu felsefe okumam, Bart
Simpson'ın romantik dönem şiirleri okuması gibiydi, ama yine
de Camus'nün vardığı sonuç bana pek doğru gelmemişti. Tut-
kulu bir fizikçi adayı olarak bana göre, hayatı bilgiye dayanarak
değerlendirebilmek için önce hayatın yaşandığı alanı, yani evre-
ni tam olarak anlamak gerekirdi. Türümüz eğer yeraltındaki ka-
yalara oyulmuş mağaralarda yaşasaydı ve daha yerkürenin yü-
zeyini, parlak güneş ışığını, okyanus rüzgârlarını ve uzaklarda-
ki yıldızları keşfetmemiş olsaydı veya evrim farklı bir yol izle-

miş olsaydı da dokunma duyumuz dışında hiçbir duyumuz gelişmemiş olsaydı, bildiğimiz her şey sadece çevremizdeki şeylerle dokunarak öğrendiklerimizle sınırlı olsaydı veya zihinsel gelişimimiz çocukluğun ilk evrelerinde durmuş olsaydı da duygusal ve analitik yeteneklerimiz beş yaşındaki bir çocuğunki kadar olsaydı -kısaca deneyimlerimiz bize gerçekliğin çok eksik bir portresini sunsaydı- hayatı değerlendirme biçimimiz tamamen farklı olurdu, diye düşündüğümü hatırlıyorum. Sonunda yeryüzüne çıktığımızda veya görmeye, işitmeye, tat ve koku almaya başladığımızda veya zihnimiz normaldeki gibi geliştiğinde hayata ve evrene topluluk olarak bakışımız mecburen kökten değişirdi. Çünkü gerçekliğe ilişkin önceki sınırlı kavrayışımız, bütün felsefi soruların en temeline çok farklı bir ışık tutmuş olurdu.

Ama, ne var yani, diye sorabilirsiniz. Tabii ki aklı başında her değerlendirme, evren hakkında her şeyi -maddenin nasıl davrandığını veya hayatın nasıl işlediğini- anlamasak bile, doğanın tuvalini süsleyen betimleyici, geniş fırça darbelerinin sırrına ortak olduğumuz sonucuna varacaktır. Tabii ki Camus'nün ima ettiği gibi, fizikteki gelişmeler, örneğin uzay boyutlarının sayısının anlaşılması veya nörofizyolojideki gelişmeler, örneğin beynin düzeninin ve yapısının anlaşılması hatta diğer bütün bilimsel alanlardaki gelişmeler önemli ayrıntıları ortaya çıkarabilir, ama bütün bunların hayatı ve gerçekliği değerlendirmemiz üzerindeki etkisi en alt düzeyde olacaktır. Tabii ki gerçeklik, biz neyin gerçeklik olduğunu düşünüyorsak odur; gerçeklik bize kendini deneyimlerimiz yoluyla gösterir.

Gerçekliğe bu bakış, bir çoğumuz tarafından sorgulanmadan da olsa şu ya da bu ölçüde benimsenir. Benim kendimi günlük hayatta bu şekilde düşünürken bulduğum kesin; doğanın doğrudan duyularımıza gösterdiği yüzünün insanı kandırması kolaydır. Ama Camus'nün metniyle ilk karşılaşmamdan bu yana geçen yıllar içinde modern bilimin çok farklı bir öykü anlattığını öğrendim. Geçtiğimiz yüzyılda yapılan bilimsel araştırmalardan çıkan ana ders, insan deneyimlerinin, gerçekliğin gerçek doğasına ulaşma yolunda genelde yanıltıcı bir rehber olduğudur. Gün-

lük hayatın yüzeyinin hemen altında hiç bilmediğimiz bir dünya var. Gizemli olaylara ve büyüye inananlar, astroloji düşkünleri, deneyimlerin ötesinde bir gerçeklikten bahseden dinsel ilkeleri benimseyenler, çok farklı perspektiflerden de olsa çoktan benzer bir sonuca ulaşmıştır. Ama benim aklımdaki bu değil. Ben, kozmik so anı katman katman soyarak, her katmanda bir gize mi açığa çıkaran ve hem  a ırtıcı, tanıda  olmayan, heyecan verici, zarif ve hem de kimsenin beklediği gibi olmayan bir evreni ortaya çıkaran yaratıcı yenilikçilerin ve yorulmak bilmez araçtır macıların çalışmalarından söz ediyorum.

Bu ilerlemeler sadece birer ayrıntıdır. Fizikteki yeni buluş lar evreni kavrayı ımızda köklü değişiklikler yapmamıza neden olmuştur ve olmaya da devam edecektir. Yıllar önce olduğu gibi şimdi de Camus'nün, nihai soru olarak hayatın değerini seçmekte haklı olduğunu düşünüyorum; ama modern fiziğin kazandırdıkları, beni, hayatı günlük deneyimlerin merce inden bakarak değerlendirmenin, bir van Gogh tablosuna boş bir gazoz  i esinin dibinden bakmaktan farkı olmadığına ikna etti. Modern bilim, en temel algılarımız yoluyla elde ettiğimiz kanıtlara saldırı ardından saldırı gerçekleştirerek, bunların çoğunlukla ya adı ımız dünyaya ilişkin bulanık bir tahayyüle yol açtığını gösterdi. Bu nedenle Camus fizikle ilgili soruları ikincil olarak nitelediys e de, ben o soruların birincil olduğuna ikna oldum. Bana göre, fiziksel gerçeklik hem sahneyi belirliyor hem de Camus'nün sorusuyla ba  etmek için gerekli ı ıklandırmayı sağlıyor. Varolu u modern fiziğin bize kazandırdıklarını benimsemeden değerlendirmeye çalışmak, karanlıkta bilinmeyen bir rakiple g re mek gibi olurdu. Fiziksel gerçekliğin gerçek doğasını kavrayı ımızı derinle tirerek, kendimize ilişkin algımızı ve evren hakkındaki deneyimlerimizi baştan düzenleyebiliriz.

Bu kitabın temel kaygısı, gerçekliği de erlendirili imizle ilgili bu yeniden düzenlemelerin en parlak ve en temel olanlarını açıklamaktır. Bunu yaparken, türümüzün uzayı ve zamanı anlama yolundaki uzun dönemli projelerini etkileyen düzenlemelere odaklanaca ız. Aristoteles'ten Finstein'a, usturlabdan Hubble

Uzay Teleskopu'na, piramitlerden dağ tepelerindeki gözlemelerine kadar uzay ve zaman, düşünmenin başlangıcından bugüne düşüncenin çerçevesini çizmiştir. Modern bilim çağının başlamasıyla bu konuların önemi de artmıştır. Son üç yüzyıl boyunca fizikteki gelişmeler uzayın ve zamanın en şaşırtıcı ve en zorlayıcı, evreni bilimsel olarak çözümlememizdeki en etkili kavramlar olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bilimdeki böylesi gelişmeler uzayı ve zamanı, en son araştırmaların tamamen değiştirdiği yillanmış bilimsel kurgular listesinin en tepesine yerleştirmiştir.

Isaac Newton a göre uzay ve zaman vardı, o kadar. Evrendeki olayların sahnelendiği hareketsiz, kozmik bir sahne oluştuyorlardı. Onun çağdaşı ve rakibi olan Gottfried Wilhelm von Leibniz'e göre ise "uzay" ve "zaman", cisimlerin bulundukları yer ile olayların olduğu zaman arasındaki ilişkilere ait sözcüklerdi. Hepsi bu. Ama Albert Einstein'a göre uzay ve zaman, gerçekliğin altındayatan hammaddeydi. Einstein görelilik kuramıyla uzay ve zaman konusundaki düşüncelerimizi sarstı ve uzayın ve zamanın evrenin evriminde oynadığı temel rolü ortaya çıkardı. O günden bu yana, uzay ve zaman fiziğin parlayan muccevherleridir. Hem tanıdık hem de şaşırtıcıdır; onları tam olarak anlamak fiziğin en göz korkutan ama peşine de en çok düşülen konusu haline gelmiştir.

Bu kitapta ele alacağımız gelişmeler, uzay ve zamanın dokusunu çeşitli şekillerde örmektedir. Bazı fikirler, uzay ve zamanın bin yıldır olmasa da yüzlerce yıldır sorgulanamaz görünmüş en temel özelliklerini tartışmaya açacaktır. Bazıları uzay ve zamanı kuramsal olarak kavrayışımız ile genelde yaşadığımız deneyimler arasındaki bağlantıyı araştıracaktır. Bazılarıysa olağan algıların dar sınırları içinde akıl ermeyecek sorular ortaya atacaktır.

Felsefeden çok az söz edeceğiz (intihardan ve hayatın anlamından hiç söz etmeyeceğiz). Ama uzay ve zamanın sırlarını çözme yolundaki bilimsel arayışta kendimizi sınırlamayacağız. Uzay ve zamanın gerçek doğasını, evrenin küçük bir nokta olduğu ilk anlarından, ulaştığı en uzak noktaya ve en uzak geleceğine kadar, hem tanıdık hem de alışılmadık ortamlarda azimle

araştıracacağız. Uzay ve zamanın öyküsü henüz tamamlanmamış olduğundan, bir sonuca ulaşmayacağız. Ama bize evrenin dokusunu kavramaya ve gerçekliğin gerçek yapısına ne kadar yaklaştığımızı gösterecek gelişmelere -kimisi çok tuhaf, kimisi çok tatminkâr, kimisi deneysel olarak kanıtlanmış, kimisi de tartışmaya açık- değineceğiz.

Klasik Gerçeklik

Tarihçiler tam olarak ne zaman başladığı konusunda fikir birliği içinde olmasa da, modern bilim çağının Galileo Galilei, René Descartes ve Isaac Newton düşüncelerini açıkladıkları sırada başlamış olduğu kesin. O günlerde gökbilimsel ve yeryüzüyle ilgili verilerde bulunan örüntüler, evrende olup biten her şeyin dikkatle akıl yürüterek ve matematiksel çözümleme yoluyla anlaşılabilir bir düzeni olduğunu giderek daha açık hale getiriyor, yeni bilimsel düşünce biçimi iyice yerleşiyordu. Modern bilimsel düşüncenin bu ilk öncüleri, doğru biçimde bakıldığında evrendeki olayların yalnızca açıklanabilir olmakla kalmayıp aynı zamanda öngörülebilir olduğunu ileri sürüyorlardı. Bilimin geleceğin bazı yönlerini önceden bilme gücü -tutarlı ve niceliksel olarak- ortaya çıkıyordu.

İlk bilimsel çalışmalar, günlük hayatta görebileceğimiz ve yaşayabileceğimiz türden şeylere odaklanmıştı. Galileo eğri bir kuleden aşağı ağırlık atıyor (efsaneye göre) ve eğik bir düzlemde aşağıya yuvarladığı topları gözölüyordu; Newton elmaların düşüşünü (efsaneye göre) ve Ay'ın yörüngesini inceliyordu. Bu araştırmaların amacı, yeni yeni gelişmekte olan "bilimsel kulağı" doğanın armonilerine göre akort etmektir. Elbette ki deneyimin hammaddesi fiziksel gerçeklikti, ama mesele ritmin ve düzenin ardındaki mantığı ve anlamı "duyabilmektir." Adları duyulmuş ve duyulmamış pek çok kahraman bu hızlı ve etkileyici ilerlemeye katkıda bulunmuştu, ama Newton rol çaldı. Elindeki az sayıda denklemle, yerdeki ve gökteki hareketlerle ilgili bilinen her şeyi bir araya getirdi ve böylece sonradan *klasik fizik* denilegelen eserin fon müziğini bestelemiş oldu.

Newton'un çalışmasını izleyen yıllarda, onun kullandığı denklemler detaylı bir matematiksel yapıya dönüştürüldü, böylece hem kapsamı hem de uygulamadaki kullanımları çok genişledi. Klasik fizik yavaş yavaş olgun bir bilimsel disiplin haline geldi. Bütün bu gelişmelerin ortasında parlayan ışık, Newton'un özgün kavrayışlarıydı. Bugün, üç yüzyıldan daha uzun bir süre sonra hâlâ Newton'un denklemlerini, dünyanın her yerinde fiziğe giriş derslerinin verildiği sınıfların tahtalarında, uzay araçlarının yörüngelerinin hesaplandığı NASA uçuş planlarında ve en ileri araştırmaların karmaşık hesaplarının içinde saklı olarak görebilirsiniz. Newton çok fazla sayıda fiziksel olguyu tek bir kuramsal çerçeve içinde birleştirmiştir.

Ama Newton hareket yasalarını formüleleştirirken -bizim öykümüz için de özel bir önemi olan (2. Bölüm)- bir engele takıldı. Nesnelerin hareket edebildiğini herkes biliyordu, amaya bu hareketin içinde yer aldığı alan? Hepimiz buna "uzay işte" diye yanıt veririz. Ama Newton'un yanıtı "Uzay nedir?" olurdu. Uzay gerçek bir fiziksel varlık mı, yoksa evreni anlamaya çabalayan insanın ortaya attığı soyut bir fikir mi? Newton bu kilit sorunun yanıtlanması gerektiğini biliyordu, çünkü uzay ve zamanın anlamı hakkında bir fikre sahip olmadan hareketi tanımlayan denklemleri anlamsız olacaktı. Bir şeyi anlamak için bağlamını bilmek gerekir; kavrayışın bir dayanağı olmalıdır.

Böylece Newton *Principia*'da bir iki kısa cümleyle açık ve net bir uzay ve zaman kavrayışı oluşturdu; uzayın ve zamanın evrenin değişmez alanını oluşturan, mutlak ve değişmez varlıklar olduğunu öne sürdü. Newton'a göre uzay ve zaman, evrene biçimini ve yapısını veren görünmez bir yapı iskelesi oluşturuyordu.

Herkes aynı fikirde değildi. Kimileri, son derece ikna edici bir biçimde, hissedemediğimiz, tutamadığımız ve etkileyemediğimiz bir şeye varlık atfetmenin anlamı olmadığını öne sürüyordu. Ama Newton denklemlerinin öngörme ve açıklama gücü eleştirileri durdurdu. Sonraki iki yüzyıl boyunca Newton'un mutlak uzay ve zaman kavrayışı artık sorgusuz kabul edilen bir ilkeydi.

Görelî Gerçeklik

Dünyaya klasik Newtoncu bakış iyiydi. Yalnızca doğal olayları şaşırtıcı bir kesinlikle betimlemekle kalmıyor, betimlemenin ayrıntıları da -yani matematik- deneyimlerle örtüşüyordu. Eğer bir şeyi iterseniz, hızlanır. Bir topu ne kadar hızlı fırlatırsanız, duvara çarptığı zaman etkisi o kadar büyük olur. Eğer bir şeye baskı uygularsanız, onun da size baskı uyguladığını hissedersiniz. Bir cismin kütlesi ne kadar büyük ise kütleçekimi de o kadar büyük olur. Bunlar doğal dünyanın en temel nitelikleri arasındadır. Newton'un kurduğu yapıyı öğrendiğinizde bunların denklemlerde gün gibi açık bir biçimde temsil edildiklerini görürsünüz. Bir falcının kristal küresinin sorgulanamaz gizeminden farklı olarak, Newton yasalarının işleyişi, en alt düzeyde matematik bilgisine sahip herkesin anlayabileceği şekilde ortadaydı. Klasik fizik insan sezgileri için sağlam bir temel oluşturuyordu.

Newton denklemleri kütleçekimi kuvvetini kapsıyordu, ama klasik fiziğin yapısı elektriksel ve manyetik kuvvetleri de kapsayacak biçimde ancak 1860'ta İskoç bilim insanı James Clerk Maxwell tarafından genişletildi. Bunu yapabilmek için Maxwell'in yeni denklemlere ihtiyacı vardı. Kullandığı matematiği tam olarak anlamak için daha yüksek düzeyde bir eğitim almış olmak gerekiyordu. Ama Maxwell'in yeni denklemleri, elektriksel ve manyetik olguları, Newton denklemlerinin hareketi açıkladığı kadar başarılı bir şekilde açıklıyordu. 1800'lerin sonuna doğru artık insan aklının gücünün, evrenin gizlerini çözebileceği açıkça görülmeye başlamıştı.

Nitekim, elektriğin ve manyetizmanın başarılı bir şekilde birleştirilmesiyle, kuramsal fiziğin yakın bir zamanda tamamlanacağı duygusu güçleniyordu. Kimileri fiziğin kısa bir zamanda artık tamamlanmış bir konu olacağını ve fizik yasalarının kesin bir biçimde ortaya konacağını düşünüyordu. Tanınmış deneysel fizikçi Albert Michelson 1894'te "en temel ilkelerden çoğunun kesin bir biçimde" belirlendiğini ifade etti ve "seçkin bir bilim insanının" -ki çoğu kimse bu kişinin İngiliz fizikçi Lord Kelvin olduğunu düşünür- artık geriye sadece bazı sayıların ondalık basa-

maklarını daha net olarak belirlemenin kaldığını söylediğinden söz etti.¹ Kelvin'in kendisi de 1900'de ufukta "iki bulut" olduğunu, bunlardan birinin ışığın hareketinin özellikleri, değerininse cisimlerin ısıtılınca yaydığı ışınımın özellikleri ² olduğunu söyledi. Ama genel kanı, bunların da yakın bir zamanda kuşkusuz incelenip çözülecek ufak ayrıntılar olduğuydu.

On yıl içinde her şey değişti. Tahmin edildiği gibi, Kelvin'in ortaya attığı iki problem ele alındı, ama hiç de ufak problemler olmadıkları ortaya çıktı. Her biri bir devrim başlattı ve genellikle her biri doğa yasalarının yeni baştan yazılmasını gerektirdi. Klasik uzay, zaman ve gerçeklik kavramları -yüzlerce yıl boyunca yalnızca işlerliğini korumakla kalmayan, aynı zamanda dünyaya ilişkin sezgisel algılarımızı doğrulayan kavramlar- tamamen değişti.

Kelvin'in "bulutlarından" ilkinin ele alan görelilik devrimi, 1905'ten Einstein'ın özel ve genel görelilik kuramlarını (3. Bölüm) tamamladığı 1915'e kadar sürdü. Einstein elektrik, manyetizma ve ışığın hareketi konularındaki bilmecelemlerle uğraşırken Newton'un klasik fizikteki en önemli kilometre taşlarından olan uzay ve zaman kavramlarının hatalı olduğunu fark etti. 1905 baharında çok yoğun geçen birkaç haftada uzay ve zamanın Newton'un düşündüğü gibi birbirinden bağımsız ve mutlak olmadığını, insanların ortak deneyimlerinin tam tersine göreli ve birbirinin içine girmiş olduğunu belirledi. On yıl kadar sonra kütleçekimi fiziğinin yasalarını yeniden yazan Einstein, Newton fiziğinin sonunu hazırlamış oldu. Einstein bu kez yalnızca uzay ve zamanın bir bütünün parçaları olduğunu göstermekle kalmamış, eğrilip yamularak evrenin evriminde rol aldıklarını da göstermişti. Einstein'ın bakış açısına göre, uzay ve zaman Newton'un düşündüğü gibi katı ve değişmez olmak şöyle dursun esnek ve dinamiktir.

Her iki görelilik kuramı da insanlığın en değerli kazanımları arasındadır; Einstein bu kuramlarla Newton'un gerçeklik kavrayışını alaşağı etmiştir. Her ne kadar Newton fiziği fiziksel deneyimlerimizin çoğunu matematiksel olarak kapsıyor gibi

görünse de, Newton'un betimlediği gerçekliğin bizim dünya-
mızın gerçekliği olmadığı anlaşılmıştır. Bizimki, görelî bir ger-
çekliktir. Ama klasik fizik ve görelî fizik arasındaki fark yal-
nızca uç koşullarda (çok büyük hızlar ve kütleçekimi) kendi-
ni gösterdiği için, Newton fiziği ile pek çok koşul altında hâlâ
çok kesin ve yararlı yaklaşıtımlar yapılabilir. Ama yararlılık
ve gerçeklik birbirinden çok farklı standartlardır. Göreceğimiz
gibi, uzay ve zamanın bizim için neredeyse alışkanlık haline
gelmiş özellikleri, hatalı bir Newtoncu bakış açısının parçala-
rı haline gelmiştir.

Kuantum Gerçekliği

Lord Kelvin'in sözünü ettiği ikinci aykırılık, modern insan
kavrayışının maruz kaldığı en büyük altüst oluşlardan biri olan
kuantum devrimine yol açtı. Ateş sönmeye yüz tutup duman da-
ğıldığında klasik fiziğin cılası dökülmüş, altından yeni kuantum
gerçekliğinin çatısı ortaya çıkmıştı.

Klasik fiziğin temel özelliklerinden biri şudur: Eğer tüm nes-
nelerin belli bir andaki konumlarını ve doğrusal hızlarını biliyor-
sanız Newton ve Maxwell denklemlerini kullanarak bu nesnele-
rin geçmişte ya da gelecekte herhangi bir andaki konumlarını ve
doğrusal hızlarını bulabilirsiniz. Başka bir deyişle klasik fizik,
geçmişin ve geleceğin şimdinin içine kazanmış olduğunu söyler.
Bu özellik özel ve genel görelilik kuramlarında da vardır. Her ne
kadar görelilik kuramındaki geçmiş ve gelecek kavramları klasik
karşılıklarından daha zor anlaşılır ise de (3. ve 5. Bölüm) görelî-
liğin denklemleri, şimdiyi tam olarak değerlendirir ve geçmiş ve
gelecek kavramlarını da bir o kadar eksiksiz belirler.

Bununla birlikte, 1930 lara gelindiğinde fizikçiler *kuantum
mekanigi* adı verilen tümüyle yeni bir kavramsal şema önermek
zorunda kaldılar. Beklenmedik bir biçimde, yalnızca kuantum
mekanığının, atom ve atomaltı dünyasının sunduğu çeşitli yeni
verileri açıklamayı ve bilmeceleri çözmeyi başarabildiğini gör-
düler. Ama kuantum yasalarına göre, nesnelerin şimdi nasıl ol-
duklarıyla ilgili olarak mümkün olan en mükemmel ölçümleri

bile yapsanız, bekleyebileceğinizin en iyisi, nesnelerin gelecekte belli bir zamanda şöyle ya da böyle olma *olasılığı* ya da geçmişte belli bir zamanda şöyle ya da böyle olmuş olma *olasılığıdır*. Kuantum mekaniğine göre, evren şimdinin içine kazınmamıştır; kuantum mekaniğine göre, evren şans oyunları oynar.

Her ne kadar bu gelişmelerin tam olarak nasıl yorumlanması gerektiği hâlâ tartışmalıysa da, fizikçilerin çoğu olasılık kavramının kuantum gerçekliğinin dokusunda olduğu konusunda fikir birliği içindedir. İnsan sezgisi ve onun klasik fizikte somutlaşan hali, şeylerin her zaman kesinlikle *ya* şöyle *ya da* böyle olduğu bir gerçeklik tahayyül ederken, kuantum mekaniği şeylerin bazen kısmen şöyle *ve* kısmen de böyle olmak arasında gidip geldiği bulanık bir gerçeklik betimler. Şeyler ancak uygun bir gözlem onları kuantum olasılıklarından vazgeçmeye zorladığında kesinleşir ve belirli bir değer alır. Ama gerçekleşen bu değer öngörülemez, ancak şeylerin şu veya bu değeri alma olasılığı öngörülebilir.

Bu, düpedüz gariptir. Algılanıncaya kadar belirsiz olan bir gerçekliğe alışık değiliz. Ama kuantum mekaniğinin gariplikleri burada bitmiyor. Einstein'ın 1935 yılında kendisinden daha genç iki bilim insanı Nathan Rosen ve Boris Podolsky ile birlikte kuantum kuramına bir saldırı olarak kaleme aldığı makalede sözü edilen bir özellik de bir o kadar şaşırtıcıdır.¹³ Daha sonra bilimsel ilerlemede ortaya çıkan beklenmedik değişikliklerle, şimdi Einstein'ın makalesine kuantum mekaniğinin -ilk bakışta-burada yaptığınız bir şeyin *aynı anda* orada olan bir şeyle, mesafeden bağımsız olarak, bağlantılı olduğunu öne sürdüğüne dikkat çeken makaleler arasında bir ilk gözüyle bakabiliriz. Einstein böyle aynı anda bağlantılı hale gelme düşüncesini gülünç buluyor ve kuantum kuramının matematiğinden bu sonuçların çıkmasını, kuramın kabul edilebilir hale gelmeden önce daha çok geliştirilmesi gerektiğinin bir kanıtı olarak görüyordu. Ama hem kuramsal hem de teknolojik gelişmelerin kuantum kuramının bu saçma gibi görünen yönleriyle ilgili deneyler yapılmasına olanak verdiği 1980'lerde, araştırmacılar gerçekten

de birbirinden çok uzak konumlarda olup biten şeyler arasında aynı anda bir bağlantı *olabileceğini* kanıtladılar. Einstein'ın saçma kabul ettiği şeyler laboratuvar koşullarında gerçekten de olur (4. Bölüm).

Kuantum mekaniğinin bu özelliklerinin gerçeklik tahayyülümüz üzerindeki etkisi, devamlı olarak araştırılan bir konudur. Benim de aralarında olduğum pek çok bilim insanı bunu uzayın anlamının ve özelliklerinin kuantum açısından kökten bir biçimde güncellenmesinin bir parçası olarak görüyor. Normalde uzamsal ayrıklık fiziksel olarak bağımsızlık anlamına gelir. Eğer bir futbol sahasının öbür ucunda olanları kontrol etmek isterseniz ya oraya gitmeniz ya da etkinizi oraya iletmek için en azından oraya birisini veya bir şeyi (yardımcı antrenör, konuşmayı ileten hava moleküllerinin titreşimleri, birinin dikkatini çekmek için bir ışık çakımı vb.) göndermeniz gerekir. Eğer bunu yapmazsanız -yani eğer uzamsal olarak yalıtılmış kalırsanız- aradaki uzay fiziksel bir bağlantının olmamasını sağlayacağı için, orada bir etkiniz olamaz. Kuantum mekaniği bu bakış açısına, en azından bazı koşullar altında uzayı aşma kapasitesi olduğunu göstererek meydan okuyor; uzun erimli kuantum bağlantıları uzamsal ayrıklık sorununu aşabilir. İki cisim uzayda birbirlerinden uzak olabilirler ama kuantum mekaniği göz önüne alındığında sanki bir tek gibidirler. Dahası, Einstein'ın bulduğu uzay ve zaman arasındaki sıkı bağlantı nedeniyle kuantum bağlantılarının zamansal uzantıları da vardır. Birazdan, kuantum mekaniğinin gerektirdiği şaşırtıcı uzam-zamansal iç bağlantıları araştırarak, zekice hazırlanmış ve gerçekten olağanüstü bazı deneyleri tanıtacağız ve bunların çoğumuzun kabul ettiği klasik, sezgisel dünya görüşüne çok güçlü bir şekilde meydan okuduğunu göreceğiz.

Bu etkileyici kavrayışlara rağmen, geriye zamanın -ne görelliğin ne de kuantum mekaniğinin bir açıklama getiremediği- çok temel bir özelliği kalıyor: Zaman geçmişten geleceğe yönelmiş gibi görünüyor. Bu konuda ikna edici tek gelişme fiziğin *kozmo-
loji* adı verilen bir alanından gelmiştir.

Kozmolojik Gerçeklik

Evrenin gerçek doğasını görmemizi sağlamak her zaman fiziğin başlıca amaçlarından biri olmuştur. Yaşadığımız gerçekliğin, aslında gerçekliğin küçük bir parçasından başka bir şey olmadığını öğrenmekten -geçen yüzyılda olduğu gibi- daha zihin açıcı bir deneyim olabileceğini düşlemek zordur. Ama fiziğin aynı derecede önemli diğer bir görevi de, yaşadığımız gerçekliğin öğelerini açıklamaktır. Fiziğin tarihine hızlı bir bakış atarsak, bu görev sanki yerine getirilmiş, sanki sıradan deneyimler fizikteki yirminci yüzyıl öncesi ilerlemeler tarafından ele alınmış gibi gelebilir. Bir dereceye kadar bu doğrudur. Ama gündelik deneyimler söz konusu olduğunda bile tam bir kavrayıştan çok uzağız, tam olarak açıklayamadığımız sıradan deneyimlerin özellikleri arasında, modern fiziğin henüz çözülmemiş en derin gizlerinden biri -Britanyalı büyük fizikçi Sir Arthur Eddington'un *zamanın okur*⁴ olarak adlandırdığı giz-yer alır.

Şeylerin zaman içinde geliştiği bir yön olduğunu hiç sorgulamadık kabul ederiz: Yumurta kırılır, mum erir, ama eski hallerine geri dönemezler; anılar geleceğe değil geçmişe aittir; insanlar yaşlanır, gençleşmez. Bu bakışsızlıklar (asimetrikler) yaşamımızı yönetir; zamanda ileri ve geri ayrımı, deneysel gerçekliğin hakim ögesidir. Eğer zamanda ileri ve geri arasında, sağ ve sol, ön ve arka arasında gördüğümüz bakışım olsaydı, dünya tanınmaz olurdu. Yumurtalar kırıldıkları gibi yapıştırlardı; geçmiş kadar geleceğe ait anılarımız da olurdu; insanlar yaşlandıkları gibi gençleşirdi. Böyle bir zaman-bakışimli gerçekliğin bizim gerçekliğimiz olmadığı kesin. Ama acaba zamanın bu bakışsızlığı nereden geliyor? Zamanın bütün özellikleri arasındaki bu en temel olanından sorumlu olan ne?

Fiziğin bilinen ve kabul edilen yasaları böyle bir bakışsızlık göstermez (6. Bölüm): Zamandaki bütün yönler, yani ileri ve geri, fizik yasalarınca bir fark gözetmeksizin ele alınır. *Dev bilmece*⁵nin başlangıç noktası işte budur. Temel fizik denklemlerindeki hiçbir şey, zamanda bir yöne kesinlikle diğer yönden farklı davranmaz ve bu da yaşadığımız her deneyimle taban tabana terstir⁶.

Günlük yaşamın bildik bir özelliğine odaklanmış da olsak, temel fizik ile en basit deneyimler arasındaki bu uyumsuzluğa en ikna edici çözümün, bizim için en bilinmedik olan olay üzerinde -evrenin başlangıcı- düşünmemizi gerektirmesi şaşırtıcıdır. Bu kavrayışın kökleri büyük on dokuzuncu yüzyıl fizikçisi Ludwig Boltzmann'ın eserlerindedir; daha sonra da pek çok araştırmacı, en önemlilerinden biri Britanyalı matematikçi Roger Penrose olmak üzere, bu konu üzerinde çalışmıştır. Göreceğimiz gibi, evrenin başlangıcındaki özel fiziksel koşullar (Büyük Patlama ve sonrasındaki çok düzenli çevre) zamana bir yön vermiş olabilir. Tıpkı bir saati kurmanın, yani saatin zembereğini çok düzenli bir ilk duruma getirmenin saatin ileri doğru çalışmasını sağlaması gibi. İleride daha net olarak açıklayacağımız bir anlamda, yu-murtanın kırılması -tekrar birleşmesinin aksine- evrenin 14 milyar yıl önce doğumundaki koşullara tanıklık etmektedir.

Günlük deneyimler ile evrenin ilk anları arasındaki bu beklenmedik bağlantı, olayların neden zamanda bir yönde olduğuna -ve asla diğer yönde olmadığına- dair bir kavrayış getiriyor, ama zamanın okunun gizemini tamamen çözemiyor. Tersine, bilmeceyi *kozmojinin* -tüm evrenin kökenini ve evrimini araştıran bilim dalı- alanına kaydırıyor ve bizi evrenin, zamanın okunun bu açıklamasının gerektirdiği gibi, başlangıçta gerçekten de çok düzenli olup olmadığını araştırmaya zorluyor.

Kozmoloji insan türünü cezbeden en eski konular arasındadır. Bunda şaşacak bir şey yok. Bizler öykü anlatıcılarıyız; hangi öykü yaratılış öyküsünden daha görkemli olabilir? Geçtiğimiz birkaç bin yıl boyunca dinsel ve felsefi gelenekler, her şeyin -evrenin- nasıl başladığına ilişkin çok sayıda açıklamayla varlıklarını hissettirdiler. Bilim de uzun süren tarihi boyunca kozmolojiyle ilgilendi. Ama modern bilimsel kozmolojinin doğuşunu başlatan olay Einstein'ın genel göreliliği keşfetmesidir.

Einstein genel görelilik kuramını yayımladıktan kısa bir süre sonra hem Einstein hem de başka araştırmacılar, göreliliği bir bütün olarak evrene uyguladılar. On beş yirmi yıl içinde bu araştırmalar, gökbilimsel gözlemlerin birçok özelliğini başarıyla

açıklayan bir yaklaşım olan, bugün *Büyük Patlama kuramı* dediğimiz kuramın, daha tam geliştirilmemiş olsa da çatısının ortaya çıkmasına yol açtı (8. Bölüm). 1960'larm ortasında, gözlemler kuramın öngördüğü, uzayı kaplayan, neredeyse tekbiçimli -göçle görülmeyen ama mikrodalga detektörleriyle kolayca ölçülebilen- mikrodalga ışıının varlığını ortaya çıkardığında, Büyük Patlama kozmolojisini destekleyen kanıtlar daha da arttı.

1970 lere gelindiğinde ise evrendeki temel bileşenlerin ısı ve sıcaklıktaki uç değişimlere nasıl tepki verdiğinin belirlenmesi konusunda on yıl süren araştırmalardan ve bunların sonucunda yaşanan önemli gelişmelerden sonra artık Büyük Patlama kuramı, önde gelen kozmoloji kuramı olarak yerini sağlamlaştırmıştı (9. Bölüm).

Başarılarına karşın kuramın önemli eksikleri vardı. Uzayın neden ayrıntılı gökbilimsel gözlemlerin ortaya çıkardığı şekilde olduğunu açıklayamıyordu. Keşfedildiği andan itibaren dikkatle incelenmekte olan mikrodalga ışıının sıcaklığının neden her noktada aynı görüldüğü konusuna bir açıklama getiremiyordu. Üstelik -anlatmakta olduğumuz öykü açısından asıl önemli olan da bu- Büyük Patlama kuramı, evrenin başlangıçta, zamanın oku açıklamasının gerektirdiği gibi, çok düzenli olması gerektiğine dair ikna edici bir sebep gösteremiyordu.

Bu ve bir sonuca bağlanamayan başka konular, 1970 lerin sonunda ve 1980'lerin başında şişme kozmolojisi adı verilen önemli bir atılıma esin kaynağı oldu (10. Bölüm). Şişme kozmolojisi Büyük Patlama kuramına, evrenin ilk anlarında çok kısa ve çok hızlı bir şişme dönemi ekleyerek kuramı değiştiriyordu (bu yaklaşımda, saniyenin trilyonda birinin trilyon birinin milyonda birinden daha kısa bir sürede evrenin büyüklüğü milyon kere trilyon kere trilyon kat artmıştır). İleride anlaşılacağı gibi, genç evrenin bu olağanüstü büyümesi, Büyük Patlama modelinin bıraktığı boşlukları doldurmakta -uzayın biçiminin neden böyle olduğunu, mikrodalga ışıının neden tekbiçimli olduğunu ve evrenin ilk dönemlerinin neden o kadar düzenli olmuş olması gerektiğini açıklamakta- başarılıdır; böylece hem gökbilimsel gözlem-

lerin işaret ettiği hem de herkesin kendi deneyimleri sonucu bildiği zamanın okunun açıklanmasında önemli bir ilerleme sağlamıştır (11. Bölüm).

Bu önemli başarılarla karşın, şişme kozmolojisi yirmi yıl rahatsız edici bir sır sakladı. Değiştirdiği standart Büyük Patlama kuramı gibi şişme kozmolojisi de Einstein'ın genel görelilik kuramı ile keşfettiği denklemlere dayanıyor. Her ne kadar ciltler dolusu araştırma makalesi, Einstein'ın denklemlerinin boyutları ve kütleleri büyük cisimleri kesin bir biçimde tanımlamakta çok başarılı olduğunu onaylasa da, fizikçiler küçük cisimlerin -örneğin henüz bir saniyenin çok küçük bir kesiri yaşındaki haliyle evrenin- kuramsal olarak çözümlenmesi için kuantum mekaniğinin kullanılması gerektiğini çoktandır biliyorlardı. Sorun, genel görelilik denklemleri kuantum mekaniğinin denklemleriyle bir araya geldiğinde ortaya bir felaket çıkmasındadır. Denklemler tümüyle çöker, bu da evrenin nasıl doğduğunu ve o sırada zamanın okunu açıklamak için gerekli koşulların oluşup oluşmadığını belirlememizi engeller.

Bu durumu bir kuramcının karabasanı olarak tanımlamak abartma sayılmaz: Deneysel olarak erişilemeyen çok önemli bir alanı çözümlmek için gerekli matematiksel araçların olmaması. Uzay ve zaman bu özel ve erişilemeyen alanla -evrenin başlangıcıyla- öylesine iç içedir ki, uzay ve zamanı bütünüyle kavramamız için evrenin ilk dakikalarındaki uç koşulları -devasa bir yoğunluk, enerji ve sıcaklık gibi- açıklayabilecek denklemleri bulmamız gerekir. Bu, mutlaka ulaşılması gereken temel amaçtır; birçok fizikçi bu amaca ulaşabilmek için *birleşik kuram* denilen bir kuramın geliştirilmesinin gerekli olduğunu düşünüyor.

Birleşik Gerçeklik

Geçtiğimiz birkaç yüzyıl boyunca fizikçiler, birbirinden çok farklı ve görünüşe göre bağlantısız birçok olayın aslında aynı fizik yasalarıyla yönetildiğini göstererek doğal dünyayı kavrayışımızı pekiştirmeye çalıştı. Einstein için bu birleştirme amacı -en çok sayıda olguyu en az sayıda fiziksel ilke ile açıklamak- yaşam

boyu süren bir tutkuya dönüşmüştür. Einstein iki görelilik kuramıyla uzayı, zamanı ve kütleçekimini birleştirmişti. Ama bu başarı onu yalnızca daha da büyük düşünmesi için cesaretlendirdi. Doğanın tüm yasalarını kucaklayan, her şeyi kapsayan tek bir çerçeve bulmayı düşledi; bu çerçeveyi *birleşik kuram* olarak adlandırdı. Zaman zaman Einstein'ın bir birleşik kuram bulduğu söylentileri yayıldıysa da bu tür iddiaların temelsiz olduğu ortaya çıktı; Einstein'ın düşü gerçekleşmedi.

Yaşamının son otuz yılında birleşik kurama odaklanması Einstein'ı dönemin yaygın fizik araştırmalarından uzaklaştırdı. Daha genç birçok bilim insanı, en büyük kuramı bulmak için yürüttüğü ve tek bir amacı olan arayışını, sonradan yanlış yola girmiş büyük bir adamın sayıklamaları olarak değerlendirdi. Ama Einstein'ın ölümünden sonraki yıllarda giderek artan sayıda fizikçi onun bitmemiş araştırmasını ele aldı. Günümüzde birleşik bir kuram geliştirilmesi, kuramsal fiziğin en önemli problemleri arasında sayılıyor.

Fizikçiler yıllarca birleşik bir kuram ortaya çıkarmanın önündeki temel engel olarak yirminci yüzyıl fiziğinin en önemli iki atılımı olan genel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki çatışmayı gördüler. Her ne kadar bu iki yapı çok farklı alanlara uygulanmakta ise de -genel görelilik yıldızlar ve galaksiler gibi büyük şeylere, kuantum mekaniği ise moleküller ve atomlar gibi küçük şeylere- iki kuram da evrensel oldukları, yani bütün alanlara uygulanabilir oldukları iddiasındadır. Bununla birlikte yukarıda söz edildiği gibi, bu iki kuram bir arada kullanıldığında denklemler bir anlamı olmayan sonuçlar verir. Örneğin, kütleçekimi ile ilgili herhangi bir sürecin gerçekleşmesi olasılığının hesaplanmasında kuantum mekaniği genel görelilikle birlikte kullanıldığında bulunan yanıt yüzde 24 veya yüzde 63 veya yüzde 91 gibi bir sayı olmaz; tersine, kullanılan birleşik matematiğin verdiği sonuç *sonsuz* olur. Ama bu, çıkan değer o kadar yüksek ki bütün paranızı buraya yatırın, demek değildir. Yüzde 100'den büyük olasılık değerlerinin bir anlamı yoktur. Sonsuz olasılık sonucu veren hesaplamalar, genel göreliliğin ve kuantum

mekaniğinin denklemlerinin bir arada kullanılmasının her şeyi karman çorman bir hale getirdiğini gösteriyor sadece.

Bilim insanları genel görelilik ile kuantum mekaniği arasındaki gerilimin elli yıldan fazladır farkında, ama uzunca bir süre pek azı bu gerilime bir çözüm aradı. Çoğu araştırmacı, genel göreliliği yalnızca büyük ve kütleli cisimleri, kuantum mekaniğini de küçük ve hafif cisimleri incelerken kullandı. Bunu yaparken de iki kuramı, aralarındaki uyumsuzluğu kontrol edebilecekleri kadar, birbirinden uzak tutmayı ihmal etmediler. Bu yumuşama taktiği yıllar boyunca her iki alanı kavrayışımızda çarpıcı ilerlemeler ortaya çıkardıysa da kalıcı bir barış sağlanamadı.

Çok az alan -uçlardaki fiziksel koşullar, örneğin kendileri çok küçük kütleleri büyük cisimler- aynı anda hem genel göreliliğin hem de kuantum mekaniğinin kullanılmasını gerektirerek askerden arındırılmış bölgeye doğrudan girer. En bilinen iki örnek, bütün bir yıldızın kendi ağırlığı altında ezilip çökerek çok küçük bir noktaya sıkıştığı bir kara deliğin merkezi ve bütün gözlenebilir evrenin bir atomdan çok daha küçük bir topak büyüklüğünde ve sıkışmış olduğunun düşünüldüğü Büyük Patlama'dır. Genel görelilikle kuantum mekaniği arasında başarılı bir birlik oluşturulamazsa, çöken yıldızların sonu ve evrenin başlangıcı sonsuza kadar bir giz olarak kalacaktı. Birçok bilim insanı bu alanları bir kenara koymayı tercih etti ya da en azından daha kolay başka problemler çözülünceye kadar bunların üzerinde düşünmeyi erteledi.

Ama bazı araştırmacılar bekleyemedi. Fiziğin bilinen yasaları arasında bir çatışma olması demek, derin bir gerçekliği kavrayamamak demektir ve bu bilim insanlarını rahatsız etmeye yeterliydi. Bu alana el atanlar suların derin, akıntıların güçlü olduğunu gördü. Uzun bir süre boyunca araştırmalarda çok az ilerleme kaydedildi, her şey iç karartıcıydı. Böyle iken bile, yollarına devam edip genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirmek rüyasını gerçekleştirmek kararlığına sahip olanların azmi ve çabaları ödüllendiriliyor. Bugün bilim insanları, bu öncüler tarafından açılan yollarda ilerliyor, büyük şeylerin yasalarıyla küçük

şeylerin yasaları arasında uyumlu bir birliktelik oluşturmaya çalışıyorlar. Pek çok kimsenin bu işi başaracağı konusunda hemfikir olduğu bir aday var: Süpersicim *kuramı*. (12. Bölüm).

Göreceğimiz gibi, süpersicim kuramı, işe eski bir soruya yeni bir yanıt önererek başlar: Maddenin bölünemeyen, en küçük parçaları nelerdir? Yıllar boyunca klasik yanıt, maddenin nokta olarak modellenebilecek, büyüklüğü ve iç yapıları olmayan, bölünemeyen parçacıklardan -elektron ve kuarklar- oluştuğu idi. Geleneksel kuram, bu parçacıkların çeşitli şekillerde birleşerek protonları, nötronları ve gördüğümüz her şeyi oluşturan çok çeşitli atomları ve molekülleri oluşturduğunu öne sürer ve deneyler de bunu doğrular. Süpersicim kuramı ise bambaşka bir öykü anlatır. Elektronların, kuarkların ve deneylerde ortaya çıkan diğer parçacık türlerinin oynadığı kilit rolü inkâr etmez, ama bu parçacıkların nokta olmadığını öne sürer. Süpersicim kuramına göre her parçacık, tek bir atom çekirdeğinden yüz milyar ke-re milyar kez daha küçük (günümüzde inceleyemediğimiz kazar küçük) bir sicime benzeyen minik bir enerji iplikçığınden oluşmuştur. Nasıl bir keman teli farklı örüntülerle titreşir ve her farklı titreşim farklı bir nota üretirse, süpersicim kuramındaki iplikçikler de farklı örüntülerle titreşebilir. Ama bu titreşimler nota üretmez, kuramın öne sürdüğüne göre farklı parçacıkların farklı özelliklerini üretir. Belli bir örüntüyle titreşen minik bir sicim bir elektronun kütlesine ve elektrik yüküne sahip olacaktır; yani kurama göre, böyle titreşen bir sicim, geleneksel olarak elektron dediğimiz şeydir. Farklı bir örüntüyle titreşen minik bir sicim ise kuark, nötrino veya herhangi bir başka parçacığı tanımlayan özelliklere sahip olacaktır. Her biri aynı varlığın değişik örüntülerle titreşmesinden ortaya çıktığından, tüm parçacık türleri süpersicim kuramında birleşir.

Noktalardan, çok çok küçük oldukları için nokta gibi görünen sicimlere geçiş, bakış açısında olağanüstü büyük bir değişiklik gibi görünmeyebilir. Ama öyledir. Böylesine mütevazı bir başlangıçtan yola çıkan süpersicim kuramı, önceki birleştirme girişimlerinin başına bela olan sonsuz sayıda olasılık tehlikesi-

ni savuşturarak, genel göreliliği ve kuantum mekaniğini tutarlı, tek bir kuramda birleştirmiştir. Bu da yetmezmiş gibi, süpersicim kuramı doğadaki tüm kuvvetlerin ve tüm maddenin aynı kuramsal çerçevede birleştirilmesi için gerekli olan görüş açılımını ortaya çıkarmıştır. Kısacası, süpersicim kuramı Einstein'ın birleşik kuramı için en önemli adaydır.

Bunlar büyük iddialardır ve eğer doğru iseler, ileri doğru dev birer adımdırlar. Ama süpersicim kuramının en çarpıcı ve eğer yaşıyor olsaydı Einstein'ın da kalbini küt küt attıracağına hiç kuşku duymadığım özelliği, evrenin dokusunu kavrayışımıza yaptığı büyük etkidir, ileride göreceğimiz gibi, süpersicim kuramının genel göreliliği ve kuantum mekaniğini birleştirme iddiası, ancak uzay-zaman kavrayışımızı bir kere daha altüst edersek matematiksel olarak anlamlıdır. Süpersicim kuramı, ortak deneyimlerin gösterdiği gibi üç uzam boyutu ve bir zaman boyutu yerine *dokuz* uzam boyutu ve bir zaman boyutu gerektirir. Süpersicim kuramının *M-kuramı* olarak bilinen sağlam ve güçlü bir türevinde, birleştirme *on* uzam boyutu ve bir zaman boyutu gerektirir, yani kozmik altyapı toplam on bir uzay-zaman boyutuna sahiptir. Bu fazladan boyutları görmediğimiz için, süpersicim kuramı bize şimdiye kadar *gerçeğin ancak çok küçük bir parçasını şöyle bir gördüğümüzü* söyler.

Tabii fazladan boyutların varlığını kanıtlayan gözlenebilir ve rilerin olmayışı, bu boyutların olmadığı ve süpersicim kuramının yanlış olduğu anlamına da geliyor olabilir. Ama hemen bu sonuca varmak acelecilik olur. Süpersicim kuramının keşfinden on yıllarca önce bile, Einstein'ın da aralarında olduğu ileri görüşlü bilim insanları, gördüklerimizin ötesinde uzamsal boyutlar olabileceği fikri üzerinde uzun uzadıya düşülmüş ve bu boyutların nerede gizli olabileceği konusunda fikir yürütmüştür. Sicim kuramcıları bu fikirleri çok geliştirmiş ve bu fazladan boyutların, çok sıkışık oldukları için gözümüzle ve şu an elimizde olan araçlarla göremeyeceğimiz kadar küçük olabileceklerini (12. Bölüm) ya da büyük olabileceklerini ama evreni incelediğimiz yöntemlerle görülemiyor olabileceklerini (13. Bölüm) buldular. Her iki

senaryonun da çok önemli sonuçları vardır. Sıkışmış boyutların geometrik şekilleri, sicim titreşimlerinin üzerindeki etkileri aracılığıyla çok temel soruların, örneğin evrenimizde neden yıldızlar ve gezegenler olduğu sorusunun yanıtlarını barındırıyor olabilir. Büyük fazladan boyutların getirdiği olanak ise daha da olağanüstü bir şeyi dikkate almamızı sağlayabilir: Şimdiye kadar tümüyle habersiz olduğumuz -bildiğimiz uzayda değil de, fazladan boyutlarda yakınımızda olan- dünyalar.

Bu her ne kadar fazla cesur bir iddia ise de, fazladan boyutlar gerçekleşmesi olanaksız, kuramsal bir düşüğe değildir. Çok yakında varlıkları deneylerle sınanır hale gelebilir. Fazladan boyutlar, eğer var iseler, gelecek kuşak atom çarpıştırıcıları ile ilk insan yapısı mikroskopik kara deliğin oluşturulması ve yeni, şimdiye kadar keşfedilmemiş çok sayıda yeni parçacık türünün üretilmesi gibi dikkate değer sonuçlara yol açabilir (13. Bölüm). Bunlar ve başka alışılmamış sonuçlar, doğrudan görülebilenlerin ötesindeki boyutlar konusunda ilk kanıtları ortaya koyabilir ve bizi süpersicim kuramının uzun zamandır aranan birleşik kuram olduğu sonucuna bir adım daha yaklaştıracırlar.

Eğer süpersicim kuramının doğruluğu kanıtlanırsa, bildiğimiz gerçekliğin, kalın ve zengin dokulu kozmik kumaşın üzerine sarılmış ince bir tül olduğunu kabullenmek zorunda kalacağız. Camus'nün söylediklerine rağmen, uzay boyutlarının sayısını belirlemek -özellikle de yalnızca üç tane olmadığını bulmak- bilimsel olarak ilginç ama sonuç olarak önemsiz bir ayrıntı olacaktır. Fazladan boyutların keşli, bir bütün olarak insan deneyimlerinin bizi evrenin temel bir niteliğinden tamamen habersiz bıraktığını gösterecektir. Evrenin insan duyuları tarafından kolayca algılandığını düşündüğümüz özelliklerinin bile öyle olmayabileceğini gösterecektir.

Geçmiş ve Gelecek Gerçekliği

Süpersicim kuramının geliştirilmesiyle birlikte, araştırmacılar nihayet ne kadar aşırı olursa olsun hiçbir koşulda çökmeyecek bir çerçevemiz olduğu, günün birinde denklemlerimizi kul-

lanarak geriye doğru bakabileceğimiz ve bildiğimiz evrenin tam olduğu anda her şeyin nasıl olduğunu öğrenebileceğimiz konusunda iyimserler. Bu güne kadar hiç kimse süpersicim kuramını tartışmasız bir açıklıkla Büyük Patlamaya uygulayacak mahareti gösterememiştir, ama kozmolojiyi süpersicim kuramı çerçevesinde kavramak günümüz araştırmalarının en öncelikli konularından biri olmuştur. Tüm dünyada yürütülen süpersicim kozmolojisi ile ilgili yoğun araştırma programları, geçtiğimiz birkaç yıl içinde yeni kozmolojik çerçeveler ortaya çıkarmış (13. Bölüm), süpersicim kuramının astrofizik gözlemler aracılığıyla sınanabilmesi için yeni yollar önermiş (14. Bölüm) ve kuramın zamanın okunu açıklamakta üstlenebileceği rol konusunda ilk kavrayışları sağlamıştır.

Zamanın oku, günlük yaşamda oynadığı belirleyici rolle ve evrenin başlangıcıyla yakından ilişkili olması nedeniyle, yaşadığımız gerçeklik ile en son bilimsel araştırmaların ortaya çıkarmaya çalıştığı daha rafine gerçeklik arasında tekil bir eşikte bulunuyor. Bu haliyle zamanın oku, ileride sözünü edeceğimiz gelişmelerden birçoğunu birleştiriyor. Bu konu, bundan sonraki bölümlerde de kendini gösterecek. Çok uygun, çünkü yaşamımızı biçimlendiren etkenlerin en baskın olanlarından biri zaman. Süpersicim kuramını ve onun uzantısı olan M-kuramını anladıkça kozmolojik kavrayışımız derinleşecek, bu da zamanın kaynağı ve oku konularına bakışımızı giderek netleştirecektir. Hayal gücümüzü serbest bırakırsak, kavrayışımızın günün birinde uzay-zaman içinde yolculuk yapmamıza ve böylece de şimdiye kadar erişemediğimiz alanları incelememize olanak sağlayacak kadar genişleyeceğini bile tasavvur edebiliriz (15. Bölüm).

Böylesi bir güce erişebilmek tabii ki çok büyük ölçüde olanak dışı. Ama uzayı ve zamanı kontrol etme gücünü hiç kazanamamış bile, derin bir kavrayış kazanmak da bize bir güç verir. Uzayın ve zamanın gerçek doğasını anlamak, insan aklının sınırlarını belirler. Sonunda insan deneyiminin en dış sınırlarını gösteren sessiz birer işaret olan uzayı ve zamanı anlayabiliriz.

Uzay ve Zaman Çağının Gelişi

Yıllar önce *Sisyphos Söyleri*'nin son sayfasını çevirdiğimde, metnin genelindeki iyimserlik havası karşısında şaşırmıştım. Ne de olsa, tekrar aşağıya yuvarlanacağını ve her şeye baştan başlayacağını bile bile bir kayayı tepeye kadar iterek çıkarmakla cezalandırılmış bir adamın öyküsünün mutlu sonla bitmesi beklenmez. Ama Camus, Sisyphos'un özgür iradesini kullanıp üstesinden gelinemeyecek engellere karşı durarak, o umursamaz evrende saçma bir işle cezalandırılmış olsa bile yaşamı sürdürmeyi seçmiş olmasında umut verici bir şeyler bulmuştur. Camus, Sisyphos'un dolaysız deneyimlerin ötesindeki her şeyden vazgeçerek ve daha derin bir kavrayış, daha derin bir anlam aramayı bırakarak zafere ulaştığını öne sürer.

Çoğu kimsenin ancak umutsuzluk göreceği yerde Camus'nün umudu yakalama yeteneği bana çok çarpıcı gelmişti. Ama yirmi yaşının altında bir gençken de aradan geçen yıllarda da Camus'nün evreni daha derinden kavramanın yaşamı daha zengin ve değerli kılmayacağı görüşünü bir türlü tam olarak kabul edemedim. Sisyphos Camus'nün kahramanıydı; bilim insanlarının en büyüklerinden Newton, Einstein, Niels Bohr ve Richard Feynman da benim kahramanlarım oldu. Feynman'ın bir giülü betimleyişini okuduğumda ona iyice hayran oldum. Feynman, nasıl herkes gibi gülün kokusunu aldığını, güzelliğini gördüğünü ama fizik bilgisi sayesinde o güzelliğin altındaki moleküler, atom ve atomaltı düzeydeki mucizevi görkemi de kavrayabildiği için yaşadığı deneyimin ne kadar zenginleştiğini anlatıyordu. Ben de Feynman'ın anlattığı şeyi istiyordum: Yaşama değer vermek ve evreni yalnızca duyularımızla algılayabildiğimiz kadarıyla değil de olası bütün düzeylerde kavramak. Evreni olabilecek en derin kavrayışa ulaşıncaya kadar araştırmak yaşamımın amacı haline geldi.

Bugün profesyonel bir fizikçi olarak, lisede fiziğe delice tutulmamda naif bir şeyler olduğunun uzunca bir süredir farkındaydım. Fizikçiler genellikle çalışma günlerinde vakitlerini kozmik bir hayranlık ve saygı ile çiçekleri seyrederek geçirmez.

Zamanlarının çoğunu tahtaya yazılmış karmaşık matematiksel denklemlerle mücadele ederek geçirirler, ilerleme yavaş olabilir. Umut veren fikirler çoğunlukla bir yere çıkmaz. Bilimsel araştırmanın doğası budur. Ama, ilerlemenin en yavaş olduğu zamanlarda bile, denklem çözerken ve hesap yaparken harcadığım çaba sayesinde evrenle daha yakın bir bağım olduğunu hissettim. Evreni anlamanın yolunun yalnızca onun gizlerini çözmek değil, bu gizlere kendimizi bırakmak da olabileceğini anladım. Yanıt bulmak harikadır. Deneyle kanıtlanan yanıtlar daha da harikadır. Ama sonunda yanlış olduğu kanıtlanan yanıtlar bile evrenle kurulan derin bir ilişkinin sonucudur; sorulara ve dolayısı ile evrenin kendisine parlak bir ışık tutan bir ilişkinin. Herhangi bir bilimsel araştırmanın "kayası" gerisin geri en başa dönecek olsa bile, bir şey öğrenmiş oluruz ve evrene ilişkin deneyimlerimiz zenginleşir.

Tabii ki bilim tarihi, ortak bilimsel araştırmalarımızın -yüzyıllar boyunca farklı kıtalardan sayısız bilim insanının oluşmasına katkıda bulunduğu- "kayasının" dağdan aşağı yuvarlanıp en başa gitmediğini gösterir. Sisypheos'un aksine, biz her şeye sıfırdan başlamıyoruz. Her kuşak kendinden öncekilerden bir şeyler devralır, öncüllerinin sıkı çalışmasına, kavrayışına ve yaratıcılığına saygı duyar ve "kayayı" biraz daha yukarı iter. Yeni kuramlar ve daha gelişmiş ölçümler bilimsel ilerlemenin işaretidir ve bu ilerleme kendinden öncekilerin üzerine inşa edilir, hemen hemen hiçbir zaman geçmiş tamamen silinmez. Durum böyle olduğu için, bizim işimiz hiçbir zaman saçma ve amaçsız değildir. Kayayı dağın tepesine doğru iterken görevlerin en zarif ve en asilini yerine getiririz: Evimiz dediğimiz bu yerin gizemini çözmek, keşfettiğimiz harikaların tadını çıkarmak ve bilgilerimizi ardımızdan gelenlere aktarmak.

Kozmik zaman ölçeğine göre iki ayak üzerinde yürümeyi daha yeni öğrenmiş bir tür için üzerinde düşündüğü bu konular akıllara durgunluk vericidir. Ama, son üç yüzyılda klasikten göreliliğe, oradan da kuantum gerçekliğine ilerlerken, şimdi de birleşik gerçeklik konusundaki keşiflerle uğraşmaktayken,

aklımız ve elimizdeki araçlar uzay ve zamanda büyük mesafeler kat etmekte ve bizi, büyük bir kılık değiştirme ustası olduğunu kanıtlayan bir dünyaya her zamankinden daha fazla yaklaştırmaktadır. Yavaş yavaş maskesini sıyırdığımız evrenle, ancak gerçeğin kazandırdığı berraklığın getirebileceği bir yakınlık kurduk. Yapacağımız daha çok keşif var, ama çoğunluk türümüzün nihayet çocukluk döneminin sonuna yaklaştığını düşünüyor.

Elbette, Samanyolu'nun" dış bölgelerindeki yerimizde bu aşamaya gelişimiz uzun zaman aldı. Öyle ya da böyle binlerce yıldır evren konusunda düşünüyor ve dünyamızı keşfediyorduk. Ancak o sürenin büyük kısmında bilinmeyene doğru gitmeyi deniyor ve her seferinde eve daha akıllanmış ama büyük ölçüde değişmemiş olarak dönüyorduk. Modern bilimsel araştırmanın bayrağını çekip bir daha geri dönmemek, Newton'un atılğanlığı sayesinde gerçekleşti. O günden beri hep daha ileriye gidiyoruz. Bütün yolculuğumuz da basit bir soruyla başladı.

Uzay nedir?

II. Bölüm

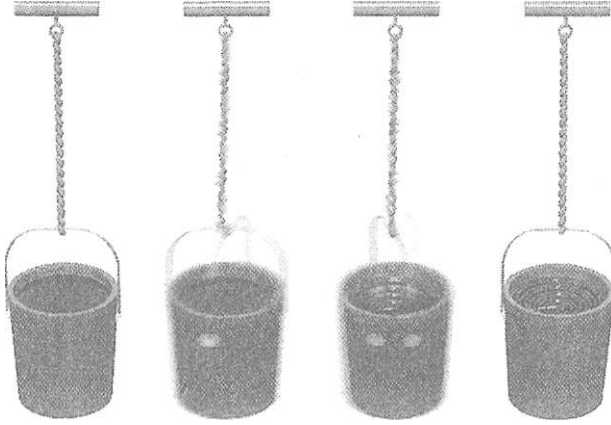
Evren ve Kova

Acaba Uzay insanın Bir Soyutlaması mı
Yoksa Fiziksel Bir Varlık mı?

Uç yüzyıl süren bir tartışmada bir kovanın ana karakter olması pek sık rastlanan bir şey olmasa gerek. Ama Sir Isaac Newton'a ait bir kova sıradan bir kova değildir. Newton'un 1689'da yaptığı basit bir deney o tarihten beri dünyanın en büyük fizikçilerinden bazılarını derinden etkilemiştir. Deney şudur: Su dolu bir kovayı alın, sapından bir halatla asın, kovayı döndürerek halatın burulmasını sağlayın ve bırakın. Başlangıçta kova dönmeye başlar ama içindeki su durağandır ve yüzeyi düzdür. Kova hızlandıkça hareketi sürtünme yoluyla yavaş yavaş suya aktarılır ve su da dönmeye başlar. Dönerken de suyun yüzeyi, Şekil 2.1 'deki gibi içbükey bir hal alır, yani kenarlarda yüksek, ortada daha alçaktır.

Deney budur; pek de insanın kalp atışlarını hızlandıracak bir şey değil. Ama biraz düşününce, dönmekte olan bu bir kova suyun son derece şaşırtıcı olduğu anlaşılır. Bizi üç yüzyıldır uğ-

raştıran bu problemi çözmeye çalışmak, evrenin yapısını kavrama yolunda attığımız en önemli adımlar arasındadır. Bunun nedenini anlamak için biraz bilgiye gerek var, ama sonuç bu çabaya değer.



Şekil 2.1 Suyun yüzeyi başlangıçta düzdür, kova dönmeye başladığında da suyun yüzeyi düzlüğünü korur. Daha sonra, su da kova ile birlikte dönmeye başlayınca yüzeyi içbükey bir şekil alır ve su dönmeye devam ettikçe -kova yavaşlayıp durduğunda bile-yüzeyi o şekli korur.

Einstein dan Önce Görelilik

"Görelilik" Einstein'la özdeşleştirilen bir sözcüktür ama kavramın tarihi çok daha eskidir. Galileo, Newton ve başkaları *doğrusal hızın* -yani bir nesnenin hareketinin doğrultusunun ve süratinin- göreliliğinin farkındaydılar. Günümüzün terimleriyle konuşursak, bir beysbol oyununda vurucunun bakış açısına göre beysbol topu saatte 150 kilometre hızla yaklaşmaktadır. Beysbol topuna göre saatte 150 kilometre hızla yaklaşan *vurucudur*. Her iki betimleme de doğrudur; bu yalnızca bir bakış açısı sorunudur. Hareket yalnızca göreliliğinde bir anlam ifade eder: Bir nesnenin doğrusal hızı yalnızca bir başka nesneninkine göre belirlenebilir. Büyük olasılıkla bunu yaşamışsınızdır. içinde bulunduğunuz tren vagonunun yanında bir başka vagon varsa ve bu iki vagon birbirlerine göre hareket ediyor-

sa, raylar üzerinde hareket eden trenin hangisi olduğunu hemen anlayamazsınız. Galileo bu etkiyi, kendi zamanının taşıt araçları olan tekneleri kullanarak tarif etmiştir. Galileo der ki, düzgünce gitmekte olan bir teknedeyken elinizden bıraktığınız para tıpkı kıyıda olacağı gibi ayağınızın dibine düşer. Kendi bakış açınıza göre siz durağansınızdır, su ise geminin gövdesine göre hareket etmektedir. Bu bakış açısına göre siz hareketsiz olduğunuz için paranın ayağınıza göre hareketi tıpkı gemiye binmeden önceki gibidir.

Ama biraz düşünürseniz, burada bir gariplik olduğunun farkına varırsınız. Hızdaki değişimleri fark etmenizi sağlayan şey esas olarak nedir? Eğer doğrusal hız yalnızca karşılaştırmalar sonucunda *-bu cisim şu cisme göre hareket ediyor-* bir anlam ifade ediyorsa, nasıl oluyor da doğrusal hızdaki değişimler karşılaştırma yapmadan da anlamlı olacak şekilde farklı olabiliyor? Aslında acaba bunlar da bir tür karşılaştırma gerektiriyor olabilir mi? Acaba ivmeli hareketi her yaşadığımızda veya ondan her söz edişimizde açıkça görülmeyen, gizli bir karşılaştırma yapıyor olabilir miyiz? Yöneldiğimiz temel soru budur, çünkü bu soru *-belki şaşırtıcı ama-* uzay ve zamanın anlamını çevreleyen en derin konularla bağlantılıdır.

Galileo'nun hareket konusundaki kavrayışı, en önemlisi de Dünyanın hareket ettiğini söylemesi Enkizisyon'un gazabına uğramasına neden oldu. Çok daha ihtiyatlı olan Descartes, benzer bir akıbete uğramamak için ne yapması gerektiğini araştırdı ve *Principia Philosophiae* adlı eserinde hareket konusundaki -otuzuyl sonra Newton'un dikkatli incelemelerine göğüs gere-meyecek olan- görüşlerini iki anlama da gelecek şekilde dikkatli bir biçimde ifade etti. Descartes, nesnelerin hareket durumlarının değiştirilmesine karşı direnç gösterdiklerinden söz ediyordu: Hareketsiz bir cisim, birisi veya bir şey onu hareket etmeye zorlamadıkça hareketsiz kalır; bir doğru üzerinde sabit bir hızla hareket eden bir cisim, birisi veya bir şey bunu değiştirmedikçe yapmakta olduğu hareketi sürdürür. Ama Newton, bu "hareketsiz" ve "doğru üzerinde sabit bir hız" kavramları gerçek-

ten ne anlama geliyor, diye sordu. Neye göre "hareketsiz" ve neye göre "sabit hızlı hareket"? Kimin bakış açısına göre "hareketsiz" ya da "sabit hızlı hareket"? Eğer doğrusal hız sabit değilse, neye göre ya da kimin bakış açısına göre sabit değil? Descartes hareketin bazı özelliklerini doğru bir biçimde saptamıştı, ama Newton'a göre kilit soruları yanıtsız bırakmıştı.

Newton'un -öylesine gerçeğin peşine düşmüş bir insandı ki, bir keresinde göz anatomisi çalışmak için kendi gözüyle göz kemiğinin arasına kör bir iğne sokmuştu, sonraki yıllarda Darphane Müdürü olduğunda da kalpazanlara en ağır cezaların verilmesini sağlamış ve yüzden fazla kişinin darağacına gitmesine neden olmuştu- yanlış ve eksik akıl yürütmeye hiç tahammülü yoktu. Dolayısıyla yanlış düzeltmeye karar verdi. Kova¹ konusunu da o zaman ortaya attı.

Kova

Kovayı bıraktığımızda hem kendisi, hem de içindeki su dönüyordu, suyun yüzeyi içbükeydi. Newton'un sorduğu soru şuydu: Suyun yüzeyi *neden* bu şekli alıyordu? Döndüğü için, diyebilirsiniz; nasıl otomobilde bir dönemeci dönerken yana doğru savrulduğumuzu hissedersek, su da dönmekte olan kovanın kenarlarına doğru savrulur. Bu suyun gidebileceği tek doğrultu da yukarıdır. Bu düşünce bir dereceye kadar mantıklı ve sağlam olmakla birlikte Newton'un sorusunun gerçek amacına ulaşmaktan uzaktır. Newton suyun döndüğünü söylemenin *ne anlama geldiğini* bilmek istiyordu: Su neye göre dönüyordu? Newton, hareket konusunun temeliyle uğraşıyordu ve ivmeli bir hareketin, örneğin dönmenin bir şekilde dış karşılaştırmalara gereksiniminin ötesinde olduğunu kabul etmeye henüz hazır değildi.*

Kovanın kendisini referans cismi olarak kullanmak doğal bir öneri olurdu. Ama Newton'un ileri sürdüğü gibi bu işe yaramaz. Kova dönmeye başladığında su ile kova arasında kesinlikle göre-

* Dönme hareketini tanımlarken bazen merkezkaç kuvvet ve merkezcil kuvvet terimleri kullanılır. Aslında bunlar yalnızca birer addır. Amacımız dönme hareketinin neden bir kuvvet ortaya çıkardığını anlamaktır.

İ bir hareket vardır, çünkü su hemen hareket etmeye başlamaz. Ona rağmen suyun yüzeyi düz kalır. Derken biraz sonra, su dönerken yani kova ile su arasında görelî hareket *yokken*, suyun yüzeyi içbükey olur. Yani referans cismimiz kova olursa, beklediğimizin tam tersi bir sonuç ortaya çıkar: Görelî hareket varken suyun yüzeyi düzdür, görelî hareket yokken suyun yüzeyi içbükeydir.

Aslında Newton'un kova deneyini biraz ileri götürebiliriz. Kova dönmeye devam ettikçe halat yeniden burulacak (diğer yönde) ve bu da içindeki su dönmeye devam ederken kovanın dönmekle yavaşlamasına ve bir an için durmasına neden olacaktır, ama içindeki su dönmeye devam edecektir. Bu noktada su ve kova arasındaki görelî hareket deneyin başındakiyle *aynıdır* (sonucu etkilemeyen saat yönünde dönme ve saat yönünün tersi yönde dönme dışında), ama suyun yüzeyinin şekli *farklıdır* (önce düzdü, şimdi içbükeydir); bu da suyun yüzeyinin aldığı şeklin görelî hareketle açıklanamayacağını net bir biçimde gösteriyor.

Suyun hareketi için kovanın referans olamayacağı anlaşılınca, Newton cesur bir adım attı. Kova deneyinin bir benzerinin uzak, soğuk ve tümüyle boş uzayda yapıldığını düşleyin, dedi. Suyun yüzeyinin şekli kısmen Dünya'nın kütleçekiminden kaynaklandığı ve bu deneyde de Dünya olmadığı için aynı deneyi yapamayız. O nedenle, uygulanabilir bir örnek olarak boş uzayın karanlığında yüzen dev bir kovamız olduğunu ve korkusuz astronot Homer'in bu dev kovanın içyüzüne sıkıca bağlı olduğunu düşünün. (Aslında Newton bu örneği vermedi, onun verdiği örnekte birbirine ipe bağlı iki taş vardı, ama anlatılmak istenen şey aynıdır.) Homer'in kovaya doğru bastırıldığını *bissetmesi*, yüzünün derisinin gerilmesi, midesinde hafif bir basınç oluşması ve saçlarının (her iki telin de) geriye doğru gitmesi kovanın döndüğünün (suyun kovanın çeperine doğru savrulurken içbükey bir yüzey oluşturmalarının benzeri) işaretidir. Soru şudur: *Tamamen* boş uzayda -Güneş yok, Dünya yok, hava yok, çörek yok, hiçbir şey yok- kovanın "ona göre" dönmekte olduğunu söyleyebileceğimiz "o şey" ne olabilir? Uzayın kova ve içindekiler dışında ta-

mamen boş olduğunu düşündüğümüzden ilk bakışta "o şey" olarak kullanabileceğimiz bir şey yokmuş gibi görünür. Ama Newton aynı fikirde değildi.

Onun yanıtı, değerlendirme çerçevesi olarak "nihai kabı" yani *uzayın kendisini* seçmektir. Hepimizin içinde olduğu ve tüm hareketlerin içinde yer aldığı -kendisinin *mutlak uzay*² adını verdiği- saydam ve boş alanın gerçek bir fiziksel varlık olduğunu ileri sürdü. Mutlak uzayı tutamayız, tadamayız, koklayamayız ve işitemeyiz, ama Newton mutlak uzayın "bir şey" olduğunu söyledi. Mutlak uzayın, hareketi tanımlamak için gereken en sağlam değerlendirme çerçevesi olduğunu öne sürdü. Bir cisim eğer mutlak uzaya göre durağansa, gerçekten durağandır. Bir cisim eğer mutlak uzaya göre hareket ediyorsa, gerçekten hareket halindedir. En önemlisi de, bir cisim eğer mutlak uzaya göre ivmeleniyorsa, gerçekten ivmeleniyordur.

Newton bu önermeyi, yeryüzünde yapılan kova deneyini açıklamak için şu şekilde kullandı: Deneyin başında kova mutlak uzaya göre dönmektedir, ama su mutlak uzaya göre durağandır. Suyun yüzeyinin düz olmasının nedeni budur. Su kova ile beraber dönmeye başladığında artık mutlak uzaya göre dönmektedir, yüzeyinin içbükey olmasının nedeni budur. Hatalın burulması nedeniyle kova yavaşladığında, su dönmeye devam eder -mutlak uzaya göre dönmeye devam eder- yüzeyinin içbükey olarak kalmasının nedeni de budur, işte, su ile kova arasındaki görelî hareket gözlemleri açıklayamazken, su ile mutlak uzay arasındaki görelî hareket açıklamaktadır. Hareketi tanımlamak için gerekli olan gerçek referans sistemini uzayın kendisi sağlamaktadır.

Kova yalnızca bir örnektir; doğal olarak buradaki akıl yürütme çok daha geneldir. Newton'un bakış açısına göre, otomobilde bir dönemeci dönerken mutlak uzaya göre ivmelendiğiniz için doğrusal hızınızdaki değişikliği hissedersiniz, içinde bulunduğunuz uçak pistten havalanmak üzere hızlanırken mutlak uzaya göre ivmelendiğiniz için koltuğa doğru bastırıldığınızı hissedersiniz. Buz pateniyle kendi ekseniniz çevresinde dö-

nerken mutlak uzaya göre ivmelendiğiniz için kollarınızın dışarıya doğru açıldığını hissedersiniz. Eğer siz buzun üzerinde hareketsiz dururken birisi buz pistini tutup döndürebilecek olsaydı (ideal olarak patenlerin sürtünmesiz olduğunu varsayıyoruz) -ve böylece sizinle buz pisti arasında aynı görelî hareket ortaya çıksaydı- mutlak uzaya göre ivmelenmeyeceğiniz için kollarınızın dışarı doğru açıldığını hissetmezsiniz. İnsan vücudunun kullandığı örneklerin ayrıntılarında boğulmamak için, Newton'un birbirine iple bağılı iki taş örneğini düşünelim. Taşlar dönerken mutlak uzaya göre ivmelendikleri için ip gerilir. Hareket etmenin ne demek olduğu konusunda son sözü mutlak uzay söylemektedir.

Ama mutlak uzay aslında nedir? Bu soruyla uğraşırken Newton biraz kaçamak yanıtlar verdi. *Principia*'da önce şöyle yazmıştı: "Herkesin bildiğı şeyler olduğu için zamanı, uzayı, yeri ve hareketi tanımlamıyorum."" Böylece bu terimleri kesin bir biçimde tanımlamaktan kaçınmış oluyordu. Sonraki şu sözleri ise ünlü olmuştur: "Mutlak uzay, doğası gereğı, herhangi bir dış noktayı referans almaksızın, her zaman aynıdır ve hareketsizdir." Yani, mutlak uzay vardır ve ebedidir, nokta. Ama doğru-
dan göremeyeceğimiz, ölçemeyeceğimiz ve üzerinde bir etkimizin olamayacağı bir şeyin varlığını ve önemini sadece ilan ederken Newton'un kendini pek de rahat hissettmediğinin bazı işaretleri vardı. Şöyle yazmıştır:

Bazı cisimlerin gerçek hareketlerini keşfetmek ve görünen hareketlerinden etkin bir biçimde ayırmak gerçekten son derece zordur, çünkü bu hareketlerin yer aldığı hareketsiz uzayın bölümlerini duyularımızla gözlemlemek imkânsızdır.⁴

Böylece Newton bizi biraz sıkıntılı bir durumda bırakıyor. Mutlak uzayı fiziğin en temel unsurlarından birinin -hareketin- tanımının merkezine yerleştiriyor, ama tanımı belirsiz bırakıyor ve böylesine önemli bir konuyu böyle kaçamak bir biçimde ele

almaktan duyduğu rahatsızlığı da ifade ediyor. Bu rahatsızlığı başkaları da paylaşmıştır.

Uzay Karmaşası

Bir keresinde Einstein, birisi "kırmızı", "sert" veya "düş kırıklığına uğramış" dediği zaman hepimiz ne demek istendiğini anlarız, demişti. Ama "psikolojik deneyimle bağlantısı daha dolaylı olan 'uzay' sözcüğüne gelince, etki alanı çok geniş bir yorum belirsizliği vardır."⁵ Bu belirsizliğin tarihçesi oldukça eskidir. Uzayın anlamını çözmek için verilen uğraş antik çağlara kadar gider. Çağlar boyunca "uzay"ın anlamını şu ya da bu nedenle tartışanlar arasında Demokritos, Epikuros, Lucretius, Pythagoras, Platon, Aristoteles ve onların birçok takipçisi vardı. Uzay ve madde arasında bir fark var mıdır? Uzayın, maddesel cisimlerden bağımsız bir varlığı var mıdır? Boş uzay diye bir şey var mıdır? Uzay ve madde karşılıklı olarak birbirlerini dışlar mı? Uzay sonlu mudur, sonsuz mu?

Son binyılda uzayın felsefi açıdan çözümlenmeye çalışılması genellikle dinbilimsel araştırmalarla birlikte ortaya çıkmıştır. Bazılarına göre Tanrı her yerdedir, bu da uzaya tanrısal bir karakter verir. Bu düşünce biçimi, kimilerinin Newton'un akıl hocalarından⁶ biri olmuş olabileceğini düşündüğü on yedinci yüzyıl filozofu ve dinbilimcisi Henry More tarafından savunulmuştur. More, uzay boş olsaydı var olmazdı diye düşünüyordu, ama aynı zamanda bunun çok da anlamı olmayan bir gözlem olduğunu, çünkü maddesel cisimler olmasa bile uzayın ruhla dolu olduğunu ve *hiçbir zaman* gerçekten boş olmadığını söylüyordu. Newton da benzer bir fikre sahipti, uzayın maddesel cisimler kadar "ruhsal maddeyle" de dolu olduğunu kabul ediyordu, ama bu ruhsal maddenin "maddenin hareketine engel olmadığını"⁷ ekleyecek kadar da dikkatliydi. Newton, mutlak uzayın Tanrı'nın idrak edilişi olduğunu ileri sürüyordu.

Uzay konusundaki böylesi felsefi ve dinsel düşünceler ikna edici ve kışkırtıcı olabilir, ama Einstein'ın yukarıda aktardığımız uyarıcı yorumunda olduğu gibi, bu düşünceler net bir betimleme

özelliğinden yoksundur, ki bu da çok önemlidir. Ama böyle söylemlerden ortaya çıkan çok temel ve kesin olarak tanımlanmış bir soru *vardır*. Uzaya daha sıradan maddesel cisimlere (örneğin şimdi elinizde tutmakta olduğunuz kitaba) atfettiğimiz gibi bağımsız bir gerçeklik atfetmeli miyiz, yoksa uzayı sıradan maddesel cisimler arasındaki ilişkileri tanımlamak için yalnızca bir dil olarak mı yorumlamalıyız?

Newton'un çağdaşı, büyük Alman filozof Gottfried Wilhelm von Leibniz uzayın beylik anlamda var olmadığından emindi. Uzaydan bahsetmenin, şeylerin birbirlerine göre yerlerini belirlemenin kolay ve elverişli bir yolundan başka bir şey olmadığını iddia ediyordu. İçinde/f/cisimler olmazsa uzayın kendisinin bağımsız bir anlamı ya da varlığı olmadığını ileri sürüyordu. İngiliz alfabesini düşünün. Yirmi altı harften oluşur, harflerin birbirlerine göre belli ilişkileri vardır: a ile b yan yanadır; d ile) arasında beş harf vardır; x u'dan iki harf sonra gelir vb. Ama harfler olmazsa alfabenin de bir anlamı yoktur; "harfler-üstü" bağımsız bir varlığı yoktur. Tersine, alfabe harflerle ve bu harfler arasında belirlediği ilişkilerle varlığa kavuşur. Leibniz, aynı şeyin uzay için de geçerli olduğunu iddia ediyordu: Uzayın, bir cismin konumuyla başka bir cismin konumu arasındaki ilişkiyi tartışmak için doğal bir dil sağlamanın ötesinde bir anlamı yoktu. Leibniz'e göre eğer uzaydan bütün cisimler çıkarılacak olsaydı -yani eğer uzay tamamen boş olsaydı- harfleri olmayan bir alfabe kadar anlamsız olurdu.

Leibniz, *göreci* adı yakıştırılan bu konumunu desteklemek amacıyla bir dizi sav ileri sürdü. Örneğin, eğer uzay gerçekten bir varlıksa, bir arka plan maddesiye, Tanrı'nın evreni bu madde içinde nereye yerleştireceğini seçmiş olması gerektiğini söyledi. Ama hiçbir kararı asla rastgele ve gelişigüzel olmayan, tüm kararları sağlam nedenlere dayanan Tanrı, bir örnek uzay boşluğunun bir köşesini nasıl diğer bir köşesine tercih etmiş olabilir? Bilimsel algıları güçlü olanlara bu sav ucuz gelir. Bununla birlikte, Leibniz'in ileri sürdüğü diğer savlarda yaptığı gibi, bu savdan da dinbilimsel öğeler çıkartılırsa güç sorularla karşı kar-

şıya kalırız: Evrenin uzaydaki yeri neresidir? Eğer evren, içindeki her şeyin birbirine göre konumları aynı kalmak koşuluyla, bir bütün olarak birkaç metre sağa ya da sola hareket ettirilebilseydi, bunu nasıl anlardık? Evrenin uzay maddesi içindeki hızı nedir? Uzayı ve uzayın içindeki değişiklikleri temel olarak saptayamıyorsak, uzayın gerçekten var olduğunu nasıl iddia edebiliriz?

İşte tam burada Newton kovasıyla sahneye çıktı ve tartışmanın karakterini kökten değiştirdi. Newton da mutlak uzayın belirli özelliklerinin doğrudan saptanmasının çok zor, hatta olanaksız görüldüğünü kabul ediyordu, ama mutlak uzayın varlığının gözlenebilir bazı sonuçları olduğunu kanıtlamaya çalıştı: Dönen kova örneğinde olduğu gibi, bazı ivmelenmeler, mutlak uzaya göre ivmelenmedir. Dolayısıyla Newton'a göre, kovadaki suyun yüzeyinin içbükey olması, mutlak uzayın varlığının bir sonucuydu. Newton'a göre, ne kadar dolaylı bir yoldan olsa da, bir şeyin varlığı konusunda sağlam bir kanıt varsa, tartışma sona ererdi. Tek bir zekice darbeyle Newton, uzay konusundaki tartışmayı felsefi düşüncelerden bilimsel olarak kanıtlanabilir verilere kaydırdı. Bunun yarattığı etki sanki elle tutulabilir gibiydi. Fazla gecikmeksizin Leibniz de kabul etmek zorunda kaldı: "Bir cismin mutlak gerçek hareketi ile bir başka cisme göre yalnızca konumunun değişmesi arasında bir fark olduğunu kabul ediyorum."⁸ Bu, Newton'un mutlak uzayına boyun eğme değil, göreci konuma sıkı bir darbeydi.

Sonraki iki yüzyıl boyunca Leibniz'in ve başkalarının uzaya bağımsız bir gerçeklik atfeden savları bilim dünyasında bir yankı uyandırmadı.⁹ Sarkaç Newton'un uzay anlayışına doğru kaymıştı; mutlak uzay kavramı üzerine temellendirdiği hareket yasaları bütün dikkati üzerine çekti. Açıktır ki bu yasaların kabul görmesinin temel nedeni, hareketi betimlemekteki başarılarıydı. Ancak Newton'un fizikteki tüm başarılarını, gerçekten önemli tek keşfi olarak gördüğü mutlak uzay kavramını destekleyen sağlam bir temel olarak düşünmesi, çarpıcıdır. Newton için her şey uzayla ilgiliydi.¹⁰

Mach ve Uzayın Anlamı

Büyüme çağlarımda, babamla birlikte Manhattan sokaklarında yürürken bir oyun oynardık. Birimiz çevreye bakar ve o an çevrede olan bir şeyi seçer -hızla geçen bir otobüs, bir pencere pervazına konan bir güvercin, yere bozuk para düşüren bir adam- ve o olayın otobüsün tekerleği, uçan güvercin veya yere düşmekte olan madeni para gibi sıradışı bir bakış açısından nasıl görüneceğini anlatırdı. Bilmeceyi çözmek için "Alçak, doku-lu duvarları olan karanlık ve silindirik bir yüzeyde yürüyorum ve gökten kalın, kıvrıkcık ve beyaz bir nesne yağıyor" gibi tuhaf bir ifadenin, bir sokak satıcısının içine lahana turşusu koymakta olduğu sosisli sandviçin üzerinde yürüyen bir karıncanın bakış açısı olduğunu bulmak gerekiyordu. Her ne kadar ben ilk fizik dersimi almadan yıllarca önce bu oyunu oynamayı bırakmış olsak da, Newton yasalarıyla ilk karşılaştığımda çektiğim zorluğun nedenlerinden biri bu oyun olabilir.

Bu oyun dünyaya farklı bakış açılarından bakmayı destekliyor ve her bakış açısının diğeri kadar geçerli olduğunu vurguluyordu. Ama Newton'a göre, dünyaya istediğiniz perspektiften bakmakta kesinlikle özgür olsanız da, farklı bakış açıları hiçbir biçimde eşit değildir. Buz patencisinin pateninin üzerindeki bir karıncanın bakış açısından, dönen pist ve salondur; tribündeki bir seyircinin bakış açısından ise, dönen patencidir. Bu iki bakış açısı da aynı derecede geçerli, eşit ve yerleri her iki dönüşün birbirlerine göre simetrik olan ilişkisi üzerinde gibi görünüyor. Ama Newton'a göre, bu perspektiflerden biri diğerine göre daha doğrudur. Çünkü eğer *gerçekten* dönen patenciye kolları dışarı doğru açılacaktır, ama eğer *gerçekten* dönen pist ise patencinin kolları dışarı doğru açılmayacaktır. Newton'un mutlak uzay kavramını kabul etmek, mutlak bir ivme kavramını ve özellikle de kimin ya da neyin gerçekten döndüğü konusunda mutlak bir yanıtı kabul etmek anlamına geliyordu. Nasıl olup da bunun doğru olabileceğini anlamaya çalıştım. Başvurduğum her kaynak -ders kitapları da, öğretmenler de- sabit hızlı hareket söz konusu olduğunda yalnızca göreceli hareketin önemi olduğu ko-

nusunda fikir birliği içindeydi. O halde ivmeli hareketin neden o kadar farklı olduğunu bir türlü anlayamıyordum. Hızı sabit olmayan hareket göz önüne alındığında, neden önemli olan tek şey -tıpkı görelî hız gibi- *görelî* ivme olmuyordu? Mutlak uzayın varlığı tersini emrediyordu, ama bana bu durum son derece garip görünüyordu.

Çok sonra, son birkaç yüzyıl içinde pek çok fizikçinin ve filozofun -kimi zaman yüksek sesle, kimi zaman sessizce- tam da bu konuyla uğraştığını öğrendim. Her ne kadar Newton'un kova-sı bir bakış açısını değil de öbürünü tercih edenin mutlak uzay olduğunu kesin olarak gösteriyor gibi görünse de (eğer biri ya da bir şey mutlak uzaya göre dönüyorsa *gerçekten* dönüyordur, yoksa dönmüyordur) bu konu üzerinde düşünen pek çok kimse için bu çözüm hiç doyurucu değildi. Mutlak uzay kavramı, hiç-bir bakış açısının diğerinden "daha doğru" olamayacağına ilişkin hissin ötesinde, Leibniz'in yalnızca maddesel cisimler arasındaki görelî hareketin bir anlamı olduğu yolundaki gayet mantıklı önermesinin ötesinde, pek çok kişinin, mutlak uzayın nasıl olup da -kova örneğinde olduğu gibi- gerçek ivmeli hareketi belirlememize olanak verirken, gerçek sabit hızdaki hareketi tanımlamamıza olanak vermediği sorusunu sormasına yol açmıştır. Ne de olsa, eğer mutlak uzay gerçekten varsa, yalnızca ivmeli hareket için değil *her tür* hareket için bir ölçüm referansı sağlamalıdır. Eğer mutlak uzay gerçekten varsa, o zaman neden bulunduğumuz konumu, başka maddesel cisimlere göre değil de mutlak olarak bilmemize olanak sağlamıyor? Eğer mutlak uzay gerçekten varsa, o zaman neden biz görünüşe göre ona hiçbir etki yapamazken o bizi etkileyebiliyor, örneğin kendi eksenimiz çevresinde dönerken kollarımızın dışarı doğru açılmasına neden oluyor?

Newton'un çalışmalarından sonraki yüzyıllarda bu konular zaman zaman tartışıldı, ama Avusturyalı fizikçi ve filozof Ernst Mach sahneye çıkıp uzay konusunda cesur, ileri-yi gören ve son derece etkileyici yeni bir kuram önerdiğinde 1800'lerin ortalarına gelinmişti. Başka şeylerin yanı sıra, bu kuramın ileride Albert Einstein üzerinde derin etkisi olacaktı.

Mach'ın kavrayışını anlamak için -daha doğrusu, genellikle Mach'a* atfedilen görüşlerin çağdaş bir yorumu için- kovaya geri dönelim. Newton'un savında garip bir yan vardır. Kova deneyi bizi, suyun yüzeyinin neden bir durumda düz, diğer bir durumda ise içbükey olduğunu açıklamaya davet ediyor. Açıklama ararken, iki durumu da inceledik ve bunlar arasındaki en önemli farkın suyun dönüp dönmemesi olduğunu bulduk. Suyun yüzeyinin şeklini hareket durumu ile açıklamaya çalışmamızda şaşırtıcı bir yan yok. Ama işte önemli nokta da burada: Mutlak uzayı öne sürmeden önce, Newton suyun hareket durumunun belirlenmesi için olası referans sistemi olarak yalnızca kovaya odaklanmıştı, ama gördüğümüz gibi bu yaklaşım başarısız oluyor. Ancak suyun hareketini saptamak için kullanabileceğimiz başka doğal referans sistemleri de var, örneğin deneyin yapıldığı laboratuvarın zemini, duvarları, tavanı. Bu deneyi güneşli bir günde açık havadayapacak olsaydık, çevredeki binalar veya ağaçlar ya da ayağımızın altındaki toprak suyun dönüp dönmediğini saptamak için kullanabileceğimiz "durağan" referans noktaları oluştururlardı. Aynı deneyi uzayda yapacak olsaydık, uzak yıldızları durağan referans noktalarımız olarak kullanabilirdik.

Bu da şöyle bir soru doğurur. Newton kovayı kolayca bir kenara fırlatıp atabilir ve gerçek hayatta başvurmayaya meyilli olduğumuz, örneğin su ve laboratuvar, su ve Dünya veya su ve gökyüzündeki sabit yıldızlar arasındaki görelî hareketi hızlıca atlayıp geçebilir miydi? Böyle bir görelî hareket, mutlak uzay kavramının kullanılması ihtiyacını ortadan kaldırarak, suyun yüzeyinin şeklini *açıklayabilir miydi*? Mach'ın 1870'lerde ortaya attığı sorgulama mantığı buydu.

Mach'ın bakış açısını daha iyi anlayabilmek için uzayda olduğunuzu, kendinizi sakın, hareketsiz ve ağırlıksız hissettiğini-

* Mach'ın birazdan ele alacağımız konular üzerindeki kesin fikirleri tartışmalıdır. Yazdıklarından bazıları biraz belirsizdir ve ona atfedilen bazı fikirler, eserlerinin sonradan yorumlanması sonucunda ortaya çıkmıştır. Mach, bu yorumlardan haberdar gibi görüldüğü ve düzeltme yapmadığı için, kimileri Mach'ın bu sonuçlara katıldığını ileri sürmüştür. Ama ben her "Mach'ın ileri sürdüğü" veya "Mach'ın fikirleri" yazdığımda, siz "Mach'ın başlattığı bir yaklaşımın şu an geçerli olan yorumu" şeklinde anlarsanız, tarihsel kesinlik açısından daha doğru olacaktır.

zi hayal edin. Çevrenize baktığınızda görebildiğiniz uzak yıldızlar da tamamen hareketsiz görünüyor. (Bu, gerçek bir Zen anıdır.) Tam bu sırada yanınızdan biri geçiyor, sizi tutup kendi çevrenizde döndürmeye başlıyor, iki şey fark edersiniz. İlki, kol ve bacaklarınız çekiliyormuş gibi hissedersiniz ve eğer serbest bırakırsanız dışarı doğru açılırlar, ikincisi, uzak yıldızlara baktığınızda, yıldızlar size artık hareketsiz görünmez; uzak gökyüzünde devasa çemberler çizerek dönüyor gibi görünürler. Yaşadığınız bu deneyim, vücudunuzun üzerine etkiyen bir kuvveti hissetmek ile uzak yıldızlara göre harekete tanık olmak arasında yakın bir ilişki olduğunu ortaya koyar. Aynı deneyi bu sefer farklı bir ortamda tekrarlarlarken bunu aklınızda tutun.

Şimdi de *tümüyle* boş uzayın siyah boşluğunda olduğunuzu hayal edin: Galaksiler yok, yıldızlar yok, gezegenler yok, hava yok, mutlak siyahlıktan başka hiçbir şey yok. (Gerçek bir varoluşçu an.) Bu kez dönmeye başladığınızda bunu hissedebilir misiniz? Kol ve bacaklarınız dışarı doğru çekiliyormuş gibi hisseder misiniz? Gündelik hayattaki deneyimlerimiz bizi "evet" demeye yöneltiyor: Ne zaman dönmeme durumundan (hiçbir şey hissetmediğimiz durum) dönme durumuna geçsek, kol ve bacaklarımız dışarı doğru çekileceği için farkı hissedebiliriz. Ama şu son örnek hiçbirimizin yaşadığı hiçbir şeye benzemiyor. Bildiğimiz evrende her zaman, çeşitli hareket durumlarımız için referans noktası olarak kullanabileceğimiz yakın veya uzak (örneğin uzak yıldızlar) başka maddesel cisimler vardır. Ama verdiğimiz bu örnekte "dönmeme" durumunu "dönme" durumundan diğer maddesel cisimlerle karşılaştırma yaparak ayırt etmenizin olanağı yoktur; çünkü başka maddesel cisimler *yoktur*. Mach bu gözlemi çok önemsendi ve çok büyük bir adım daha ileri götürdü. Bu durumda, çeşitli dönme durumları arasında bir fark *hissedilmesinin* de bir yolu olmayabileceğini ileri sürdü. Daha doğrusu, Mach biz hariç boş bir evrende dönme ve dönmeme arasında bir fark olmayacağını -karşılaştırma için bir referans noktası olmadığı zaman hareket ve ivme kavramı yoktur- dolayısı ile dönme ve dönmemenin aynı olduğunu ileri sürüyordu. Mach'a göre,

eğer Newton un birbirine iple bağlanmış taşları boş uzayda dönüyor olsaydı ip gerilmeyecekti. Eğer boş bir evrende dönüyor olsaydınız, kol ve bacaklarınız dışarı doğru açılmayacak, kulak sıvınız etkilenmeyecek, hiçbir şey hissetmeyecektiniz.

Bu derinliği olan ve kolayca anlaşılmayan bir öneridir. Tam olarak anlamak için, kendinizi verilen örneğin içinde gerçekten de düşünebilmeniz ve tamamen boş uzayın siyah, tekdüze durgunluğunu tam olarak hayal etmeniz gerekir. Bu durum, ayağınızın altında zemini hissettiğiniz veya gözlerinizin kapıdan ya da pencereden sızan çok az miktardaki ışığa yavaş yavaş uyum sağladığı karanlık bir odada olmaya hiç benzemez. Tersine, çevrede *hiçbir şey* olmadığını hayal ediyoruz; o nedenle kesinlikle zemin de yoktur, gözlerin uyum sağlayacağı ışık da. Nereye uzandığınıza ya da baktığınıza bağlı olmaksızın, kesinlikle hiçbir şey görmez ve hissetmezsiniz. Değişmez siyahlıkta bir koza sizi sarmış durumda, karşılaştırma yapmak için kullanabileceğiniz hiçbir maddesel varlık yok. Mach'ın iddiası şuydu: Karşılaştırma cisimleri olmadan hareket ve ivme kavramları anlamlarını kaybeder. Konu sadece döndüğünüzde bir şey hissetmeyecek olmanızla ilgili değil, çok daha temel bir şey. Boş bir evrende tamamen hareketsiz olmak ve düzgün bir biçimde dönmek birbirinden farklı şeyler değildir.*

Newton buna katılmazdı tabii. O, tamamen boş uzayda bile *uzay* olduğunu öne sürmüştü. Her ne kadar uzay dokunulamayan ve doğrudan elle tutulamayan bir şey ise de, Newton'a göre, yine de cisimlerin kendisine göre hareket ettiğini söyleyebileceğimiz bir şey sağlıyordu. Ama Newton'un bu sonuca nasıl ulaştığını anımsayın: Dönme hareketi üzerinde düşündü ve labora-

*Fizikile doğuştan gelen hisler arasında hemen bir ilişki kurulmasını sağladığı için insanlı örneklerden hoşlanıyorsam da, vücudumuzun bir bölümünü diğerine göre irade-mizle hareket ettirebiliyor oluşumuz -yani vücudumuzun herhangi bir bölümünü başka bir bölümünün hareketi için bir referans sistemi olarak kullanıyor oluşumuz (bir kolumuzu başımıza göre döndürmek gibi)- önemli bir sakınca oluşturuyor. Konumuzla doğrudan ilgili olmayan karışıklıkları önlemek için düzgün dönme hareketini -vücudun her kısmının aynı biçimde, birlikte döndüğü dönme hareketini- vurguluyorum. Bu nedenle, vücudunuzun dönmesinden söz ettiğimde, Newton'un bir iple birbirine bağlanmış iki taş gibi ya da Olimpiyatlar'da performansının son anlarındaki bir buz patencisi gibi, vücudunuzun her kısmının aynı açısal hızla döndüğünü düşünmelisiniz.

tuvarda elde edilen sonuçların (suyun yüzeyi içbükey bir şekil alır; Homer vücudunun dev kovanın kenarlarına doğru bastırıldığını hisseder; kendi çevrenizde dönerken kollarınız dışarı doğru açılır; dönmekte olan iki taşı bağlayan ip gerilir) deneylerin boş uzayda yapılması durumunda da aynı kalacağını *varsaydı*. Bu varsayım, Newton'u boş uzayda hareketin kendisine göre tanımlanabileceği bir şey aramaya yöneltti; o şeyin de uzayın kendisi olduğunu öne sürdü. Mach, bu kilit varsayıma meydan okudu: Laboratuvarda olanların tamamen boş uzayda olmayacağını öne sürdü.

Mach in başlattığı bu tartışma, iki yüzyıldan uzun zamandır Newton'un çalışmalarına yönelik en önemli meydan okumaydı ve yıllar boyunca da fizik dünyasını sarsmaya devam etti (dahası, Vladimir İliç Lenin Londra'da yaşadığı 1909 yılında yazdığı felsefi bir kitapçıkta başka konuların yanı sıra Mach'ın çalışmasının bazı yönlerini de tartışmıştır"). Fakat eğer Mach haklı ise ve boş evrende dönme kavramı yoksa bile -ki bu Newton'un mutlak uzay kanıtlamasını boşa çıkarır- yeryüzünde yapılan ve suyun yüzeyinin içbükey şekil aldığı kova deneyi gene açıklamasız kalıyor. Mach suyun yüzeyinin aldığı şekli mutlak uzay kavramına başvurmadan -eğer mutlak uzay "bir şey" değilse- nasıl açıklayacaktı? Bu sorunun yanıtı, Mach'ın akıl yürütme biçimini yapılan basit bir itiraz üzerinde düşünürken ortaya çıkıyor.

Mach, Hareket ve Yıldızlar

Mach'ın düşündüğü gibi tamamen boş değil de gökyüzüne saçılmış bir avuç yıldızın olduğu bir uzay hayal edin. Eğer dış uzayda yaptığınız dönme deneyini şimdi yaparsanız, yıldızlar -her ne kadar çok uzaklardaki ışık noktacıları gibi görünüyorsa da- hareket durumunuzu saptamakta kullanabileceğiniz referans noktaları haline gelirler. Dönmeye başladığınızda, uzaktaki ışık noktacıları sizin çevrenizde dönüyor gibi görünecektir. Yıldızlar dönme durumunu dönmeme durumundan ayırabilmenizi sağlayan görsel referans noktaları olduğundan, aynı zamanda döndüğünüzü hissetmeyi da beklersiniz. Ama uzakta-

ki birkaç yıldız nasıl böyle büyük bir fark yaratabilir? Varlıkları ya da yoklukları, dönme hissini (yani daha genel olarak, ivmeli hareket hissini) nasıl olur da bir anahtar gibi açıp kapayabilir? Eğer yalnızca uzakta birkaç yıldızın olduğu bir evrende dönme hareketini hissedebiliyorsanız, bu belki de Mach'ın görüşünün hatalı olduğu anlamına geliyordur; belki de Newton'un varsaydığı gibi, boş bir evrende de dönme hareketini *hissedersiniz*.

Mach buna şöyle bir yanıt verdi. Mach'a göre, boş bir evrende dönerseniz hiçbir şey hissetmezsiniz (daha doğrusu, dönme ve dönmeme kavramları bile yoktur). Spektrumun diğer ucuna gittiğinizde, yani yıldızlarla ve gerçek evrenimizde var olan diğer maddesel cisimlerle dolu bir evrende gerçekten döndüğünüzde kol ve bacaklarınızda savrulma kuvvetini hissedersiniz. (Deneyin.) Asıl önemli nokta şudur: Mach boş olmayan ama bizimkinden daha az madde içeren bir evrende dönerken hissedeceğiniz kuvvetin, sıfır ile bizim evrenimizde hissettiğinizin arasında bir yerde olacağını öne sürüyordu. Yani, hissettiğiniz kuvvetle evrendeki madde miktarı orantılıdır. Eğer içinde tek bir yıldız olan bir evrende dönerseniz, vücudunuzda çok küçük bir kuvvet hissedersiniz, iki yıldızlı bir evrende bu kuvvet biraz daha fazla olur ve bu böyle gider. Sonunda içindeki madde miktarı bizim evrenimizdekine eşit olan evrene geldiğinizde, dönerken o bildiğiniz savrulma kuvvetini hissedersiniz. Bu yaklaşımda, ivme sonucu hissettiğiniz kuvvet, evrendeki tüm diğer maddenin toplu etkisi olarak ortaya çıkar.

Bu önerme yalnızca dönme için değil bütün diğer ivmeli hareketler için de geçerlidir. Mach'ın görüşüne göre içinde bulunduğunuz uçak pistte ivmelenirken, içinde bulunduğunuz otomobil ani bir fren yapıp durduğunda, içinde bulunduğunuz asansör yükselmeye başlarken hissettiğiniz kuvvet, evreni oluşturan bütün maddenin birleşik etkisini temsil etmektedir. Daha fazla madde olsaydı, daha büyük bir kuvvet hissederdiniz. Daha az madde olsaydı, hissedeceğiniz kuvvet de daha küçük olurdu. Hiç madde olmasaydı, hiçbir şey hissetmezsiniz. Yani Mach'ın düşüncesine göre yalnızca görelî hareket ve görelî ivme önemli-

dir. İvmelendiğinizi *yalnızca evrendeki diğer maddenin ortalama dağılımına göre ivmelendiğiniz zaman hissedersiniz*. Mach, madde yoksa -yani karşılaştırma için gerekli referans sistemi yoksa- ivmeyi hissetmenin imkânsız olduğunu öne sürüyordu.

Birçok fizikçi için bu, geçen yüz elli yıl içinde evren konusunda ortaya atılan en büyüleyici önermeydi. Kuşaklar boyunca fizikçiler, uzayın dokunulamaz, yakalanamaz dokusunun gerçekten bir şey -hareket için nihai ve mutlak bir referans sistemi sağlayacak kadar sağlam bir şey- olduğu fikrini heyecan verici bulmuştur. Kimileri hareket kavrayışını böylesine algılayamaz, duyularımızın bu kadar ötesinde, o kadar ki neredeyse mistisizmin sınırındaki bir şey üzerine temellendirmeyi saçma veya en azından bilimsel açıdan sorumsuzluk olarak görmüştür. Aynı fizikçiler Newton'un kovanını başka nasıl açıklayabileceklerini araştırdılar. Mach'ın görüşleri heyecan yaratmıştı, çünkü bu görüşler yeni bir yanıt olasılığını da peşinde getiriyordu: Uzayın "bir şey" olmadığı bir yanıt, Leibniz'in savunduğu gibi uzayın göreci olarak kavranmasına işaret eden bir yanıt. Mach'a göre uzay, Leibniz'in de hayal ettiğine çok benziyordu; iki ayrı cismin konumları arasındaki ilişkiyi ifade etmek için bir dildi. Ama, harfleri olmayan alfabe gibi uzayın da bağımsız bir varlığı yoktur.

Mach, Newton'a Karşı

Mach'ın görüşlerini üniversite öğrencisiyken öğrendim, bu benim için lütuf gibi bir şeydi. Yalnızca görelî hareket ve görelî ivme anlamlı olduğu için, bütün bakış açılarına eşit davranan bir uzay ve hareket kuramı vardı demek. Hareketi değerlendirmek için Newton'un düşündüğü referans sistemi -mutlak uzay denilen görünmez şey-yerine, Mach'ın önerdiği sistem -evrene dağılmış olan madde- herkesin görebileceği gibi ortadaydı. Mach'ın yanıtının doğru yanıt olduğuna emindim. Bu tepkiyi veren tek kişi olmadığımı da öğrenmiştim; Mach'ın görüşleriyle ilk karşılaştıklarında hemen ikna olan, aralarında Albert Einstein'ın da olduğu bir dizi fizikçinin yolunda gidiyordum.

Mach haklı mı? Kovanın girdabına kapılan Newton, uzay konusunda zayıf bir sonuca mı ulaşmıştı? Newton'un mutlak uzayı var mı, yoksa sarkaç açık bir biçimde göreci bakış açısını mı işaret ediyor? Mach'ın görüşlerini açıkladığı ilk on beş yirmi yıl boyunca bu sorular yanıtlanamadı. Bunun nedeni büyük ölçüde, Mach'ın önermesinin tam bir kuram ya da tanımlama olmamasıydı; çünkü Mach evrendeki maddenin sözü edilen etkiyi *nasıl* gösterdiğini anlatmıyordu. Eğer görüşleri doğru idiyse, kendi çevrenizde döndüğünüzde döndüğünüzü hissetmenize uzak yıldızlar ve yandaki ev nasıl katkıda bulunuyor? İleri sürdüğü şeyin gerçekleşmesini sağlayacak fiziksel bir mekanizma olmadan Mach'ın görüşlerini herhangi bir kesinlikle araştırmak çok zordu.

Bugünden bakınca yapılacak mantıklı bir tahmin, Mach'ın önermesinde sözü edilen etki ile kütleçekiminin bir ilintisi olabileceğidir. Sonraki yıllarda bu olasılık Einstein'ın dikkatini çekmiş ve kendi kütleçekim kuramını, genel görelilik kuramını geliştirirken Mach'ın önermesinden esinlenmiştir. Göreliliğin kaldırdığı toz duman sonunda yatıştığında, uzayın "bir şey" olup olmadığı -mutlakçı ya da göreci bakışın doğru olup olmadığı- sorusu, evrene daha önceki yaklaşımların tümünü yıkacak bir şekilde değişmişti.

III. Bölüm

Görelilik ve Mutlak

Acaba Uzay-Zaman Einstein'ın
Bir Soyutlaması mı
Yoksa Fiziksel Bir Varlık mı?

Bazı keşifler sorulara cevap getirir. Bazı keşifler o kadar derindir ki, sorulara yepyeni bir ışık tutar ve daha önce bize gizem gibi görünen şeylerin, bilgi eksikliği nedeniyle öyle algılandığını gösterirler. Tüm yaşamınızı -antik çağlarda bazılarının yaptığı gibi- Dünya'nın kenarına vardığınızda ne olacağını veya Dünya'nın altında kimin ya da neyin yaşadığını bulmaya çalışarak geçirebilirsiniz. Ama Dünya'nın yuvarlak olduğunu öğrendiğinizde, önceki gizlerin çözülmediğini, geçersiz hale geldiklerini görürsünüz.

Yirminci yüzyılın ilk yirmi yılında Albert Einstein iki büyük keşif yaptı. Bu keşiflerden her biri uzay ve zaman kavrayışımızı altüst etti. Einstein Newton'un diktiği değişmez yapıları yıktı ve uzayla zamanı hiç umulmadık bir biçimde birleştirerek kendi kulesini dikti, işini bitirdiğinde zaman uzayla o kadar iç içe girmişti ki, birinin varlığı olmadan diğeri düşünüleliyordu bi~

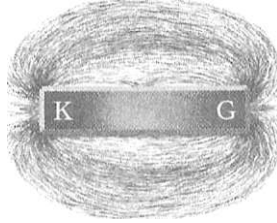
le. Dolayısı ile, yirminci yüzyılın üçüncü on yılından başlayarak, uzayın elle tutulabilir olup olmadığı sorusunun modası geçmişti. Birazdan ele alacağımız gibi, soru Einstein'ın yaklaşımıyla ifade edilecek olursa "*uzay-zaman* bir şey midir" şeklinde değişmişti. Bu görünüşteki küçük değişiklikle, gerçekliğin alanı konusundaki kavrayışımız tamamen dönüştü.

Boş Uzay Gerçekten Boş mu?

Yirminci yüzyılın başlarında Einstein'ın yazdığı görelilik oyununun baş rolündeki oyuncu ışıktı. Einstein'ın görüşleri için sahneyi hazırlayan ise James Clerk Maxwell'in çalışmalarıydı. 1800'lerin ortalarında Maxwell ilk kez elektriği, manyetizmayı ve bunların yakın ilişkilerini kavramamızı sağlayan kuramsal bir çerçeve oluşturan dört denklem keşfetti.¹ Maxwell bu denklemleri, 1800'lerde elektriğin ve manyetizmanın o zamana kadar bilinmeyen özelliklerini ortaya çıkaran on binlerce deney yapan İngiliz fizikçi Michael Faraday'ın çalışmalarını büyük bir dikkatle inceleyerek geliştirdi. Faraday'ın en önemli atılımı *alan* kavramıydı. Sonraları Maxwell ve başkaları tarafından genişletilen bu kavram, fiziğin son iki yüzyıldaki gelişiminde çok etkili olmuştur ve günlük hayatta karşılaştığımız pek çok küçük gizemin altında yatan da bu kavramdır. Havalimanında güvenlik kontrolünden geçerken, nasıl oluyor da bir makine size dokunmadan madeni bir eşya taşıyıp taşımadığınızı ortaya çıkarabiliyor? MR çektirirken nasıl oluyor da dışınızdaki bir alet, vücudunuzun içinin fotoğrafını çekebiliyor? Pusulanın ibresi nasıl oluyor da hiçbir şey onu itmediği halde dönüp kuzeye yöneliyor? Bu son soruya verilen yanıt hep bunun nedeninin yerkürenin manyetik alanı olduğudur, işte bu manyetik alan kavramı önceki iki örneğin de açıklanmasına yardımcı olur.

Manyetik alanın ne demek olduğunu, ilkokullarda yapılan, bir kâğıt parçasının üzerine yerleştirilmiş çubuk mıknatısın etrafına serpiştirilmiş demir tozlarının aldığı şekli gösteren deneyden daha iyi anlatan başka bir şey yoktur. Kâğıdı biraz sallarsanız demir tozları Şekil 3.1 'deki gibi düzenli bir şekil alarak mık-

nalısın kuzey kutbundan güney kutbuna uzanan yaylar oluştu-
rur. Demir tozlarının oluşturduğu örüntü, mıknatısın, çevresin-
deki uzayın her noktasını kaplayan bir şey, örneğin metal tozla-
rı üzerine kuvvet uygulayabilen bir şey yarattığının doğrudan
kanıtıdır. Bu görünmez şey *manyetik* alandır, sezgilerimize gö-
re uzayın bir bölgesini dolduran ve mıknatısın fiziksel varlığının
ötesinde bir kuvvet uygulayabilen bir sis ya da öz gibi bir şey-
dir. Manyetik alan mıknatısa, ordunun diktatöre ya da hesap
müfettişlerinin vergi dairesine verdiği şeyi verir: Fiziksel sınırla-
rının ötesinde bir etki. Böylece kuvvet uzaktaki "alanda" da et-
kir. Manyetik alana aynı zamanda kuvvet alanı denmesinin ne-
deni de budur.



Şekil 3.1 Bir çubuk mıknatısın etrafına serpiştirilen demir tozları mıknatısın manyetik alanını gösterir.

Manyetik alanları o kadar yararlı kılan uzayı dolduran, nüfuz edici özellikleridir. Havalimanlarında kullanılan metal detektörlerinin manyetik alanları giysilerinizden geçerek, üzerinizdeki metal cisimlerin kendi manyetik alanlarının ortaya çıkmasını sağlar; bu manyetik alanlar da gerisin geriye detektörü etkileyerek alarm düdüğünün çalmasına neden olur. MR cihazının manyetik alanı vücudunuza nüfuz edip belirli atomların belli bir şekilde dönerek kendi manyetik alanlarını üretmesini sağlar; makine de bu alanları algılayarak dokuların fotoğraflarına dönüştürür. Yerkürenin manyetik alanı pusulanın kabından geçerek iğnesini döndürür ve iğnenin, çağlar süren bir jeofiziksel süreç sonunda kuzey-güney doğrultusunda konumlanmış yerküre manyetik alanına paralel durmasına neden olur.

Manyetik alanlar tanıdığımız türden alanlardır, ama Faraday bir başka alanı daha incelemiştir: *Elektrik alanı*. Yün atkınızın çitirdamasına, halı kaplı bir odada yürüdükten sonra elinizi metal kapı tokmağına uzattığınızda elinize kıvılcım atlamasına ve gök gürültülü, şimşekli bir fırtına sırasında yüksek bir dağday-sanız eğer cildinizin karıncalanmasına neden olan, işte bu alan-dır. Eğer böyle bir fırtına sırasında bir pusulanın iğnesine baka-cak olsaydınız, şimşek çaktıkça ya da yakınlara bir yerlere yıldır-ım düştükçe iğnenin bir o yöne bir bu yöne döndüğünü görür-dünüz, bu da size elektrik alan ve manyetik alan arasındaki iliş-ki konusunda ipucu verirdi. Bu ilişkiyi ilk kez Danimarkalı fi-zikçi Hans Oersted keşfetmiş, Faraday da özenle hazırladığı de-neylerle etraflıca araştırmıştır. Nasıl menkul kıymet borsasında-ki gelişmeler hisse senetlerini etkiler, bu da tekrar borsayı etki-lerse, bu bilim insanları da aynı şekilde bir elektrik alandaki de-ğişikliğin yakındaki manyetik alanda değişikliğe neden olduğ-u-nu, bu değişikliğin de elektrik alanda değişiklik yapabileceğini buldular. Maxwell bu karşılıklı ilişkinin matematiksel temelle-rini buldu. Denklemleri elektrik ve manyetik alanların ayrılmaz biçimde iç içe girdiğini gösterdiği için de sonunda bu alanlara *elektromanyetik* alanlar, uyguladıkları etkiye de *elektromanye-tik* kuvvet adı verildi.

Bugün sürekli bir elektromanyetik alanlar denizinde yüzüyo-ruz. Cep telefonunuz ya da otomobilinizin radyosu hemen he-men her yerde çalışır, çünkü telefon şirketlerinin ve radyo istas-yonlarının yaydığı elektromanyetik alanlar, uzayda çok çok ge-niş alanlara ulaşıp bu alanları doldurur. Aynı şey kablolu in-ternet bağlantıları için de geçerlidir; bilgisayarlar çevremizde -içimizden de geçerek- titreşip duran elektromanyetik alanlar-dan Dünyayı Saran Ağ'ı çekip alır. Maxwell'in yaşadığı günler-de elektromanyetik teknoloji daha az gelişmişti tabii, ama bilim insanları Maxwell'in üstün başarısını hemen anladı ve takdir et-ti: Maxwell alanların dilini kullanarak, daha önceleri birbirle-rinden ayrı olarak düşünülen elektrik ve manyetik alanların, as-lında aynı fiziksel varlığın değişik yönleri olduğunu göstermişti.

ileride başka alanlarla da ilgileneceğiz: Kiitleçekimi alanları, çekirdeksel (nükleer) alanlar, Higgs alanları vb. Alan kavramının fizik yasalarının çağdaş formülleştirilmesinde merkezi bir kavram olduğu giderek daha açık hale gelecek. Ama şimdilik, öykümüzün bir sonraki adımı gene Maxwell'e ilişkin. Maxwell denklemlerini daha derinlemesine incelediğinde, elektromanyetik etkilerin dalga benzeri bir biçimde, belirli bir hızla yayıldığını buldu: Saniyede 300.000 kilometre. Bu değer, ışığın başka deneyler sonucunda bulunan hızıyla aynı olduğundan, Maxwell ışığın da bir tür elektromanyetik dalga olması gerektiğini tınlandı. Bu dalgalar, gözümüzdeki ağ tabakasında bulunan kimyasal maddelerle etkileşerek görme duyusunu oluşturmak için gereken özelliklere sahipti. Bu başarı, Maxwell'in zaten çok büyük olan keşiflerini daha da önemli hale getirdi: Maxwell, mıknatısın ürettiği kuvveti, elektrik yüklerinin oluşturduğu etkiyi ve evreni görmemizi sağlayan ışığı birbirine bağlamıştı, ama bu durum aynı zamanda önemli bir de soru doğurmuştu.

Deneyimlerimiz ve şimdiye kadar tartıştıklarımız, ışığın hızının saniyede 300.000 kilometre olduğunu söylediğimizde, bu hızın *neye* göre ölçüldüğünü belirtmezsek bu cümlenin anlamsız olduğunu söylüyor. Tuhaf olan Maxwell'in denklemlerinin bu sayıyı -saniyede 300.000 kilometre- böyle bir referans sistemi belirlemeksizin ve görünüşte böyle bir referans sistemine dayanmaksızın vermesiydi. Bu durum, bir kişi parti vereceği yerin adresini referans noktası belirtmeden, *neyin* 22 kilometre kuzeyinde olduğunu söylemeden "22 kilometre kuzeyde" diye vermesine benzer. Maxwell'in de aralarında olduğu çoğu fizikçi, denklemlerin verdiği hızı şöyle açıklamaya çalıştı: Bildiğimiz dalgalar, örneğin deniz dalgaları ve ses dalgaları bir madde, bir ortam tarafından taşınır. Deniz dalgalarını taşıyan, sudur. Ses dalgalarını taşıyan, havadır. Bu dalgaların hızları *ortamlarına göre* belirlenir. Sesin oda sıcaklığındaki hızının saniyede 330 metre (daha önce tanıştığımız Ernst Mach'a atfen 1 Mach olarak bilinir) olduğunu söylüyorsak, ses dalgalarının durağan hava içinde bu hızla ilerlediğini söylemek istiyoruzdur.

O zaman fizikçiler de akla yakın bir tahminde bulundular ve ışık dalgalarının da -elektromanyetik dalgalar- o zamana kadar görülmediği ve varlığı saptanamadığı halde var olması gereken belirli bir ortam içinde hareket ediyor olması gerektiğini düşündüler. Işığı taşıyan bu ortama bir de isim verildi: *Esir*. Bu isim Aristoteles'in, gök cisimlerini oluşturduğu düşünülen her şeyi kapsayan gizemli maddeyi tanımlamak için kullandığı çok eski bir terimdir. Bu önermeyi sonuçlarla bağdaştırmak için, denklemlerin esire göre durağan durumdaki birinin bakış açısından geçerli olduğu düşünüldü. Demek ki, Maxwell'in denklemlerinden çıkan saniyede 300.000 kilometrelik hız, ışığın durağan haldeki esire göre hızıydı.

Görüldüğü gibi, esir ile Newton'un mutlak uzayı arasında çarpıcı bir benzerlik vardır. Her ikisi de hareketi tanımlamak için bir referans sistemi arayışı sonucunda ortaya çıkmıştır; ivmeli hareket mutlak uzaya, ışığın hareketi de esire yol açmıştır. Aslında pek çok fizikçi esire, Henry More, Newton ve diğerlerinin mutlak uzayı kapladığını düşündüğü tanrısal ruhun yeryüzündeki hali olarak bakmıştır. (Newton ve onun devrinde yaşamış başkaları "esir" terimini mutlak uzay tanımlarında bile kullanmıştır.) Ama esir gerçekte *nedir*? Neden oluşmuştur? Nereden gelmiştir? Her yerde var mıdır?

Esire ilişkin bu sorular, yüzyıllar boyunca mutlak uzaya ilişkin olarak sorulan sorularla aynıdır. Ama Mach'ın mutlak uzayın olup olmadığını sınaması tamamen boş uzayda dönmeyi kap-samakta iken, fizikçiler esirin gerçekten var olup olmadığını belirleyebilmek amacıyla "yapılabilir" deneyler önerebiliyordu. Örneğin, suda size doğru gelen bir dalgaya doğru yüzerseniz, dalga size daha çabuk ulaşır; dalgadan uzağa doğru yüzerseniz, size ulaşması daha uzun zaman alır. Benzer biçimde, eğer varsayılan esir içinde size yaklaşmakta olan bir ışık dalgasına doğru veya ondan uzağa doğru hareket ederseniz, aynı mantıkla düşününce, ışık dalgasının yaklaşma hızı saniyede 300.000 kilometreden daha çok veya daha az olacaktır. Ama Albert Michelson ve Edward Morley 1887 yılında tekrar tekrar yaptıkları deney-

lerde, ışığın hızının *kendilerinin* ve ışık kaynağının hareketinden bağımsız olarak her seferinde saniyede 300.000 kilometre olduğunu buldu. Bu sonuçları açıklamak için pek çok zekice sav ileri sürüldü. Bazıları, Michelson ve Morley'in deneyler sırasında fark etmeden esiri de deney düzeneğiyle birlikte sürüklemiş olabileceğini ileri sürdü. Birkaç kişi de, deney düzeneğinin esir içinde hareket ederken yamulduğunu, bunun da ölçümleri bozduğunu söyledi. Bu konunun açıklanması, Einstein'ın devrim yaratan sezgisinin ortaya çıkışına kadar bekleyecekti.

Görelî Uzay, Görelî Zaman

Haziran 1905'te Einstein kesin olarak esirin sonunu ilan eden, "Hareket Eden Cisimlerin Elektrodinamiği Üzerine" gibi alçakgönüllü bir ismi olan bir makale yazdı. Bu makale, bir hamlede uzay ve zaman kavrayışımızı da sonsuza kadar değiştirdi. Einstein, makaledeki fikirlerini 1905'in Nisan ve Mayıs aylarında, beş haftalık çok yoğun bir çalışma sırasında formüleştirdi, ama bu konular üzerine on yıldan uzun bir süredir kafa yoruyordu. Einstein delikanlılık yıllarından beri eğer bir ışık dalgasını tam olarak ışık hızında izleyebiliyor olsaydık, ışık dalgasının nasıl görüneceği sorusunun yanıtını bulmaya uğraşıyordu. Siz ve ışık dalgası esir içinde aynı hızla hareket ediyor olacağınız için ışığa tam anlamıyla ayak uydurmuş olacaktınız. Dolayısıyla Einstein'a göre, sizin bakış açınızdan ışığın hareket etmiyor gibi görünmesi gerekiyordu. Yeni yağmış kardan uzanıp bir avuç alır gibi, uzanıp bir avuç hareketsiz ışık alabiliyordunuz.

Ama sorun şu: Maxwell'in denklemleri ışığın durağan -yani yerinde duruyormuş gibi- görünmesine izin vermiyor. Şimdiye kadar kimsenin durağan bir ışık parçası yakaladığı da görülmedi. Dolayısıyla, genç Einstein şunu soruyordu: Görünürdeki bu çelişkiye ne anlam vereceğiz?

On yıl sonra Einstein, dünyaya bu sorunun yanıtını özel görelilik kuramı ile verdi. Einstein'ın keşfinin entelektüel kökenleri çok tartışılmıştır, ama onun basitliğe olan sarsılmaz inancı-

nın bu konuda önemli bir rol oynadığına hiç kuşku yok. Einstein, esirin varlığının kanıtlanmaya çalışıldığı en azından bazı deneylerin başarısız olduğundan haberdardı.² O zaman deneylerde hata bulmak için uğraşmaya ne gerek vardı? Onun yerine daha basit olan yaklaşım benimsenmeliydi: Deneylerde esir bulunamıyordu, çünkü esir yoktu. Maxwell'in ışığın hareketini -yani elektromanyetik dalgaların hareketini- betimleyen denklemleri böylesi bir ortam gerektirmediği için, hem deney hem de kuram aynı sonuca ulaşıyordu: Bildiğimiz tüm diğer dalgalardan farklı olarak, ışığın onu taşıyacak bir ortama ihtiyacı yoktur. Işık, yalnız bir yolcudur. Işık, boş uzayda yayılabilir.

Ama o zaman, ışığın hızını saniyede 300.000 kilometre olarak veren Maxwell denklemlerini ne yapacağız? Eğer durağan referans sistemi olarak kullanılabilecek esir yoksa, ışığın hızının kendisine göre ölçüleceği o şey nedir? Einstein yine genel yaklaşımlara karşı geldi ve en basit yanıtı verdi. Eğer Maxwell denklemleri herhangi bir durağan referans sistemi gerektirmiyorsa, bunun en doğrudan yorumu böyle bir referansa gerek olmadığı idi. O zaman Einstein ışığın *hızının hiçbir şeye ve her şeye göre saniyede 300.000 kilometre olduğunu* açıkladı.

Bu kesinlikle basit bir ifadedir ve Einstein'a atfedilen bir söz de uyar: "Her şeyi mümkün olduğunca basitleştirin, ama fazla da değil." Sorun şu ki, bu da çılgınca görünüyor. Eğer uzaklaşmakta olan bir ışık demetinin arkasından koşarsanız, sağduyu sizin bakış açınızdan ışığın hızının saniyede 300.000 kilometreden daha düşük olması gerektiğini söyler. Eğer yaklaşmakta olan bir ışık demetine doğru koşarsanız, sağduyu sizin bakış açınızdan ışığın hızının saniyede 300.000 kilometreden daha yüksek olması gerektiğini söyler. Yaşamı boyunca sağduyuya meydan okuyan Einstein için bu durum da bir istisna değildi. Einstein, bir ışık demetine ne kadar hızla yaklaşıyor ya da bir ışık demetinden ne kadar hızla uzaklaşıyor olursanız olun, ışığın hızını tam olarak saniyede 300.000 kilometre olarak ölçeceğinizi ileri sürdü; ne daha az, ne daha fazla. Bu Einstein'ın gençlik dönemlerinde çözemediği açmazı bir çözüm getiriyordu: Maxwell'in

kuramı durağan ışık kavramına izin vermiyordu, çünkü ışık *hiç-bir zaman* durağan olamaz. İster ışığa doğru koşun, ister ondan kaçın, ister durun, sizin hareket durumunuzdan bağımsız olarak ışık saniyede 300.000 kilometrelik sabit ve hiç değişmeyen hızını hep korur. Ama biz de doğal olarak, ışığın nasıl olup da böyle garip davranabildiğini sorarız.

Bir an durup, hız konusunda düşünün. Hız, bir şeyin kat ettiği mesafenin, bu mesafe kat edilirken geçen zamana bölünmesiyle ölçülür. Bir uzay ölçüsünün (kat edilen mesafe) zaman ölçüsüne (yolculuğun süresi) bölünmesidir. Newton dan beri uzay mutlak bir şey olarak düşünülmüştür; "herhangi bir dış referans noktası olmaksızın" vardır. Dolayısıyla uzaya ve uzamsal ayrılmalara ilişkin ölçümler de mutlak olmalıdır: Uzaydaki iki şey arasındaki mesafeyi kim ölçüyor olursa olsun, eğer ölçümler yeterince dikkatli yapılmışsa, cevaplar hep aynı olacaktır. Her ne kadar henüz doğrudan tartışmadıysak da, Newton aynı şeyin zaman için de geçerli olduğunu ileri sürdü. *Principia*'da yaptığı zaman tanımı, uzaydan bahsederken kullandığı dili yansıtır: "Zaman kendiliğinden vardır ve herhangi bir dış referans noktası olmaksızın, değişmeden akar." Bir başka deyişle, Newton'a göre, her yerde ve her zaman aynı olan mutlak ve evrensel bir zaman kavramı vardır. Newton'a göre, evrende bir şeyin olması için geçen zamanı kim ölçerse ölçsün, eğer ölçümler dikkatle yapılmışsa cevaplar hep aynı olacaktır.

Uzay ve zaman konusundaki bu varsayımlar günlük hayat-taki deneyimlerimizle bağdaşır ve bu nedenle de sağduyumuz-la vardığımız, eğer ışığın peşinden gidersek hızının azalmış gibi görünmesi gerektiği sonucuna temel oluştururlar. Bunu anlamak için, nükleer güçle çalışan yeni bir kayak alan Bart Simpson'ın bir ışık demetiyle yarışmaya karar verdiğini düşünelim. Her ne kadar Bart kayakının en yüksek hızının saniyede 225.000 kilometre olduğunu öğrendiğinde biraz düş kırıklığına uğramışsa da elinden geleni yapmaya kararlıdır. Kızkardeşi Lisa elinde bir lazerle hazır beklemektedir ve 11 den (kahramanı Schopenhauer'in en sevdiği sayı) geriye doğru say-

maya başlar. O'a geldiğinde lazer ışını ve Bart aynı anda fırlar. Lisa ne görür? Geçen her saniyede ışık 300.000 kilometre, Bart ise 225.000 kilometre gittiği için, Lisa haklı olarak ışığın Bart'tan saniyede 75.000 kilometre hızla uzaklaştığı sonucuna varır. Burada öyküye Newton'u katalım. Onun görüşleri, Lisa'nın uzay ve zaman gözlemlerinin -bu ölçümleri yapan herkesin aynı sonuçları bulması gerektiği için- mutlak ve evrensel olduğunu söyler. Newton için uzayda ve zamanda hareketle ilgili bu tip gerçekler, iki kere ikinin dört etmesi kadar nesneldi. O halde, Newton'a göre Bart da Lisa ile aynı fikirde olmalı ve ışığın kendisinden saniyede 75.000 kilometre hızla uzaklaştığını söylemelidir.

Ama Bart geri döndüğünde hiç de aynı fikirde değildir. Üzgün bir biçimde, elinden geleni yaptığını, ama kaykayının hız sınırını ne kadar zorlarsa zorlasın, ışığın kendisinden saniyede 300.000 kilometre hızla uzaklaştığını gördüğünü söyler.³ Bart'a inanmıyorsanız da, son yüzyılda hareketli ışık kaynakları ve alıcılar kullanılarak büyük bir titizlikle yapılan binlerce deneyin, Bart'ın bulduğu sonuçları büyük bir kesinlikle desteklediğini aklınızdan çıkarmayın.

Bu nasıl olabilir?

Einstein bunun nasıl olabildiğini anlamıştı. Bulduğu cevap, buraya kadar anlattıklarımızın mantıklı ve çok derin bir uzantısıdır. Demek ki Bart'ın mesafe ve süre ölçümleri, yani ışığın kendisinden ne kadar hızla uzaklaştığını ölçmek için kullandığı giridiler, Lisa'ninkilerden farklıdır. Bir düşünün. Hız mesafenin zamana bölünmesi olduğuna göre, ışığın kendisinden hangi hızla uzaklaştığı konusunda Bart'ın Lisa'dan farklı bir sonuç bulmasının başka bir sebebi olamaz. Buradan Einstein, Newton'un mutlak uzay ve mutlak zaman konusundaki fikirlerinin yanlış olduğu sonucuna vardı. Einstein, Bart ve Lisa gibi birbirlerine göre hareket eden gözlemcilerin, mesafe ve süre ölçümlerinde aynı değerleri bulmayacaklarını anlamıştı. Işığın hızı konusunda kafa karıştıran deney sonuçları, ancak gözlemcilerin uzay ve zaman algılamaları farklı ise açıklanabilir.

Anlaşılması Zor Ama Kötü Niyetli Değil

Uzay ve zamanın göreliliği şaşırtıcı bir sonuçtur. Bunu yirmi beş yıldan daha uzun süredir biliyor olmama karşın, ne zaman oturup düşünsem, hayret verici buluyorum. Işığın hızının sabit olduğunu belirten basmakalıp cümleden yola çıkıp *uzay ve zamanın ona bakan gözlemcinin nazarında olduğu* sonucuna varıyoruz. Her birimiz kendi saatimizi taşır, zamanın akışını oradan izleriz. Her saat aynı derecede hassas, ama birbirimize göre hareket ettiğimiz zaman aynı zamanı göstermiyorlar. Eşzamanlı olmuyorlar; seçilen iki olay arasında geçen zamanı farklı gösteriyorlar. Aynı şey, mesafe için de geçerli. Her birimiz kendi ölçüm aracımızı yanımızda taşır, uzayda mesafeyi onunla ölçeriz. Her ölçüm aracı aynı derecede hassas, ama birbirimize göre hareket ettiğimiz zaman aynı mesafeyi göstermiyorlar. Seçilen iki olayın konumları arasındaki mesafeyi farklı ölçüyorlar. Eğer uzay ve zaman böyle davranmasaydı, ışığın hızı sabit olmayacak, gözlemcinin hareket durumuna bağlı olacaktı. Ama ışığın hızı *sabit*; uzay ve zaman da böyle *davranıyor*. Uzay ve zaman, kendilerini ışığın hızı -gözlemcinin hızından bağımsız olarak- her zaman, kesinlikle sabit olacak şekilde ayarlıyorlar.

Uzay ve zaman ölçümlerinin tam olarak nasıl farklılaştığının sayısal ayrıntılarının elde edilmesi daha karmaşıktır, ama bunun için lise düzeyinde cebir bilgisi yeterlidir. Einstein'ın özel görelilik kuramını bu kadar anlaşılması güç kılan, matematiğinin derinliği değildir. Öne sürdüğü fikirlerin yabancılığı ve gündelik deneyimlerle görünürde uyumsuz olmasıdır. Ama Einstein ana fikri (yani Newton'un uzay ve zaman konularına iki yüzyıldan daha eski olan bakışından kendisini kurtarması gerektiğini) bir kez kavradıktan sonra, ayrıntıları yerli yerine koymak onun için artık zor değildi. Einstein, iki kişinin uzaklık ve süre ölçümlerinin, her ikisinin de ışığın hızı olarak aynı değeri bulmasını sağlayacak biçimde, nasıl farklı olması gerektiğini kesin olarak gösterebiliyordu.⁴

Einstein'ın buluşunu daha derinden algılayabilmek için şimdi Bart Simpson'un istemeye istemeye kaykayının en yüksek hızı-

nı saatte 100 kilometre (yaklaşık saniyede 30 metre) olacak şekilde değiştirdiğini düşleyelim. Bart -okuyarak, ısıklık çalarak, esneyerek ve ara sıra da yola göz atarak- en yüksek hızla önce kuzeye gitse, sonra da kuzeydoğuya giden bir otoyola çıksa, kuzey yönündeki hızı saniyede 50 metreden daha *aç* olacaktır. Bunun nedeni açıktır. Başlangıçta hızının tamamı kuzey yönünde iken, yön değiştirdiğinde bu hızın bir bölümü doğuya kaymış, bu nedenle de kuzey yönündeki hızı azalmıştır. Bu son derece basit örnek, genel göreliliğin temel fikrini kavramamıza yardımcı olacaktır. Şöyle:

Cisimlerin uzayda hareket ettiği fikrine alışmışsınız ama, aynı derecede önemli bir hareket türü daha vardır: Cisimler zamanda da hareket eder. Şu anda, kolunuzdaki ve duvardaki saatler, sizin ve çevrenizdeki her şeyin, zamanda hiç durmadan bir biçimde hareket ettiğinizi, hiç durmadan bir saniyeden diğerine gittiğinizi gösteriyor. Newton, zamanda hareketin uzayda hareketten tümüyle ayrı olduğum -bu iki tür hareketin birbirini ile hiç ilgisi olmadığını- düşünmüştü. Ama Einstein, bunların birbirleri ile çok yakından ilişkili olduğunu buldu. Aslında özel göreliliğin devrim yaratan keşfi şudur: Size göre sabit olan -yani uzayda hareket etmeyen- bir şeye, örneğin park halinde bir otomobile bakıyorsanız, otomobilin *tüm* hareketi zamandadır. Otomobil, sürücüsü, cadde, siz, giysileriniz, hep birlikte ve eşzamanlı olarak zamanda hareket ediyorsunuz: Saniyeler saniyeleri düzgünce izliyor. Ama otomobil sizden uzaklaşıyorsa, hareketinin bir bölümü uzaydaki harekete *sapmış* demektir. Tıpkı kuzeye doğru hızının bir bölümü doğuya sapan Bart Simpson'un kuzey yönündeki hızının azalması gibi, zamandaki hareketinin bir bölümü *uzaya* sapan otomobilin de *zamandaki* hızı azalır. Bu da, otomobilin zamandaki hareketinin yavaşladığı ve dolayısıyla *hareket halindeki otomobil ve sürücüsü için zamanın size ve durağan olan her şeye göre daha yavaş geçtiği* anlamına gelir.

Özel görelilik kısaca budur. Aslında, biraz daha kesin davranabilir ve bu tanıımı bir adım ileri götürebiliriz. Bart Simpson'un hızı saniyede 30 metre ile sınırlıydı. Bu önemli, çünkü eğer Bart

kuzeydoğu yönüne saptığında Kızını yeterince artırabilseydi, hızının sapmasını telafi edebilir yani kuzey yönündeki hızının aynı kalmasını sağlayabilirdi. Ama kaykayın motorunu ne kadar zorlarsa zorlasın, toplam hızı -kuzey ve doğu yönlerindeki hızlarının bileşkesi- saniyede 30 metre ile sınırlıydı. Bu nedenle yönü biraz doğuya saptığında, kuzey yönündeki hızı azalıyordu.

Özel görelilik, tüm hareketler için benzer bir yasa getirir: *Bütün cisimlerin uzaydaki ve zamandaki bileşke hızı, her zaman tam olarak ışık hızına eşittir.* Bu cümleyi okuduğunuzda içgüdüsel olarak irkilebilirsiniz, çünkü hepimiz ışıktan başka hiçbir şeyin ışık hızıyla hareket edemeyeceği fikrine alışmışsınızdır. *Ama alıştığımız bu fikir yalnızca uzaydaki hareket için geçerlidir.* Şimdi bununla ilişkili ama daha zengin bir şeyden söz ediyoruz: Bir cismin uzay ve zamandaki bileşik hareketi. Einstein'ın keşfettiği temel gerçek, bu iki tür hareketin her zaman birbirini tamamladığıdır. Baktığınız park halindeki otomobil uzaklaşmaya başladığında, gerçekte olan şudur: Otomobilin zamanda yaptığı ışık hızındaki hareketin bir bölümü uzayda harekete aktarılır, *böylece bileşke hareket sabit kalır.* Böylesi bir aktarım, otomobilin zamandaki hareketinin kaçınılmaz olarak yavaşladığı anlamına gelir.

Örneğin eğer Lisa, saniyede 225.000 kilometre hızla uzaklaşan Bart'ın kolundaki saati görebilseydi, o saatin kendi saatinin yalnızca üçte ikisi hızla ilerlediğini fark edecekti. Kendi kol saatine göre geçen her üç saat için, Bart'ın kol saatinde yalnızca iki saat geçtiğini görecekti. Bart'ın uzaydaki hızlı hareketi, zamandaki hızını önemli miktarda azaltmış olacaktır.

Dahası, zamanda ışık hızıyla yapılan hareketin tamamı uzayda ışık hızıyla yapılan harekete aktarıldığında uzaydaki en yüksek hıza ulaşılır; bu uzayda neden ışıktan daha hızlı gidilemeyeceğini anlamamanın bir yoludur. Uzayda her zaman ışık hızıyla yayılan ışık, her zaman bu aktarımın tamamını yapıyor olması anlamında özeldir. Tıpkı doğuya doğru yapılan hareketin kuzey yönündeki hareketi sıfırlaması gibi, uzayda ışık hızıyla hareket etmek de zamandaki hareketi sıfırlar! Uzayda ışık hızıyla hare-

ket etmek zamanı durdurur. Bir ışık parçacığına saat iliştmek mümkün olsa, o saat hiç ilerlemez. Yani ışık, Ponce de Le n'un ve kozmetik endüstrisinin rüyalarını gerçekleştirir: Hiç ya lanmaz.⁵

Bu tanımlamadan da açıkça anlaşılacağı gibi özel g reliliğın etkileri, hız (uzaydaki hız) ışık hızına yaklaştığında belirgin hale gelir. Ama bizim alışık olmadığımız uzay ve zamandaki hızın birbirlerini tamamlayıcı doğıası her zaman geçerlidir. Hız ne kadar azalırsa, görelilik öncesi fizikten -yani sağıduyudan- sapma da o kadar azalır, ama ne kadar azalsa da sapma her zaman, kesinlikle vardır.

Gerçekten. Bu, ne bir kelime oyunudur, ne el sürçmesi, ne de psikolojik bir yanılsama. Evrenin işleme şekli budur.

1971 yılında Joseph Halele ve Richard Keating, en son teknolojiyle üretilmiş, sezyum ışınlı birkaç atom saatini PanAm Havayolları'nın bir jetiyle dünya çevresinde uçurdular. Uçaktaki saatlerle yerdekileri kar ıla tırdıklarında, hareket halindeki saatlerde daha az zaman geçtiğini gördüler. Fark çok çok azdı -saniyenin birkaç yüz milyarda biri- ama Einstein'ın ke ifleriyle kesin bir biçimde uyu uyordu. Artık bundan daha fazla emin olamazdık.

1908'de daha yeni ve hassas deneylerde esirin varlığına dair kanıtlar bulunduğı yolunda söylentiler yayılmaya ba lamı tı.⁶ Eğer bu söylentiler doğıu olsaydı, bu mutlak bir durağanlık standardı bulunduğı ve Einstein'ın özel görelilik kuramının hatalı olduğı anlamına gelirdi. Einstein bu söylentileri duyduğunda şöyle dedi: "Tanrı zor anlaşılır, ama kötü niyetli değıildir." Doğıanın i leyi ini dikkatlice gözlemleyerek uzaya ve zamana dair bazı kavrayı lar kazanmaya çalışmak Einstein a kadar hiç kimsenin altından kalkamadığı zor bir i ti. Ama hem böylesine  a ırtıcı ve güzel bir kuramın var olmasına izin vermek, hem de bunun doğıanın i leyi iyle ilgisiz olması kötü niyetlilik olurdu. Einstein bunu kabul etmedi, yeni deneyleri hiç dikkate almadı. Kendine güveni yersiz değıildi. Sonuçta, bu deneylerin hatalı oldukları kanıtlandı ve esir kavramı bilimsel söylemden uçup gitti.

Peki ya Kova ?

Bu, ışık için derleyip toparlayıcı bir öyküdür elbette. Kuram ve deney, ışığın ışık dalgalarını taşımak için bir ortama gereksinimi olmadığı, ışık hızının -ışık kaynağının ve gözlemcinin hareketinden bağımsız olarak- sabit ve değişmez olduğu konularında uyuşuyordu. Her gözlem noktası diğeriyle aynıydı. Mutlak veya ayrıcalıklı bir durağanlık standardı yoktu. Güzel. Peki ya kova?

Anımsayalım, pek çok kimse esire Newton'un mutlak uzayını destekleyen fiziksel bir madde gözüyle baktıysa da bunun Newton'un mutlak uzayı *neden* ortaya attığı sorusuyla bir ilgisi yoktu. Newton ivmeli hareketle, yani dönen kovanın hareketiyle boğuştuktan sonra, hareketi kesin bir biçimde ona göre tanımlayacağı, görülmez bir fon maddesi ortaya atmaktan başka bir çare bulamamıştır. Esiri ortadan kaldırmak kovayı da ortadan kaldırmadığına göre, acaba Einstein ve özel görelilik kuramı bu konuyla nasıl başa çıkmıştı?

Gerçeği söylemek gerekirse, Einstein özel görelilik kuramında özel bir hareket türüne odaklanmıştı: Sabit hızlı harekete. Daha genel ivmeli hareketi ancak on yıl kadar sonra, 1915'te genel görelilik kuramında tam olarak ele almış ve çözümlemiştir. Buna rağmen Einstein ve diğerleri, dönme hareketini tekrar tekrar özel görelilik kavrayışıyla ele almış ve Newton gibi (Mach'ın aksine) tamamen boş uzayda bile dönme hareketinden kaynaklanan savrulmanın hissedilebileceği sonucuna varmışlardır. Homer dönmekte olan kovanın iç duvarına bastırıldığını hissedecektir, dönmekte olan iki taşı birbirine bağlayan ip gerilecektir.⁷ Newton'un mutlak uzay ve mutlak zaman kavramlarını ortadan kaldıran Einstein, bunu nasıl açıklamıştı?

Cevap şaşırtıcıdır. Adına rağmen Einstein'ın kuramı her şeyin göreliliğini ileri sürmez. Özel görelilik *bazı* şeylerin göreliliğini ileri sürer: Hız görelidir, uzaydaki mesafeler görelidir, geçen zaman süreleri görelidir. Ama kuram aslında büyük, yeni ve tamamen mutlak bir kavram ortaya atar: *Mutlak uzay-zaman*. Mutlak uzay ve mutlak zaman Newton için ne kadar mutlaksa, mutlak uzay-zaman da özel görelilik için o kadar

mutlaktır. Kısmen bu nedenle Einstein "görelilik kuramı" adını önermemiş ve bu addan hiç hoşlanmamıştır. O ve başka fizikçiler, kuramın temelinde herkesin üzerinde anlaştığı, görelî *olmayan* bir şey olduğunu vurgulaması bakımından *değişmezlik kuramı* adını önermişlerdi.⁸

Mutlak uzay-zaman kovanın öyküsünde bir sonraki önemli bölümü oluşturuyor, çünkü her ne kadar mutlak uzay-zaman, hareketi tanımlamak için herhangi bir maddesel ölçüm referansı noktasına sahip olmasa da, özel göreliliğin mutlak uzay-zamanı, cisimlerin ona göre ivmelendiğini söyleyebileceğimiz bir şey sağlar.

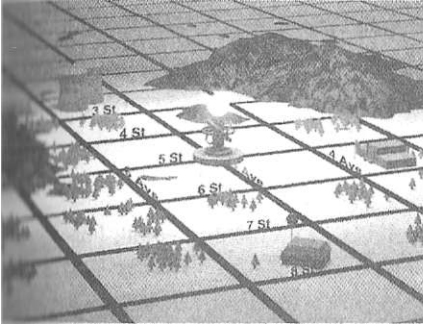
Uzayı ve Zamanı Yontmak

Bunu anlayabilmek için, birlikte kaliteli zaman geçirme arayışındaki Marge ve Lisa'nın Burns Enstitüsü'nde verilen kent sel yenileme kursuna kayıt yaptırdığını düşünelim, ilk ödevleri de Springfield'deki cadde ve bulvarları yeniden tasarlamak olsun, ama iki koşul var. İlki şu: Soaring Nükleer Anıtı caddelerin ve bulvarların oluşturduğu ızgaranın merkezinde, 5. caddeyle 5. bulvarın kesiştiği yerde olacak, ikinci koşul da şu: Tasarımda 100 metre uzunluğunda caddeler ve bu caddelere dik olan 100 metre uzunluğunda bulvarlar kullanılacak. Marge ve Lisa sınıfa girmeden önce yaptıkları tasarımları karşılaştırırken bir şeyin fena halde ters olduğunu anlıyorlar. Marge anıt merkezde olacak şekilde bir tasarım yapmış, ama Kwik-E-Mart 8. caddeyle 5. bulvarın, nükleer santral ise 3. caddeyle 5. bulvarın köşesinde (Şekil 3.2 (a)'da görüldüğü gibi). Lisa'nın tasarımında ise adresler tamamen farklı: Kwik-E-Mart 7. caddeyle 3. bulvarın köşesine yakın, nükleer santral ise 4. caddeyle 7. bulvarın köşesinde (Şekil 3.2 (b)'de görüldüğü gibi), ikisinden birinin hata yaptığı kesin.

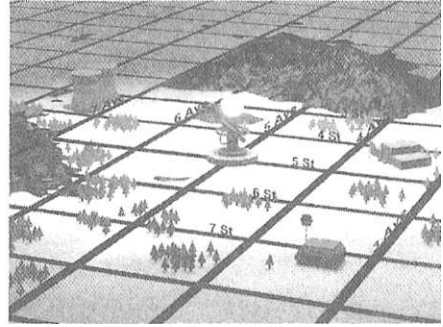
Ama Lisa biraz düşününce ne olup bittiğini anlar. Ortada hata yoktur. Hem kendisi, hem Marge haklıdır. Yalnızca cadde ve bulvar ızgaralarını tasarlarken farklı yönelişler kullanmışlardır. Marge'ın caddeleri ve bulvarları, Lisa'nınkilere göre bir açı yapmaktadır; yani ızgaraları birbirlerine göre dönüktür,

Springfield'i caddeler ve bulvarlarla iki farklı yönde dilimlere bölmüşlerdir (Şekil 3.2 (c) ye bakın). Buradan çıkan ders basit ama önemlidir. Springfield'i -ya da uzayın herhangi bir bölgesi- ni- caddeler ve bulvarlarla istediğiniz gibi bölebilirsiniz. "Mutlak" caddeler veya "mutlak" bulvarlar yoktur. Marge'in seçimi Lisa'nınki kadar, hatta olası tüm diğer yönelişler kadar geçerlidir.

işin içine zamanı katarken bu fikri aklınızdan çıkarmayın. Uzayı evrenin alanı olarak düşünmeye alışmışsınız, ama fiziksel süreçler bu uzayın bir bölgesinde *bir zaman aralığı süresinde* gerçekleşir. Örnek olarak, Şekil 3.3'teki gibi Itchy ve Scratchy'nin düelloya tutuştuğunu ve olan biten her şeyin, eskiden sayfaları çevrildikçe hareketli görüntüler oynatır gibi görü-

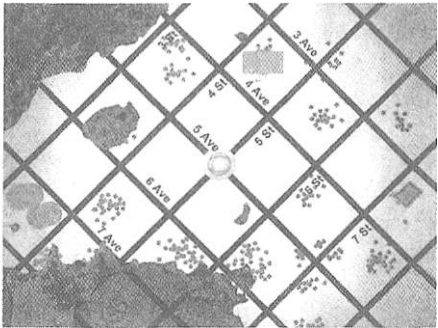
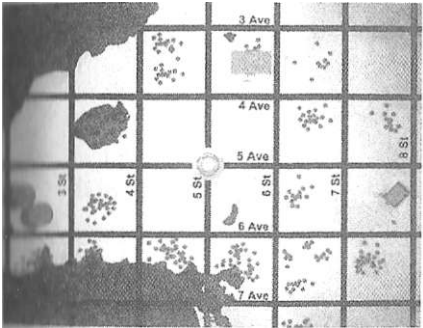


(a)



(b)

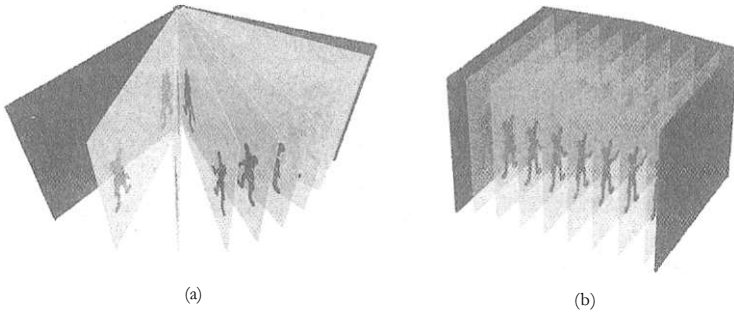
Şekil 3.2 (a) Marge'in tasarımı (b) Lisa'nın tasarımı



Şekil 3.2 (c) Marge ve Lisa'nın cadde ve bulvar tasarımlarının genel görünüşü. İzgaralar birbirlerine göre dönük.

nen defterlerdeki gibi (film defteri diyelim) an be an kaydedildiğini düşünün. Her sayfa -bir film şeridindeki bir kare gibi- zamanda bir anda, uzayın bir bölgesinde ne olduğunu gösteren bir "zaman dilimidir". Başka bir anda ne olduğunu görmek için başka bir sayfayı çevirirsiniz.* (Elbette uzay üç boyutlu, sayfalarsa iki boyutludur, ama düşünme ve şekil çizme kolaylığı açısından bu basitleştirmeyi yapıyoruz. Elde edeceğimiz sonuçlar bundan etkilenmeyecektir.) Terimlerle ifade edecek olursak, uzayın belli bir zaman aralığında göz önüne alınan bir bölgesine bir *uzay-zaman* bölgesi denir. Bir uzay-zaman bölgesini, uzayın bir bölgesinde belirli bir zaman aralığında gerçekleşen bütün olayların bir kaydı gibi düşünebilirsiniz.

Şimdi, Einstein'ın matematik hocası Hermann Minkowski'nin (ki bir zamanlar genç öğrencisini "tembel köpek" diye nitelemişti) görüşünü izleyerek bir uzay-zaman bölgesinin kendi başına bir varlık olduğunu düşünün: Defterin tamamını kendi başına bir cisim olarak ele alın. Bunu yapmak için, Şekil 3.3b'de olduğu gibi defterin sırtını kalınlaştırdığımızı, sonra da Şekil 3.3c'deki gibi bütün sayfaların saydam olduğunu düşünün. Yani deftere

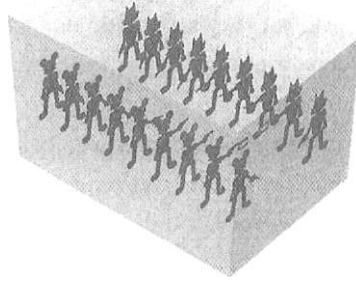


Şekil 3.3 (a) Düellonun film defteri (b) Sırtı genişletilmiş film defteri

*Tıpkı film defterlerinde olduğu gibi, Şekil 3.3'teki sayfalar da yalnızca zamanda temsilî anları gösterir. Bu durum aklınıza zamanın kesikli olup olmadığı veya sonsuza kadar bölünebilir olup olmadığı gibi ilginç sorular getirebilir. Bu soruya ileride döneceğiz, ama şimdilik zamanın sonsuza kadar bölünebileceğini düşünün, yani defterimizde burada gösterilen sayfaların arasını dolduran sonsuz sayıda sayfa olsun.

baktığınızda, verilen bir zaman aralığında olan tüm olayları kapsayan sürekli bir blok göreceksiniz. Bu bakış açısından, sayfaların bloğun içeriğini -yani uzay-zamanda gerçekleşen olayları- düzenlemek için uygun bir yol sağladığı düşünülmelidir. Nasıl caddelerin ve bulvarların oluşturduğu ızgaralar bir şehirdeki yerleri kolayca bulmamızı sağlıyorsa, uzay-zaman bloğunu sayfalara bölmek de bir olayın (örneğin Itchy'nin silahını ateşlemesi, Scratchy'nin vurulması) oluş zamanını -olayın görüntülendiği sayfa- ve sayfalarda gösterilen uzay bölgesinin içindeki yerini vererek, o olayı kolayca belirlememize yardımcı olur.

Önemli nokta şudur: Lisa'nın uzayın bir bölgesini cadde ve bulvarlarla dilimlere bölmek biribirinden farklı ama aynı derecede geçerli yolları olduğunu anlaması gibi, Einstein da bir uzay-zaman bölgesini -yani Şekil 3.3c'deki gibi bir bloğu- belir-



Şekil 3.3 (c) Uzay-zamanın düelloyu içeren bloğu. Sayfalar yani "zaman dilimleri" bloktaki olayları düzenler. Dilimler arasındaki boşluklar sadece şeklin daha kolay anlaşılması içindir; burada zamanın kesikli olduğu (daha ileride ele alacağımız bir konu) söylenmemektedir.

li anlarda uzay bölgelerine bölmek biribirinden farklı ama aynı derecede geçerli yolları olduğunu anlamıştı. Şekil 3.3a, 3.3b ve 3.3c'deki sayfalar-her sayfa yine tek bir anı temsil ediyor- pek çok olası dilimleme biçiminden yalnız birini gösteriyor. Bu, uzay konusunda sezgisel olarak bildiğimiz şeylerin sadece önemsiz bir uzantısı gibi görünebilir, ama binlerce yıl koruduğumuz en te-

mel sezgilerden bazılarının altüst olmasının temelinde yatan budur. 1905'e kadar herkesin zamanın geçişini aynı şekilde algıladığı, yani herkesin verili bir anda hangi olayların olduğu ve dolayısıyla da uzay-zaman defterindeki verili bir sayfanın içeriğinin ne olacağı konusunda hemfikir olduğu düşünülüyordu. Ama Einstein'ın birbirlerine göre hareket halinde olan iki gözlemcinin saatlerinin zamanı farklı gösterdiğini anlamasıyla her şey değişti. Birbirlerine göre hareket halinde olan saatler eşzamanlı olmaktan çıkar ve eşanlığın farklı bir yorumunu verirler. Şekil 3.3b'deki her sayfa, verili bir anda uzayda gerçekleşen olayların yalnızca belli bir gözlemci tarafından görülen görüntüsüdür. İlk gözlemciye göre hareket halinde olan bir başka gözlemci, bu sayfalardan herhangi birindeki olayların tümünün aynı zamanda *gerçekleşmediğini* söyleyecektir.

Bu, *eşanlığın göreliliği* olarak bilinir ve doğrudan görülebilir. Şimdi Itchy ve Scratchy'nin ellerinde silahlan, hareket halindeki uzun bir tren vagonunun iki ucunda, yüzleri birbirlerine dönük olarak durduğunu düşünün. Düello hakemlerinden biri vagonda, diğeri peronda olsun. Düellonun olabildiğince adil olmasını sağlamak için taraflar üç adım kuralından vazgeçiyorlar ve düellocuların ikisine de eşit uzaklıkta, yerde duran bir avuç barutun patlamasıyla silahların çekilmesine karar veriliyor. İlk hakem Apu fitili ateşler, içkisinden bir yudum alır ve geri çekilir. Barut patlar, hem Itchy hem de Scratchy silahlarını çeker ve ateşler. Itchy ve Scratchy barut yığınının eşit uzaklıkta oldukları için Apu, patlamanın ışığının her ikisine de eşanlı olarak ulaştığından emin olduğundan, düellonun adil olduğunu göstermek üzere yeşil bayrağını kaldırır. Ama düelloyu perondan izleyen ikinci hakem Martin bağırarak faul yapıldığını, patlamanın ışığının Itch'ye Scratchy'den daha önce ulaştığını iddia eder. Vagon ileriye doğru hareket ettiği için Itchy'nin ışığa doğru, Scratchy'ninse ışıktan uzağa doğru hareket ettiğini söyler. Bunun anlamı şudur: Işık Itchy'ye ulaşmak için o kadar yol kat etmesine gerek yoktu, çünkü Itchy zaten ışığa doğru hareket ediyordu; oysa Scratchy ışıktan uzağa doğru hareket etti-

ğinden ışığın Scratchy'ye ulaşmak için daha uzun bir yol kat etmesi gerekiyordu. Işığın hızı -kimin bakış açısından olursa olsun, ister sağa ister sola gitsin- sabit olduğundan, Martin ışığın Scratchy'ye ulaşmak için daha uzağa gitmesi gerektiğini, bunun da daha uzun zaman alacağını, bu sebeple düellonun adil olmadığını iddia etmektedir.

Kim haklı, Apu mu yoksa Martin mi? Einstein'ın beklenmedik yanıtı ikisinin de haklı olduğu. İki hakemin vardığı sonuçlar farklı da olsa, her ikisinin de gözlemi ve akıl yürütmesi hatasız. Tıpkı beysbol sopası ve topu gibi, aynı olaylar dizisine farklı bakış açılarından yani perspektiflerden bakıyorlar. Einstein'ın ortaya çıkardığı şaşırtıcı şey, iki hakemin farklı bakış açıları- nın, hangi olayların aynı anda olduğu konusunda farklı ama eşit derecede geçerli sonuçlara yol açmasıdır. Elbette gündelik hayatta karşılaştığımız hızlar, örneğin bir trenin hızı söz konusu olduğunda bu fark çok küçüktür -Martin, Scratchy'nin ışığı Itchy'den saniyenin trilyonda birinden daha kısa bir süre sonra gördüğünü iddia eder- ama tren ışık hızına yakın bir hızla hareket ediyor olsaydı, bu fark çok büyük olurdu.

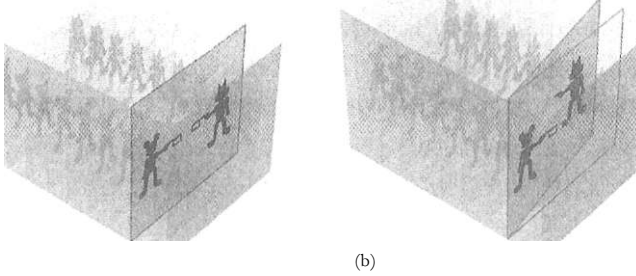
Bunun uzay-zamanın bir bölgesini dilimleyen film defleri için ne anlama geldiğini bir düşünün. Birbirine göre hareket halinde olan gözlemciler nelerin eşanlı olduğu konusunda anlaşılamadığı için, her bir gözlemcinin uzay-zaman bloğunu sayfalar halinde -her sayfa, gözlemcinin bakış açısından belirli bir anda olan bütün olayları kapsayacak şekilde- dilimleme şekli de uyumayacaktır. Birbirlerine göre hareket halinde olan gözlemcilerin uzay-zaman bloğunu sayfalara (yani zaman dilimlerine) ayırışı farklı ama eşit derecede geçerli olacaktır. Lisa ve Marge'ın uzay için bulduğunu Einstein uzay-zaman için bulmuştur.

Açılı Dilimler

Caddelerin ve bulvarların oluşturduğu ızgarayla zaman dilimleri arasındaki benzerlik daha da ileri götürülebilir. Tıpkı Marge'ın ve Lisa'nın tasarımlarının yönelişlerinin farklı olması gibi, Apu'nun ve Martin'in zaman dilimlerinin de (yani film defte-

ri sayfalarının) yönelişleri farklı olacaktır, ama bu kez işin içinde hem uzay hem de zaman vardır. Bu durum Şekil 3.4a ve 3.4b'de gösterilmiştir. Şekillerde, Martin'in dilimlerinin Apu'nunkilere göre dönük olduğunu, bunun da Martin'in düellonun adil olmadığı sonucuna varmasına yol açtığını görüyoruz. Ama bir ayrıntıda önemli bir fark var; Marge'ın ve Lisa'nın projeleri arasındaki dönme açısı bir tasarım seçimi iken, Apu'nun ve Martin'in dilimleri arasındaki dönme açısı, ikisinin görelî hızları tarafından belirleniyor. Çok az bir çaba ile bunun nedenini anlayabiliriz.

Itchy ile Scratchy'nin barıştığını düşünün. Artık birbirlerini vurmaya çalışmak yerine, sadece trenin önündeki ve arkasındaki saatlerin tam olarak eşzamanlı çalışıp çalışmadığından emin olmaya çalışıyorlar. Hâlâ baruttan eşit uzaklıkta oldukları için, şöyle bir plan yapıyorlar: Barut patlayınca çıkan ışığı görür görmez ikisi de saatlerini öğlen 12'ye ayarlamayı kararlaştırıyor.



Şekil 3.4 Birbirlerine göre hareket halinde olan Apu'nun (a) ve Martin'in (b) zaman dilimlemeleri. Dilimler uzay ve zamanda birbirlerine göre dönük. Trende olan Apu ya göre, düello adildir; peronda olan Martine göreyse adil değildir. Her iki bakış açısı da eşit derecede geçerlidir, (b)'de hakemlerin uzay-zamandaki dilimlemelerinin arasındaki açı farkı vurgulanmıştır.

Onların bakış açılarından, ışık her birine ulaşmak için eşit mesafe kat edecek, ışığın hızı da sabit olduğu için her ikisine eşanlı ulaşacak. Ama önceki mantığa göre, Martin ya da perondaki herhangi biri Itchy'nin ışığa doğru, Scratchy'ninse ışıktan uzağa doğru hareket ettiğini görecek, bu nedenle de Itchy'nin işareti

Scratchy'den biraz önce alacağını söyleyecektir. Yani perondaki gözlemciler Itchy'nin saatini 12:00'ye Scratchy'den önce ayarladığı, dolayısıyla da Itchy'nin saatinin Scratchy'ninkinden biraz ileride olduğu sonucuna varacaktır. Örneğin, Martin'le beraber peronda duran bir gözlemci için Itchy'nin saati 12:06 iken Scratchy'nin saati 12:04 olabilir (kesin değerler trenin uzunluğuna ve hızına bağlıdır; tren ne kadar uzun ve ne kadar hızlıysa aradaki fark da o kadar artar). Ama Apu'ya ve trendeki herkese göre Itchy ve Scratchy eşanlılığı mükemmel bir biçimde başarmıştır. Her ne kadar insanın bunu kabul etmesi zor olsa da, burada bir açmaz yoktur: *Birbirlerine göre hareketli olan gözlemciler eşanlılık konusunda -bangi olayların aynı anda olduğu konusunda- anlaşamaz.*

Bunun anlamı şudur: Trendeki gözlemcilerin gördüğü haliyle film defterinin bir sayfası (bu gözlemcilerin eşanlı olduğunu düşündükleri olayların, örneğin Itchy ve Scratchy'nin saatlerini ayarlamasının olduğu sayfa) perondaki gözlemcilerin bakış açısından *farklı* sayfalarda yer alan olayları da kapsar (perondaki gözlemcilere göre Itchy saatini Scratchy'den önce ayarlamıştır, bu nedenle bu iki olay perondaki gözlemcilerin bakış açısından farklı sayfalarda yer almaktadır). İşte bu kadar. Trendekilerin bakış açısından tek bir sayfa, perondakilerin bakış açısına göre daha önceki ve daha sonraki sayfalarda yer alan olayları da içerir. Martin ve Apu'nun dilimlemelerinin (Şekil 3.4) birbirlerine göre dönük olmasının nedeni budur: Bir bakış açısına göre tek bir zaman dilimi, diğer bakış açısına göre birçok zaman dilimini kesebilir.

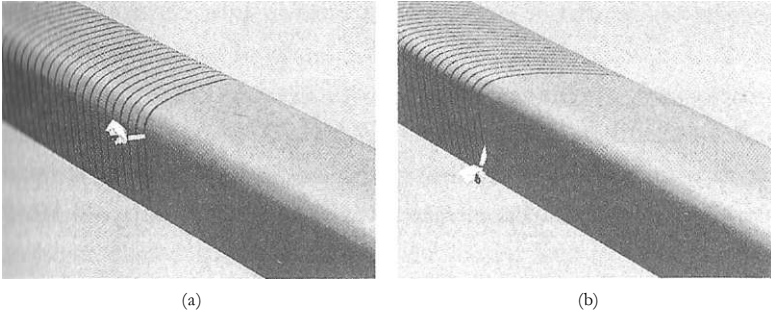
Eğer Newton'un ortaya attığı mutlak uzay ve mutlak zaman kavramları doğru olsaydı, herkes uzay-zamanın tek bir şekilde dilimlendiğini konusunda fikir birliğinde olurdu. Her dilim, mutlak zamanın belirli bir anında görüldüğü biçimiyle mutlak uzayı temsil ederdi. Ama dünya böyle değil. Newton'un katı zaman kavramından Einstein'ın bulduğu esnek zaman kavramına geçince, kullandığımız benzetmeyi de değiştirebiliriz. Uzay-zamanı katı bir film defteri olarak düşünmek yerine, büyük bir

ekmek somunu olarak düşünmek bazen daha yararlı olacaktır. Defteri oluşturan sabit sayfaların -Newton un sabit zaman dilimleri-yerine, Şekil 3.5a da olduğu gibi bir somun ekmeği nasıl farklı açılarda, birbirlerine paralel dilimlere bölebileceğinizi düşünün. Her ekmek dilimi bir gözlemcinin bakış açısına göre belirli bir andaki uzayı temsil eder. Ama Şekil 3.5b'de gösterildiği gibi, ilk gözlemciye göre hareket halinde olan bir başka gözlemci uzay-zaman somununu başka bir açıyla dilimleyecektir. Gözlemcilerin görelî hızları ne kadar büyükse, kestikleri paralel dilimler arasındaki açı da (kitabın sonundaki notlarda belirtildiği gibi, ışığın koyduğu hız sınırı nedeniyle bu dilimler arasında en fazla 45°'lik bir dönme açısı olabilir⁹), aynı anda olduğunu söyledikleri olaylar arasındaki uyumsuzluk da o kadar büyük olacaktır.

Özel Göreliliğe Göre Kova

Zamanın ve uzayın göreliliği düşünüşümüzde kökten bir değişiklik yapmamızı gerektirir. Ama burada, daha önce sözü edilen, şimdi de ekmek somunu örneğiyle gösterilen ve sık sık gözden kaçan önemli bir nokta var: Görelilikteki her şey görelî değildir. Eğer siz ve ben, bir ekmek somununu iki farklı şekilde dilimlemeyi düşünsek bile, üzerinde kesin olarak anlaştığımız bir şey var: Somunun kendisinin bütünlüğü. Her ne kadar dilimlerimiz farklı olsa da, ben kendi dilimlerimi bir araya getirirsem, siz de kendi dilimlerinizi bir araya getirirseniz aynı ekmek somununu yeniden oluştururuz. Başka ne olabilirdi ki? Aynı somunu dilimlediğimizi düşündük.

Benzer biçimde, herhangi bir gözlemcinin bakış açısına göre, uzayın ardışık anlardaki dilimleri bir araya gelince (Şekil 3.4'e bakınız) aynı uzay-zaman bölgesi oluşur. Farklı gözlemciler bir uzay-zaman bölgesini farklı şekillerde dilimleyebilir, ama bölgenin kendisinin varlığı -tıpkı ekmek somunu gibi- bağımsızdır. Yani her ne kadar Newton kesinlikle hatalıysa da, mutlak bir şeyin, herkesin üzerinde fikir birliğine varacağı bir şeyin var olduğu yolundaki sezgisi özel görelilik tarafından tümüyle yıkıl-



Şekil 3.5 Bir ekmek somunu nasıl farklı açılarda dilimlenebilirse, bir uzay-zaman bloğu da, birbirlerine göre hareket halinde olan gözlemciler tarafından farklı açılarda "zaman dilimlerine" bölünür. Göreli hız arttıkça, açı da artar (ışık hızının sınırladığı en yüksek hız, bu açının en fazla 45° olmasına olanak verir).

mamıştır. Mutlak uzay yoktur. Mutlak zaman yoktur. Ama özel göreliliğe göre mutlak uzay-zaman vardır. Bu gözlemi yaptıktan sonra şimdi kova problemine yeniden dönelim.

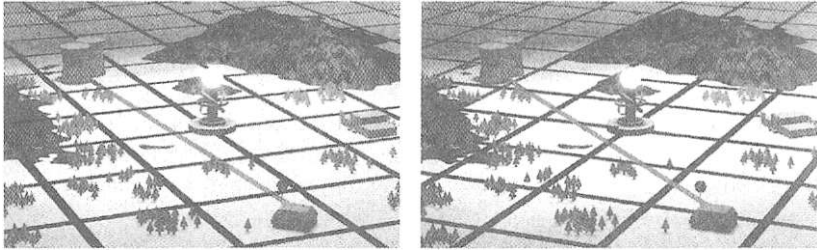
Bomboş bir evrende kova *neye* göre döner? Newton a göre cevap mutlak uzaydır. Mach'a göre, kovanın dönmekte olduğunu söylemenin bile bir anlamı yoktur. Einstein'ın özel göreliliğine göre ise, cevap mutlak uzay-zamandır.

Bunu anlamak için yeniden Springfield için önerilen cadde ve bulvar projelerine dönelim. Marge'ın ve Lisa'nın, projelerindeki ızgaralar birbirlerine göre dönük olduğu için Kwik-E-Mart'ın ve nükleer santralin adresleri konusunda anlaşılmadıklarını hatırlayalım. O durumda bile, projelerdeki ızgaralar nasıl yerleştirilmiş olursa olsun, hâlâ üzerinde kesinlikle fikir birliğine vardıkları bazı şeyler vardır. Örneğin, çalışanların öğle tatilindeki verimliliklerini artırmak için nükleer santralden Kwik-E-Mart'a bir yol çizilirse, Marge ile Lisa bu yolun hangi cadde ve bulvarları keseceği konusunda, Şekil 3.6'da göreceğiniz gibi, yine anlaşılamayacaktır. Ama bu yolun şekli konusunda kesinlikle anlaşılabilecektir: Yol düz bir çizgidir. Çizilen yolun geometrik şekli, o sırada kullanılan cadde-bulvar ızgarasından tamamen bağımsızdır.

Einstein, buna benzer bir şeyin uzay-zaman için de geçerli olduğunu anlamıştı. Her ne kadar birbirlerine göre hareket halin-

de olan iki gözlemci uzay-zamanı farklı şekillerde dilimliyorsa da, hâlâ üzerinde anlaştıkları şeyler vardır. Örnek olarak sadece uzayda değil de uzay-zamanda düz bir çizgi düşünün. Her ne kadar zamanı da işin içine katmak bu yolu bizim için biraz daha az bilindik hale getiriyorsa da, bir an düşününce bunun anlamını kavrayabiliriz. Bir cismin uzay-zamanda izlediği yolun düz bir çizgi olması için cismin uzayda bir doğru üzerinde hareket etmesi yetmez, zamandaki hareketinin de tekbiçimli olması gerekir; yani hem hızı hem de yönü değişmemeli, doğrusal hızı sabit olmalıdır. Şimdi, farklı gözlemciler uzay-zaman somununu farklı açılarda dilimliyor olsalar ve bu nedenle bir yörünge üzerindeki farklı noktalar arasında ne kadar yol alındığı ve ne kadar zaman geçtiği konularında anlaşıyor olsalar bile, Marge ve Lisa gibi gözlemciler uzay-zamanda izlenen yolun bir doğru olup olmadığı konusunda fikir birliğinde olacaktır. Kwik-E-Mart'a çizilen yolun geometrik biçiminin, kullanılan cadde/bulvar dilimlemesinden bağımsız olması gibi, uzay-zamanda izlenen yolların geometrik biçimleri de kullanılan zaman dilimlemesinden bağımsızdır.¹⁰

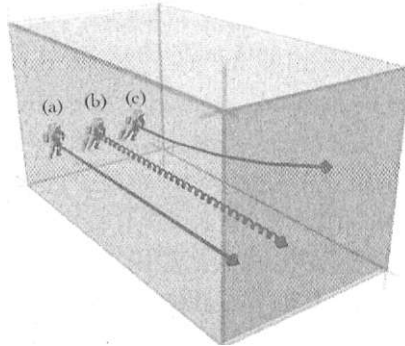
Bu, basit ama önemli bir kavrayıştır, çünkü özel görelilik bu kavrayışla, bir şeyin ivmelenip ivmelenmediği konusunda mutlak bir ölçüt -sabit ve görelî hızlarından bağımsız olarak tüm gözlemcilerin üzerinde fikir birliğine varacağı bir ölçüt- sağlamıştır. Bir cismin, örneğin Şekil 3.7'deki astronotun (a) uzay-zamanda izlediği yol doğru bir çizgi ise, o cisim ivmelenmiyor-



Şekil 3.6 Hangi cadde/bulvar ızgarasının kullanıldığından bağımsız olarak, herkes yolun bu örnekte bir doğru olduğu konusunda aynı fikirdedir.

dur. Bir cismin uzay-zamanda izlediği yol doğru bir çizgi değil de başka herhangi bir tür yol ise, o cisim *ivmeleniyordur*. Örneğin Şekil 3.7'deki astronot sırtındaki roketi ateşleyip sürekli bir çemberçizerek dönse (b) veya giderek artan bir hızla fırlasa (c) uzay-zamanda izlediği yol eğri olacaktır; bu da ivmelenmenin kesin bir göstergesidir. Böylece *uzay-zamanda izlenen yolların geometrik şekillerinin, bir cismin ivmelenip ivmelenmediğini belirlemek için mutlak bir standart sağladığını* görüyoruz. Bu standartı tek başına uzay değil, uzay-zaman sağlıyor.

Demek ki bu anlamda özel görelilik bize, ivmeli hareket konusunda uzay-zamanın kendisinin hakem olduğunu söylüyor. Uzay-zaman bize bir şeyin -örneğin dönen bir kovanın- uzay bomboş bile olsa, kendisine göre ivmelendiğini söyleyebileceğimiz bir referans sistemi sağlıyor. Bu kavrayışın edinilmesiyle birlikte bilimin sarkacı yeniden sallanıyor: Görelilikçi Leibniz'den mutlakçı Newton'a, oradan görelilikçi Mach'a ve şimdi yeniden özel görelilik kuramı ile bir kez dahil gerçekliğin alanının -uzay değil uzay-zaman olarak kabul edilen alanın- hareket için bir referans sistemi sağlamaya yeterli olduğunu söyleyen Einstein'a."



Şekil 3.7 Üç astronotun uzay-zamanda izlediği yollar: (a) astronotu ivmelenmediği için uzay-zamanda izlediği yol bir doğru, (b) astronotu sürekli çember çizdiği için uzay-zamanda izlediği yol bir sarmal, (c) astronotu uzaya doğru ivmelendiği için uzay-zamanda eğri bir yol izliyor.

Kütleçekimi ve çok Eski Bir Soru

Mach'ın fikirleri geçerliliğini yitirdiğine ve Einstein, Newton'un mutlak uzay ve zaman kavramlarını çok temel bir biçimde g ncelle tirerek günün galibi olduğuna göre, artık bu noktada kova öyküsünün sonuna geldiğimizi düşünebilirsiniz. Aslında gerçek daha ilginçtir ve anlaşılması biraz daha zordur. EĞer şimdiye kadar anlattığımız g r   lerle ilk defa kar ıla tıysanız, bu bölümün son kısımlarına geçmeden önce biraz ara verseniz iyi olabilir. Tablo 3.1'de yeniden ba lamak istediğinizde bellediğinizi tazelemenizi sağlayacak bir  zet göreceksiniz.

Tamam. EĞer bu sözcükleri okuyorsanız, uzay-zamanın  y k s nde yer alan, bir sonraki büyük adım için hazır olduğunuzu varsayıyorum. Bu adımın atılmasını sağlayan Ernst Mach'ın ta kendisidir. Her ne kadar özel görelilik, Mach'ın kuramından farklı olarak, bombo  bir evrende dönmekte olan bir kovanın i  duvarına bastırıldığınızı hissededeğiniz ve dönmekte olan iki taşın arasındaki ipin geriledeği sonucuna varmış olsa bile, Einstein'ın hâlâ Mach'ın fikirlerinden etkileniyordu. Ancak bu fikirlerin ciddi bir biçimde göz önüne alınmaları için geni letilmeleri gerektiğini anlamıştı. Mach hiçbir zaman, kendi  evrenizde dönerken kollarınızın dışarı savrulmasını ya da dönen bir kovanın i  duvarına bastırıldığınızı hissetmenizi uzak yıldızların nasıl etkiliyor olabiledeği konusunda bir mekanizma ortaya koymamı tı. Einstein, eğer böyle bir mekanizma varsa bunun kütleçekimiyle ilgili olabiledeğini düşünmeye ba ladı.

Bunu fark etmek Einstein'a çok çekici geldi, çünkü yaptığı g z mlemenin anlaşılabilir ve yeniden şekillendirilebilir olmasını sağlamak amacıyla kütleçekimini tümüyle göz ardı etmişti. Hem  zel göreliliği hem de kütleçekimini içeren daha sağlam bir kuram Mach'ın g r   leri ile ilgili farklı bir sonuca ulaşılmasını sağlayabilir belki, diye düşündü. Özel göreliliğin kütleçekimini de kapsayacak şekilde genelle tirilmi  hali belki, maddenin -hem bize yakın hem de bizden uzaktaki maddenin- ivmelendiğimiz zaman hissettiğimiz kuvvetten sorumlu olduğunu gösterebilirdi.

Newton	Uzay bir varlıktır; ivmeli hareket görelidir; mutlak konum
Leibniz	Uzay bir varlık değildir; hareketin tüm öğeleri görelidir; görelilikçi konum
Mach	Uzay bir varlık değildir; ivmeli hareket evrendeki ortalama kütle dağılımına göre görelidir; görelilikçi konum
Einstein (Özel Görelilik)	Uzay da zaman da görelidir; uzay-zaman mutlak bir varlıktır

Tablo 3.1 Uzayın ve uzay-zamanın doğası ile ilgili düşüncelerin bir özeti

Einstein'ın dikkatini kütleçekimi üzerinde yoğunlaştırmasının ikinci ve daha acil bir nedeni vardı. Hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı olmadığını öne süren özel göreliliğin, ikiyüzyıldan daha uzun bir zaman Ay'ın, gezegenlerin, kuyruklu yıldızların ve gökyüzüne doğru fırlatılan her şeyin hareketini inanılmaz bir kesinlikle öngören Newton'un evrensel kütleçekimi yasası ile tamamen çeliştiğini fark etmişti. Newton'un evrensel yasasının deneySEL başarısına rağmen, Einstein Newton'a göre kütleçekiminin etkisinin bir yerden diğerine, örneğin Güneş'ten Dünyaya, Dünya'dan Ay'a, herhangi bir yerden herhangi bir yere anında, ışık hızından çok daha hızlı ulaştığını anlamıştı. Bu, özel görelilikle doğrudan çelişiyordu.

Bu çelişkiyi bir örnekle açıklayalım: Düş kırıklığı içinde olduğunuz bir gece (tuttuğunuz takım yenilmiş, hiç kimse doğum gününüzü hatırlamamış, en sevdiğiniz pastanın son dilimini başka biri yemiş) kafanızı dinlemek için teknenize binip denize açıldığınızı düşünün. Ay tepede, sular yüksek (suların yükselmesine neden olan kuvvet Ay'ın kütleçekimidir), ay ışığı suyun dalgalı yüzeyinde dans ediyor. Ama, zaten gecenizin berbat geçtiği yetmiyormuş gibi, düşmanca davranan dünya dışı yaratıklar belirip Ay'ı birdenbire galaksinin öbür ucuna gönderiveriyorlar. Ay'ın birdenbire ortadan yok olması her durumda garip olacaktır, ama eğer Newton'un kütleçekimi yasası doğruysa, çok daha garip bir

şey olacaktır. Newton yasası, Ay'ın kütleçekiminin yok olması nedeniyle, siz Ay'ın kaybolduğunu görmeden yaklaşık bir buçuk saniye önce suların alçalmaya başlayacağını öngörmektedir. *Yarışa tabanca patlamadan önce başlayan bir atlet gibi, su da bir buçuk saniye önce çekilmeye başlayormuş gibi görünecektir.*

Newton'a göre bunun nedeni, Ay ortadan yok olur olmaz kütleçekiminin de *o anda yok* olacak olması, kütleçekiminin yokluğu sonucunda da suların Kemen çekilmeye başlayacak olmasıdır. Ama ışığın Ay'la Dünyaya arasındaki 380.000 kilometre mesafeyi kat etmesi bir buçuk saniye alacağından, siz Ay'ın kaybolduğunu hemen göremezsiniz; bir buçuk saniye süreyle daha Ay her zamanki gibi gökte pırıl pırıl parlarken sular çekiliyor gibi görünürdü. Yani Newton'un yaklaşımına göre kütleçekimi bizi ışıktan önce etkiler -kütleçekimi ışıktan hızlıdır- ama Einstein bunun doğru olmadığından emindi.¹²

1907 yılında, Einstein en az Newton'un ki kadar kesin, ama özel görelilikle çelişmeyecek bir kütleçekimi kuramı formüle edebilmek için aralıksız çalıştı. Bu iş, her şeyin ötesinde bir meydan okumaya dönüşmüştü. Einstein'ın muhteşem zekâsı sonunda kendine denk bir problem bulmuştu. O dönemden kalan defterleri, yarı formüle edilmiş fikirler, küçük hataların yanlış yönlerine götürmesi nedeniyle kıl payıyla ıskalanan hedefler, problem çözüldü kanısıyla konulmuş işaretlerin hemen yanında yeni bir hatayaptığını fark ettiğini gösteren ünlemlerle doludur. Einstein çalışmasını 1915'te nihayet ortaya çıkardı. Her ne kadar önemli noktalarda, başta matematikçi Marcel Grossmann'dan olmak üzere yardım aldıysa da, *genel göreliliğin* keşfi, tek bir insanın zihninin evreni anlamak üzere ortaya koyduğu muazzam çabanın en az bulunan örneklerinden biridir. Sonuç ise kuantum öncesi fiziğin en değerli mücevheridir.

Einstein'ın genel göreliliğe yaptığı yolculuk, Newton'un iki yüzyıl önce, biraz utanarak da olsa kaçındığı temel bir soru ile başlamıştır. Kütleçekimi, etkisini uzayda çok büyük uzaklıklarda nasıl gösteriyor? O kadar uzaktaki Güneş, Dünya'nın hareketlerini nasıl etkiliyor? Güneş Dünyaya dokunmadan nasıl

kuvvet uygulayabiliyor? Kısacası, kütleçekimi işini nasıl yapıyor? Her ne kadar Newton, kütleçekiminin etkisini büyük bir kesinlikle tanımlayan bir formül keşfetmişse de, kütleçekiminin aslında nasıl işlediğine ilişkin önemli soruyu yanıtsız bıraktığının pekâlâ farkındaydı. *Principia* adlı eserinde, durumdan kendisinin de hoşlanmadığını belirtir bir ifadeyle şöyle yazmıştır: "Bu soruyu, düşünceleri için okuyuculara bırakıyorum."¹³ Bu problem ile Faraday'ın ve Maxwell'in 1800'lerde manyetik alan kavramını kullanarak mıknatısların hiç dokunmadıkları cisimleri etkilemesi olgusunu çözmeleri arasındaki benzerliği görebilirsiniz. Dolayısıyla kütleçekimi için de benzer bir yanıt önerilebilir: Kütleçekimi etkisini bir başka alan, kütleçekimi alanı yoluyla iletir. Genel olarak bu doğru bir öneridir. Ama bu yanıtı özel görelilikle çelişkiye düşmeden algılayıp değerlendirmek zordur.

Çok zordur. Einstein'ın kendini adadığı çalışma işte buydu. On yılıyakın bir süre yürüttüğü karmaşık araştırmalardan sonra geliştirdiği göz kamaştırıcı yapı ile Newton'un o zamana kadar büyük saygı gören kütleçekimi kuramını yıktı. Aynı derecede göz kamaştırıcı olan bir başka nokta da Einstein'ın kilit önem taşıyan keşfinin, Newton'un kova örneği ile dikkat çektiği konuyla sıkı sıkıya bağlantılı olması, yani öykünün bir daire çizip tekrar başa dönmesidir: İvmeli hareketin gerçek doğası nedir?

Kütleçekimi ile İvmenin Eşdeğerliği

özel görelilikte Einstein'ın asıl odaklandığı konu sabit hızla hareket eden gözlemcilerdir, yani hareketi hissetmedikleri için kendilerinin sabit olduğunu ve her şeyin onlara göre hareket ettiğini öne süren ve bunda da haklı olan gözlemciler. Trendeki Itchy, Scratchy ve Apu hiçbir hareket hissetmez. Onların bakış arısından, Martin ve platformdaki herkes hareket etmektedir. Martin de hiçbir hareket hissetmez. Ona göre hareket eden tren ve içindeki yolculardır. Bu bakış açılarından biri diğerinden daha doğrudur diyemeyiz. Ama ivmeli hareket farklıdır, çünkü ivmeli hareketi *hissedebilirsiniz*. Bir otomobil ileriye doğru ivmelenirken koltuğun arkalığına doğru bastırıldığınızı, bir tren kes-

kin bir dönemece girdiğinde yana doğru savrulduğunuzu, yukarı doğru ivmelenen bir asansörde asansörün zeminine doğru bastırıldığınızı hissedersiniz.

Hissedilen bu kuvvetler Einstein'a çok tanıdık gelmiştir. Örneğin keskin bir dönemece yaklaşırken, dönemeci alırken hissedeceğiniz kuvvet kaçınılmaz olduğundan, yana savrulmaya hazırlanmak için kendinizi kasarsınız. Kendinizi bu etkiden korumanın hiçbir yolu yoktur. Bu kuvvetten kurtulmanın tek yolu planınızı değiştirip dönemeci almaktan vazgeçmektir, işte bu, Einstein'ın kafasında bir şimşek çakmasına neden oldu. Kütleçekimi kuvvetinin de tamamen aynı özelliklere sahip olduğunu fark etti. Eğer Dünya'nın üzerindeyseniz, Dünya'nın kütleçekimi kuvvetinin etkisi altındasınızdır. Bu, kaçınılmazdır. Başka bir yol yoktur. Kendinizi elektromanyetik ve nükleer (çekirdek-sel) kuvvetlerden koruyabilirsiniz, ama kütleçekiminden korunmanın hiçbir yolu yoktur. 1907 yılında bir gün, Einstein bunun yalnızca bir benzetme olmadığını anladı. Bilim insanlarının bazen bir ömür boyu bekledikleri bir içgörü anında, Einstein kütleçekiminin ve ivmeli hareketin, aynı bir madeni paranın iki yüzü gibi olduklarını anladı.

Einstein, yapmayı planladığınız hareketi değiştirerek (ivmelenmekten kaçınarak) otomobil koltuğunda arkalığa doğru bastırılmaktan veya trende yana savrulmaktan kaçınabileceğiniz gibi, hareketinizi uygun bir biçimde değiştirerek kütleçekimi ile ilgili o bildik duyumdan da kaçınabileceğinizi buldu. Bu fikir, şaşılacak derecede basittir. Bunu anlamak için Barney'nin bir umut, Springfield'deki bütün göbekli erkeklerin katıldığı, bir ay sürecek göbek eritme yarışmasını kazanmaya çalıştığını düşünelim. İki hafta süreyle yalnızca sıvıyla beslenen Barney, göbeği hâlâ engel olduğu için banyodaki tartıyı okuyamadığını görünce tüm umudunu yitirir. O düş kırıklığıyla, tartı da ayağına yapışmıştır bu arada, banyo penceresinden aşağı atlar. Aşağıya doğru düşerken, komşunun havuzuna dalmadan hemen önce tartıya bakan Barney acaba ne görmüştür? O sırada tartının sıfırı göstereceğini ilk ve tam olarak anlayan kişi Einstein olmuştur.

Tartı Barney ile tam olarak aynı hızda düştüğü için Barney'nin ayakları tartıya basınç yapmayacaktır. *Serbest düşme sırasında Barney, astronotların uzayda yaşadıkları ağırlıksızlık duygusunu* yaşayacaktır.

Gerçekten de, eğer Barney'nin pencereden havası tamamen alınmış bir boşluğa atladığını düşünersek, dolayısıyla aşağı doğru düşerken yalnızca havanın oluşturduğu direnç ortadan kalkmış olmayacak, Barney'nin vücudundaki her atom aynı hızla düşmekte olduğundan vücudunda hissettiği dış etkilerden kaynaklanan -ayakların ayak bileklerine, bacakların kalçalara ve kolların omuzlara uyguladığı- tüm baskı ve gerilmeler de ortadan kalkacaktır.¹⁴ Eğer Barney düşerken gözlerini kapatırsa, uzayın karanlığında yüzüyor olsaydı hissedeceklerinin aynısını hissedecektir, (içinde insan olmayan örnekleri tercih ediyorsanız, havası boşaltılmış bir yere birbirlerine iple bağlı iki taş atarsanız da sanki taşlar uzaydayüzüyormuş gibi aralarındaki ip gerilmez, gevşek kalır.) Yani Barney hareket durumunu değiştirerek -kendini tamamen "kütleçekimine bırakarak"- kütleçekiminin olmadığı bir ortamı taklit etmiş olur. (Nitekim NASA'da görevli astronotlar da dış uzayın kütleçekimsiz ortamına hazırlanmaları için takma adı *Vomit Comet* (Kusturucu Kuyruklu yıldız) olan özel bir 707 ile uçurulur. Bu uçuşlarda uçak tekrar tekrar Dünyaya doğru serbest düşüş hareketi yapar.)

Aynı şekilde, hareket durumunu uygun biçimde değiştirerek, temelde kütleçekimi ile aynı olan bir kuvvet yaratabilirsiniz. Örneğin, Barney'nin tartı hâlâ ayağına yapışık vaziyetteyken ve hâlâ sıfırı gösterirken uzay kapsülünde ağırlıksız olarak "yüzmekte olan" astronotlara katıldığını düşünelim. Eğer roketler ateşlenip kapsül yukarı doğru ivmelenirse, her şey tamamen değişecektir. Tıpkı yukarı doğru ivmelenen bir asansörün tabanına bastırıldığını hissetmeniz gibi, Barney de kapsülün tabanına doğru bastırıldığını hissedecektir. Artık ayakları da tartıya bastırıldığı için tartı sıfır göstermeyecektir. Eğer roketler tam gereken güçte ateşlenirse tartının gösterdiği rakam banyodayken gösterdiği rakamla aynı olacaktır. Uygun ivmelenme hare-

ketinin gerçekleşmesi sonucunda, Barney kütleçekiminden ayrırt edilmesi olanaksız bir kuvvet hissetmektedir.

Aynı şey ivmeli hareketin diğer türleri için de geçerlidir. Eğer Barney, dış uzayda dönmekte olan kovanın içindeki Homer'in yanına gidip de Homer'e dik açı yapacak şekilde dursaydı -yani ayakları ve tartı kovanın iç duvarına basacak şekilde dursaydı- ayakları tartıya bastıracağı için tartı sıfırdan farklı bir sayı gösterirdi. Eğer kova tam gereken hızda dönüyor olsaydı, tartı Barney'nin banyoda okuduğu rakamı gösterirdi: Yani dönmekte olan kovanın ivmesi de Dünya'nın kütleçekimini taklit eder.

Tüm bunlar, Einstein'ın kütleçekiminden hissedilen kuvvetle ivmeden hissedilen kuvvetin aynı, yani eşdeğer, olduğu sonucuna varmasına neden oldu. Einstein buna *eşdeğerlik ilkesi* adını verdi.

Bunun ne anlama geldiğine bir bakalım. Şu anda kütleçekiminin etkisini hissediyorsunuz. Eğer ayaktaysanız, ayaklarınız yerin vücudunuzun ağırlığını desteklediğini hissediyor. Eğer oturuyorsanız, bu desteği bir başka yerinizle hissediyorsunuz. Eğer bu kitabı bir otomobilde ya da uçakta okumuyorsanız, büyük olasılıkla durağan olduğunuzu -yani ivmelenmediğinizi hatta hiç hareket etmediğinizi- düşünüyorsunuz. Ama Einstein'a göre aslında ivmeleniyorsunuz. Hareketsiz oturduğunuz için bu size biraz aptalca gelebilir, ama her zamanki soruyu sormayı ihmal etmeyin: Hangi referans noktasına göre ivmeleniyorum? Kimin bakış açısına göre ivmeleniyorum?

Einstein özel görelilikte referans sistemini mutlak uzay-zamanın sağladığını söyler, ama özel görelilik kütleçekimini hesaba katmaz. Einstein, eşdeğerlik ilkesi sayesinde kütleçekimini de hesaba katan çok daha sağlam bir referans sistemi bulmuş oldu. Bu da bakış açısında kökten bir değişikliğe yol açtı. *Kütleçekimi ve ivme eşdeğer olduğuna göre, kütleçekiminin etkisini hissediyorsanız ivmeleniyor olmanız gerekir.* Einstein sadece, kütleçekimi kuvveti de dahil olmak üzere hiçbir kuvvet hissetmeyen gözlemcilerin ivmelenmediklerini söylemekte haklı olacaklarını öne sürdü. Böyle kuvvetten bağımsız gözlemciler hareketi ince-

lemek için gerçek referans noktaları oluşturur; işte bu kavrayış da böyle şeyler hakkındaki normal düşünüş biçimimizde çok temel bir değişiklik gerektirir. Pencereden havası boşaltılmış bir yere atlayan Barney'nin normalde yere doğru ivmelenerek indiğini söyleriz. Ama bu, Einstein'ın kabul edeceği bir tanım değildir. Einstein'a göre, Barney *ivmelenmemektedir*. Hiçbir kuvvet *hissetmez*. *Ağırlıksızdır*. Boş uzayın karanlığında yüzüyor- muş gibi hisseder. Bütün hareketlerin karşılaştırılacağı standardı *Barney* oluşturmaktadır. Bu karşılaştırmaya göre, şu anda evinizde bu kitabı okurken *siz de* ivmeleniyorsunuz demektir. Barney düşerken pencerenizin önünden geçer ve onun bakış açısına göre -ki Einstein'a göre hareket için gerçek referans noktası budur- siz, Dünya ve normalde durağan olduğunu düşündüğümüz her *şey yukarı doğru ivmelenmektedir*. Yani Einstein, elmanın Newton'un kafasına düşmediğini, Newton'un yükselerek elmaya çarptığını öne sürerdi.

Bunun hareket konusunda tamamen farklı bir düşünme biçimi olduğu açıktır. En basit algıyla, kütleçekiminin etkisini ancak ona direnirseniz hissadersiniz. Ama kendinizi tümüyle kütleçekimine bırakırsanız, onu hissetmezsiniz. Başka hiçbir etkiye (örneğin havanın direncine) maruz kalmadığınızı varsayarsak, kütleçekimine teslim olur ve kendinizi serbest düşmeye bırakırsanız, boş uzayda yüzüyor olsaydınız hissedeceğiniz gibi hissadersiniz. Bu durumda sizin bakış açınız, hiç duraksamadan, ivmelenmeyen bir kimsenin bakış açısı olarak değerlendirilir.

Toparlayacak olursak, ister uzayın derinliklerinde olsunlar ister birazdan yere çarpacak şekilde serbest düşme hareketi yapıyor olsunlar, yalnızca serbest olarak yüzmekte olan bireyler hiçbir ivme yaşamadıklarını söylemekte haklıdır. Eğer böyle bir gözlemcinin yanından geçerseniz ve sizinle onun arasında göreli bir ivmelenme varsa, o zaman Einstein'a göre *siz* ivmeleniyorsunuz demektir.

Gerçekten de ne Itchy, ne Scratchy, ne Apu, ne Martin düello sırasında ivmelenmediklerini öne sürebilir, çünkü tümü de kütleçekiminin kendilerini aşağıya doğru çektiğini hissetmektedir.

Bu, önceki tartışmamızı etkilemez çünkü orada sadece yatay hareketle, yani tüm katılımcıların hissettiği düşey kütleçekiminden etkilenmeyen hareketle ilgilenmiştik. Ama önemli bir ilke olarak tekrar belirtelim, Einstein'ın kütleçekimi ile ivme arasında bulunduğu bağ, ancak *hiçbir* kuvvet hissetmeyen gözlemcileri duran kabul edebileceğimiz anlamına gelir.

Kütleçekimi ile ivme arasında bağ kuran Einstein, artık Newton'un cevapsız bıraktığı soruyu ele almaya ve kütleçekimin etkisini nasıl uyguladığını araştırmaya hazırды.

Yamulmalar, Eğriler ve Kütleçekimi

Einstein özel görelilikle, her gözlemcinin uzay-zamanı, zamanda ardışık olarak birbirini izleyen anlarda uzayın tümü olarak kabul ettikleri paralel dilimlere böldüğünü gösterdi. Ama burada beklenmedik bir değişiklik vardı: Birbirlerine göre sabit hızla hareket eden gözlemciler uzay-zamanı farklı açılarla keseceklerdi. Eğer böyle gözlemcilerden biri ivmelenmeye başlarsa, hızındaki ve/veya hareket yönündeki anlık değişmelerin, kestiği dilimlerin açılarının ve yönelişlerinin değişmesiyle sonuçlanacağını tahmin edebilirsiniz. Olan, kabaca budur. Carl Friedrich Gauss'un, Bernhard Riemann'ın ve diğer ondokuzuncu yüzyıl matematikçilerinin öne sürdüğü görüşlerden yararlanan Einstein, uzay-zaman somununun farklı açılarda kesilmiş dilimlerinin, git gide *eğri* dilimlere dönüştüğünü ama bunların, Şekil 3.8'de şematik olarak gösterildiği biçimde, tıpkı iç içe geçmiş kaşıklar gibi birbirlerine tam olarak uyduğunu gösterdi. *Yani ivmelenen bir gözlemcinin keseceği uzay dilimleri yamulmuş olacaktır.*

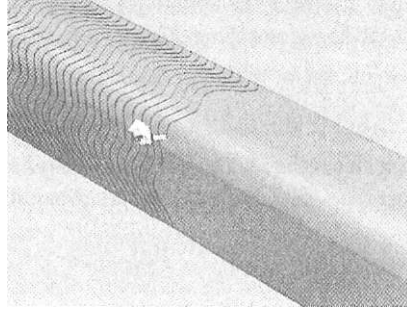
Einstein, bu kavrayışla, eşdeğerlik ilkesinden çok etkili bir biçimde faydalanmış oluyordu. Kütleçekimi ve ivme eşdeğerli olduklarından, Einstein kütleçekiminin uzay-zamanın dokusundaki yamulmalardan ve eğrilmelerden başka bir şey olamayacağını anladı. Şimdi bunun ne anlama geldiğini görelim.

Eğer düzgün bir ahşap yüzey üzerinde bir bilye yuvarlarsanız, bilye doğru bir çizgi üzerinde yol alır. Ama eğer odayı bir süre önce su basmış ve zemin kururken bazı yerleri yamulmuş

ve eğrilmişse bilye artık aynı yolu izlemeyecektir. Yüzeydeki yamulmaları ve eğrilmeleri izleyerek farklı yönlere gidecektir. Einstein işte bu basit fikri evrenin dokusuna uyguladı. Madde ve enerjinin olmadığı bir durumda -yani Güneş'in, Dünya'nın ve yıldızların olmadığı durumda- uzay-zamanda yamulmalar ve eğriler (nasıl düzgün bir ahşap yüzeyde de yoksa) yoktur. O koşulda uzay-zaman düzdür. Bu durum uzayın bir dilimi üzerine odaklandığımız Şekil 3.9a'da şematik olarak gösterilmiştir. Elbette uzay aslında üç boyutludur, dolayısıyla Şekil 3.9b'deki gösterim daha doğrudur, ama iki boyutlu çizimleri anlamak daha kolay olduğundan bunları kullanmayı sürdüreceğiz. Einstein'ın madde ve enerjinin uzayda, su basmasının ahşap zemin üzerinde yarattığı etkiye benzer bir etki yarattığını düşündü. Madde ve enerji, örneğin Güneş, Şekil 3.10a ve 3.10b'de gösterildiği gibi uzayın (ve uzay-zamanın*) yamulmasına ve eğrilmesine neden olur. Einstein, yamulmuş ahşap yüzeyde eğri bir yol izleyerek yuvarlanan bilye gibi, yamulmuş uzayda hareket eden bütün cisimlerin -örneğin Güneş'in yakınlarında hareket eden Dünya'nın- Şekil 3.11a ve 3.11b'de gösterildiği gibi eğri bir yol izleyeceğini gösterdi.

Sanki madde ve enerji, uzay-zamanın dokusunun görünmez eliyle, cisimleri yönlendirdiği, kanallardan ve vadilerden oluşan bir ağ oluşturuyor gibidir. Einstein'a göre, kütleçekimi etkisini işte böyle göstermektedir. Aynı şey yakın çevremizde de olur: Şu anda vücudunuz, Dünya'nın uzay-zamanın dokusunda neden olduğu bir girintiye doğru kaymak istiyor. Ama hareketiniz, üzerinde durduğunuz ya da oturduğunuz yüzey tarafından engelleniyor. Yaşamınızın her anında hissettiğiniz o yukarı doğru itme -yürürken olsun, odanızda dururken olsun, koltuğunuz-

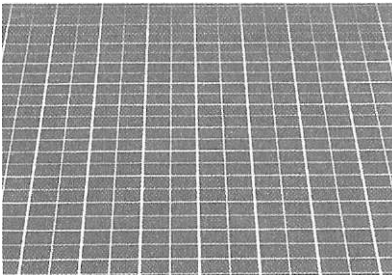
*Bükülmüş uzayı resimlemek görece kolaydır, ama uzayla yakın ilişkisi nedeniyle madde ve enerji zamanı da bükür. Nasıl uzayın yamulması Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, uzayın uzaması veya büzüşmesi anlamına geliyorsa, zamanın yamulması da zamanın uzaması veya sıkışması anlamına gelir. Yani Farklı kütleçekimlerinin etkisi altındaki saatler (diyalim ki biri Güneş'te, diğeri uzayın derinliklerinde) farklı hızlarda çalışır. Gerçekte, sıradan cisimlerin, örneğin Güneş'in ve Dünya'nın (kara deliklerin tersine) uzayda neden olduğu yamulmanın, zamanda neden oldukları yamulmanın yanında çok daha zayıf olduğu anlaşılmıştır.¹⁵



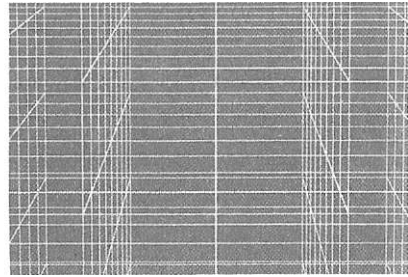
Şekil 3.8 Genel göreliliğe göre, uzay-zaman somuna, (birbirlerine göre hareketli olan gözlemciler tarafından) belli anlarda ve farklı açılarda uzay dilimlerine bölünmekle kalmayacak, dilimlerin kendileri de madde ve enerjinin varlığı nedeniyle yamulup eğilecektir.

da oturur ya da yatağınızda yatarken olsun- uzay-zamandaki bir vadiden kaymanızı engellemeye yarıyor. Bir trampolenden atladığınızda, vücudunuzun uzay-zamandaki kanallardan biri boyunca serbestçe hareket etmesine izin vererek kütleçekimine teslim oluyorsunuz demektir.

Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 şematik olarak Einstein'ın zaferle sonuçlanan on yıllık mücadelesini gösteriyor. Einstein'ın o yıllar boyunca yaptığı çalışmaların büyük bir kısmı, belli miktardaki madde ve enerjinin neden olacağı yamulmanın biçimini ve büyüklüğünü tam olarak belirlemeye yönelikti. Gördüğünüz şekillerin temelinde Einstein'ın bulduğu matematiksel sonuç yatmaktadır ve bu matematiksel sonuç *Einstein Alan Denklemleri* adı verilen denklemlerde somutlaşır. Bu addan da anlaşıldı-



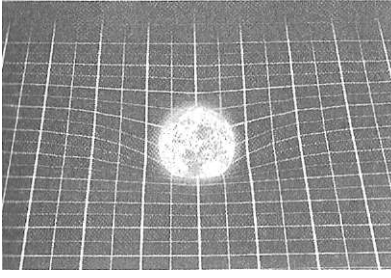
(a)



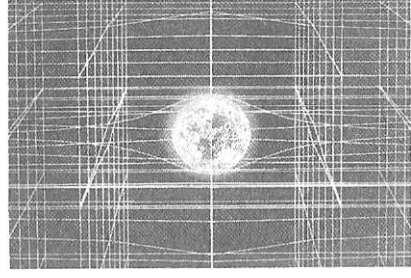
(b)

Şekil 3.9 (a) Düz uzay (ikiboyutlu)

(b) Düz uzay (üçboyutlu)



(a)



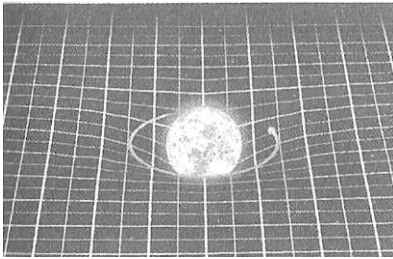
(b)

Şekil 3.10 (a) Güneş'in uzayı yamultması (ikiboyutlu) (b) Güneş'in uzayı yamultması (üçboyutlu)

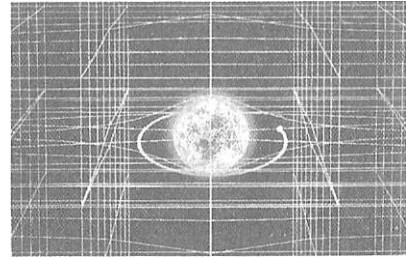
ğı gibi, Einstein uzay-zamanın yamulmasına bir kütleçekimi alanının kanıtı -yani geometrik olarak somutlaşması- olarak bakıyordu. Einstein problemi geometrik olarak tanımlayarak, Maxwell denklemlerinin elektromanyetizma için yaptığını kütleçekimi için yapan denklemler bulmayı başarmıştı."

Einstein ve başkaları bu denklemleri kullanarak, şu ya da bu gezegenin, hatta uzak bir yıldızdan yayılan ışığın eğrilmiş uzay-zamanda hareket ederken izleyeceği yol hakkında öngörülerde bulunabildiler. Bu öngörüler büyük bir kesinlikle doğrulanmakla kalmadı, Newton'un kuramının öngörülerıyla karşılaştırıldığında Einstein'ın kuramının özellikle detaylarda gerçeğe tutarlı bir biçimde uyduğu anlaşıldı.

Kütleçekiminin etkisini hangi mekanizmayla gösterdiğini ayrıntılı olarak betimlediği için, genel göreliliğin kütleçekiminin et-



(a)



(b)

Şekil 3.11 Dünya, Güneş'in varlığının uzay-zamanın dokusunda neden olduğu eğrileri izlediği için Güneş'in çevresinde yörüngede kalır, (a) ikiboyutlu (b) Üçboyutlu

kişini ne kadar hızlı ilettiğini belirlemek üzere matematiksel bir çerçeve oluşturmaları da aynı derecede önemlidir.

Kütleçekiminin iletilmesinin hızı, uzayın şeklinin zaman içinde ne kadar hızlı değişebileceği sorusuna gelip dayanır. Yani, yamulmalar ve dalgacıklar -durgun bir havuza atılan bir çakıl taşının yarattığı dalgacıklara benzer- uzayda bir yerden bir yere ne kadar hızlı yayılabilir? Einstein bunu hesaplamayı başardı, ulaştığı sonuç son derece sevindiriciydi. Einstein, yamulmanın ve dalgacıkların -yani kütleçekiminin- Newton'un kütleçekimi hesaplarında olduğu gibi bir yerden bir yere anında yayılmadığını buldu. Bu yamulmalar ve dalgacıklar *tam olarak ışıık hızıyla yayılır*. Ne biraz daha az, ne biraz daha fazla; tam olarak özel göreliliğin koyduğu hız sınırına uyan bir hızda yayılırlar. Eğer dünya dışı yaratıklar Ay'ı yörüngesinden çıkarsaydı, sular birbuçuk saniye sonra çekilmeye başlayacaktı, tam da bizim Ay'ın kaybolduğunu göreceğimiz anda. Newton'un kuramının başarısız olduğu yerde Einstein'ın genel göreliliği üstün geliyordu.

Genel Görelilik ve Kova

Genel görelilik bize matematiksel olarak zarif, kavramsal olarak güçlü ve ilk kez tümüyle tutarlı bir kütleçekimi kuramı kazandırmanın ötesinde, uzay ve zamana bakışımızı da tamamen yeniden biçimlendirmiştir. Hem Newton'un görüşüne, hem de özel göreliliğe göre uzay ve zaman, evrendeki olaylar için değişmeyen bir sahne oluşturmaktaydı. Her ne kadar kozmosu ardışık anlarda uzay dilimlerine bölmek özel göreliliğe Newton'un zamanında akla bile gelmeyecek bir esneklik veriyorsa da, uzay ve zaman evrende olup bitenlere tepki vermez. Uzay-zaman (ya da hep dediğimiz gibi somun) artık verili kabul edilmektedir. Genel görelilikte bunlar değişir. Uzay ve zaman, evrilmekte olan evrendeki oyuncular haline gelir, canlanırlar. Buradaki madde oradaki uzayın yamulmasına neden olur, bu yamulma oradaki maddenin hareket etmesine, bu da daha uzaktaki uzayın daha fazla yamulmasına neden olur vb. Genel görelilik uza-

yın, zamanın, maddenin ve enerjinin iç içe geçmiş kozmik dansının koreografisini yapar.

Bu çok çarpıcı bir gelişmedir. Ama şimdi, asıl konumuza geri dönmeliyiz: Kovaya ne olur? Genel görelilik, Einstein'ın umduğu gibi, Mach'ın görelilikçi fikirleri için gereken fizik temelini oluşturur mu?

Yıllar içinde bu soru çok tartışma yarattı. Einstein başlangıçta genel göreliliğin, Mach'ın bakış açısını -ki Einstein çok önemli bulduğu bu bakış açısına *Mach ilkesi* adını vermişti- tamamıyla içerdiğini düşünmüştü. Nitekim 1913'te genel göreliliğin son parçalarını yerli yerine koymak için yoğun bir şekilde çalışırken, Mach'a, genel göreliliğin Mach'ın Newton'un kova deneyi ile ilgili analizini nasıl doğrulayacağını heyecanla anlattığı bir mektup yazmıştı.¹⁷ 1918'de, genel göreliliğin ardındaki üç temel teleri sıraladığı bir makale yazdığında da listedeki üçüncü fikir Mach ilkesiydi. Ama genel göreliliğin anlaşılması zordur ve bazı özelliklerinin tam olarak değerlendirilmesi, aralarında Einstein'ın da olduğu fizikçilerin yıllarını almıştır. Bu özellikler daha iyi anlaşıldıkça, Einstein Mach ilkesinin genel görelilikle birleştirilmesinin giderek zorlaştığını anlamaya başlamıştı. Mach'ın fikirleri Einstein için yavaş yavaş hayal kırıklığına dönüşmüş ve ömrünün ileriki yıllarında bu fikirleri terk etmiştir.¹⁸

Daha sonra devam eden yarım yüzyıllık araştırmalar sayesinde ve bugünden geriye bakınca, genel göreliliğin Mach'ın akıl yürütmesine ne derece uyduğunu tekrar gözden geçirebiliriz. Her ne kadar bu konuda hâlâ bazı tartışmalar varsa da, sanırım en doğru ifade şu: Genel görelilik bazı bakımlardan belirgin bir Machçı niteliğe sahip, ama Mach'ın savunduğu tamamen görelilikçi bakış açısına uymuyor. Şunu demek istiyorum:

Mach, dönmekte olan suyun yüzeyinin içbükey olmasının, kollarınızın dışarıya doğru savrulduğunu hissetmenizin, iki taşı birbirine bağlayan ipin gerilmesinin varsayımsal -ve Mach'a göre tamamen hatalı- bir mutlak uzay (bugünkü anlayışımıza göre mutlak uzay-zaman) kavramıyla ilgisi olmadığını ileri sürmüştü.¹⁹ Mach, bütün bunların, kozmosa dağılmış bütün maddeye

göre ivmeli hareketin kanıtı olduğunu söylüyordu. Madde olmasaydı ivme kavramı olmayacaktı ve yukarıda sıralanan fiziksel etkilerin (suyun yüzeyinin içbükey olması, kolların dışarı doğru savrulması, ipin gerilmesi) hiçbirisi gözlenmeyecekti.

Peki genel görelilik bu konuda ne diyor?

Genel göreliliğe göre, bütün hareketlerin ve özellikle ivmeli hareketin referans sistemi, serbest düşme halindeki -kütleçekimine tümüyle teslim olmuş ve üzerlerine başka herhangi bir kuvvet etkimeyen- gözlemcilerdir. Şu önemli bir noktadır: Serbestçe düşmekte olan gözlemcinin maruz kaldığı kütleçekimi kuvveti, kozmosa dağılmış haldeki bütün maddeden (ve enerjiden) kaynaklanır. Dünya, Ay, uzak gezegenler, yıldızlar, gaz bulutları, kuazarlar ve galaksiler; hepsi, şu anda oturmakta olduğunuz yerdeki kütleçekimi alanına (geometri dilinde uzay-zamanın eğriliğine) katkıda bulunur. Daha büyük kütleli ve daha yakındaki şeyler daha büyük kütleçekimi etkisi uygular, amayine de hissettiğiniz kütleçekimi alanı tüm maddenin toplam etkisini temsil eder."" Kendinizi kütleçekiminin etkisine bırakıp da serbest düşme hareketi yapacak olsaydınız -bu durumda başka bir cismin ivmelenip ivmelenmediğine karar verilebilmesi için gereken referans noktası siz olurdunuz- izleyeceğiniz yol kozmostaki bütün madde, gökteki yıldızlar ve komşunuzun evi tarafından *etkilenirdi*. İşte bu nedenle, genel görelilikte bir cismin ivmelenmediği söylendiği zaman, o cisim evrene dağılmış maddenin belirlediği referans sistemine göre ivmeleniyor demektir. Bu sonuç, Mach'ın savunduğu fikirleri andırmaktadır. Dolayısı ile, bu anlamda genel görelilik Mach'ın düşüncelerinden bazılarını içerir.

Yine de, genel görelilik Mach'ın fikirlerinin tümüne uymaz. Bunu, bir kez daha, bomboş bir evrende dönmekte olan kova örneğinde doğrudan görebiliriz. Boş ve değişmeyen bir evrende -yıldızlar yok, gezegenler yok, hiçbir şey yok- kütleçekimi yoktur.²¹ Kütleçekimi olmadan da uzay yamulmaz -Şekil 3.9b'de gösterilen basit, hiçbir eğriliğin olmadığı bir halde olur- bu da özel göreliliğin basit yapısına geri döndüğümüz anlamına gelir. (Einstein'ın özel göreliliği geliştirirken kütleçekimini gözardı et-

tiğini unutmayın. Genel görelilik bu eksikliği kütleçekimini işin içine katarak telafi eder, ama evren boş ve değişmez olduğunda kütleçekimi de yoktur ve bu durumda genel görelilik özel göreliliğe dönüşür.) Kovayı şimdi bu boş evrene koyarsak, kütlesi çok küçük olduğundan varlığı uzayın şeklini hiç etkilemez. Bu nedenle daha önce ele aldığımız özel görelilik ve kova tartışması, genel görelilik için de aynen geçerli olur. Mach'ın öngörüsünün tersine, genel görelilik de özel görelilikle aynı cevabı verir ve bomboş bir evrende bile, dönmekte olan kovanın iç yüzüne doğru bastırıldığınızı *bissedeceğimizi*, bomboş bir evrende, kendi çevrenizde döndüğünüzde kollarınızın dışarıya doğru savrulduğunu *bissedeceğimizi*, bomboş bir evrende, dönmekte olan iki taşı birbirine bağlayan ipin *gerileceğini* söyler. Buradan, genel görelilikte bile boş uzay-zamanın ivmeli hareket için bir referans sistemi sağladığı sonucunu çıkarırız.

Bu nedenle, her ne kadar genel görelilik Mach'ın düşüncesindeki bazı öğeleri işin içine katıyorsa da, Mach'ın savunduğu, hareketin tümüyle göreliliği olduğu fikriyle uyumsuzdur.²² Mach'ın ilkesi, devrim niteliğinde bir keşfi esinleyen ama o keşfin, kendisine esin kaynağı olan fikri tamamen içermediği kışkırtıcı fikirlerle iyi bir örnektir.

Üçüncü Binyılda Uzay-Zaman

Dönen kovanın geçmişi oldukça eskidir. Newton'un mutlak uzay ve mutlak zamanından, Leibniz'in ve Mach'ın görelilikçi düşüncelerine, Einstein'ın özel görelilikle uzay ve zamanın göreliliği olduğunu, ama bir araya geldiklerinde mutlak uzay-zamanı oluşturduklarını fark edişine ve daha sonra genel görelilikle uzay-zamanın sürekli evrilen kozmosta dinamik bir oyuncu olduğunu keşfedişine kadar, kova hep oradaydı. Aklın gerisinde fırl fırl dönerek, uzayın görünmez, soyut ve elle tutulamaz özünün -daha genel olarak uzay-zamanın- hareket için sağlam bir referans sistemi oluşturup oluşturmadığını ölçen, basit ve sessiz bir sınav oluştuyordu. Karar? Her ne kadar bu konu hâlâ tartışılmakta ise de, gördüğümüz gibi, Einstein ve genel göreliliğin

en basit yorumu, uzay-zamanın böylesi bir referans noktası sağladığı yolundadır: Yani *uzay-zaman bir şeydir*.²³

Ancak bu sonucun, daha genel bir biçimde tanımlanan bir görelilikçi bakışın destekçileri tarafından da sevinçle karşılandığını gözden kaçırmamak gerekir. Newton'un ve ardından özel göreliliğin bakış açısına göre, önce uzay sonradan da uzay-zaman, ivmeli hareketi tanımlamak için bir referans sistemi sağlayan varlıklar olarak kullanılmıştır. Bu bakış açılarına göre uzay ve uzay-zaman kesinlikle değişmez olduğu için, bu ivme kavramı da mutlaktır. Ama genel görelilikte uzay-zamanın karakteri tümüyle farklıdır. Genel görelilikte uzay ve zaman dinamiktir: Değişebilirler. Kütle ve enerjinin varlığına tepki verirler: Mutlak değildirler. Uzay-zaman ve özellikle de uzay-zamanın yamulması ve eğrilmesi, kütleçekimi alanının somutlaşmasıdır. Bu nedenle, genel görelilikte uzay-zamana göre ivme, önceki kuramlar tarafından kullanılan mutlak kavramdan çok uzaktır. Tam tersine, Einstein'ın ölmeden birkaç yıl önce kanıtladığı gibi,²⁴ genel göreliliğin uzay-zamanına göre ivme görelilikçidir. Burada bahsedilen maddesel cisimlere, örneğin taşlara ya da yıldızlara göre ivme değil, ama bir o kadar gerçek, elle tutulur ve değişebilir bir şeye göre ivme: Bir alana, kütleçekimi alanına göre.* Bu anlamda, genel görelilikte uzay-zaman -kütleçekiminin somutlaşmış hali olarak- öylesine gerçektir ki, oluşturduğu referans sistemini çoğu görelilikçi rahatlıkla kabul edebilir.

Bu bölümde ele alınan konular üzerindeki tartışma, biz uzayın, zamanın ve uzay-zamanın gerçekte ne olduğunu anlamaya çalıştığımız sürece hiç kuşkusuz devam edecektir. Kuantum mekaniğinin gelişmesiyle işler biraz daha karmaşık hale gelmiştir. Kuantum belirsizliği sahneye çıktığında, boş uzay ve hiçlik kavramları yepyeni anlamlar kazanır. Nitekim, Einstein'ın esir kavramını yok ettiği 1905'ten sonra uzayın görülemeyen maddelerle dolu olduğu fikri geri döndü. İlerideki bölümlerde göreceği-

* Özel görelilikte de -genel göreliliğin, kütleçekimi alanının sıfır olduğu özel hali- bu fikir aynen geçerlidir: Sıfır kütleçekimi alanı hâlâ bir alandır, ölçülebilir ve değiştirilebilir. Böylece de ivmenin kendisine göre tanımlanabileceği "bir şey" oluşturur.

iniz gibi, modern fizikteki önemli bazı gelişmelerle, esire benzeyen bir şeyin değişik türlerinin var olabileceği öne sürüldü. Bunların hiçbirisi esir gibi hareket için mutlak bir standart oluşturmuyor, ama hepsi de uzay-zamanın boş olmasının ne demek olduğunu cesur bir biçimde sorguluyor. Üstelik şimdi göreceğimiz gibi, şaşırtıcı kuantum bağlantıları, klasik bir evrende uzayın -bir cismi diğerinden ayıran ortam olarak, bir cismin diğer bir cisimden ayrık ve bağımsız olduğunu kesin bir biçimde söyleyebilmemizi sağlayan ortam olarak uzayın- oynadığı *en temel* role meydan okuyor.

IV. Bölüm

Dolanık Uzay

Bir Kuantum Evreninde
Ayrık Olmak Ne Anlama Gelir?

Özel ve genel göreliliği kabul etmek, Newton'un mutlak uzay ve mutlak zamanından vazgeçmek demektir. Kolay olmasa da zihninizi bunu yapmak üzere eğitebilirsiniz. Her hareket ettiğinizde sizin şimdinizin, sizinle birlikte hareket etmeyenlerin *şimdilerinden* farklı hale geldiğini hayal edin. Bir otoyolda otomobil kullanırken saatinizin, yanlarından hızla geçip geçtiğiniz evlerdeki saatlerden daha farklı bir hızda çalıştığını hissettiniz. Bir dağın tepesinden çevreye bakarken, dağın eteğinde kütleçekimi kuvvetini daha kuvvetli hissedene oranla zamanın sizin için uzay-zamanın yamulması nedeniyle daha hızlı geçtiğini hayal edin. "Hayal edin" diyorum, çünkü böyle sıradan durumlarda göreliliğin etkileri o kadar küçüktür ki hiç fark edilmezler. Bu nedenle, gündelik deneyimlerimiz, evrenin gerçekten nasıl işlediğini göstermez. Einstein'dan yüz yıl sonra hâlâ hiç kimsenin, hatta profesyonel fizikçilerin bile göre-

liliği iliklerinde hissetmemesinin nedeni budur. Bu, hiç de şaşırtıcı değil; göreliliği tam olarak kavramanın insana getirdiği "hayatta kalma" avantajının ne olduğunu anlamak zordur. Gündelik hayatta bizi etkileyen orta derecedeki kütleçekimi ve şahit olduğumuz düşük hızlarda, Newton'un aslında hatalı olan mutlak uzay ve mutlak zaman kavramları son derece mükemmel sonuçlar verir; o nedenle de duyularımız, görelilikçi bir kavrayış geliştirmek üzere evrimsel bir baskı altında değildir. Dolayısıyla da göreliliğin tam olarak farkına varmak ve gerçekten kavrayabilmek için çaba gösterip duyularımızın bıraktığı boşluğu zekâmızla doldurmamız gerekir.

Görelilik evrene ilişkin geleneksel fikirlerimizden çok büyük bir kopuşu temsil ederken, 1900 ve 1930 yılları arasında bir başka devrim de fiziğin altını üstüne getiriyordu. Bu devrim yirminci yüzyılın başında birini Max Planck'ın, diğerini Einstein'ın yazdığı ışınımın özelliklerine ilişkin iki makale ile başlamıştı. İşte bu makaleler yoğun araştırma ile geçen otuz yılın ardından *kuantum mekaniğinin* formüle edilmesine yol açtı. Etkileri uç hız ve kütleçekimi değerlerinde belirgin hale gelen görelilikte olduğu gibi, kuantum mekaniğinin yeni fiziği de kendisini ancak bir başka uç durumda cömertçe ortaya koyuyordu: Çok çok küçük şeylerin dünyasında. Ama göreliliğin yol açtığı altüst oluşla kuantum mekaniğinin yol açtığı altüst oluş arasında keskin bir ayırım vardır. Göreliliğin garip olmasının nedeni, her birimizin kişisel uzay ve zaman deneyimlerinin başkalarının deneyimlerinden farklı olmasıdır. Bu, karşılaştırmadan doğan bir garipliktir. Gerçekliğe bakışımızın pek çok başka bakış açısından -aslında sonsuz sayıdaki bakış açısından- yalnızca biri olduğunu, tüm bu bakışların da uzay-zamanın kesintisiz bütününde birbirlerine uyduğunu kabul etmek zorunda kalırız.

Kuantum mekaniği farklıdır. Garipliği bir karşılaştırma yapmadan da ortadadır. Kuantum mekaniğine dair bir sezgiye sahip olmak için zihninizi eğitmeniz daha zordur, çünkü kuantum mekaniği kendi kişisel, bireysel gerçeklik kavramımızı paramparça eder.

Kuantuma Göre Dünya

Her çağ, evrenin nasıl oluştuğuna veya yapılandığına ilişkin kendi öykülerini yani metaforlarını geliştirir. Eski bir Hint yaratılış efsanesine göre evren, tanrılar Purusa adlı tarih öncesi devi parçaladıkları zaman yaratılmıştır; devin başı gökyüzü, ayakları yeryüzü, nefesi de rüzgâr olmuştur. Aristoteles'e göre evren eşmerkezli ellibeş kristal küreden oluşmaktaydı; en dıştaki küre gökyüzünü temsil ediyor, gezegenleri, Dünyayı ve onun öğelerini, son olarak da cehennemi temsil eden yedi küreyi sarmalıyordu.¹ Newton la ve onun hareketi matematiksel olarak kesin ve belirlenimci bir biçimde formüle etmesi sonucunda, tanım yeniden değişti. Evren çok büyük bir mekanik saate benzetildi: Zembereği kurulup başlangıç ayarı yapılmış olan evren, bir andan diğerine tam bir düzenlilik ve öngörülebilirlikle tıkr tıkr ilerliyordu.

Özel ve genel görelilik, mekanik saat benzetmesinde zor kavranılır bazı noktalara dikkat çekti: Tek ve evrensel bir saat yoktur, bir dakikayı ve şimdiyi neyin oluşturduğu konusunda fikir birliği yoktur. Bu durumda bile hâlâ evrimleşen evren hakkında "bir mekanik saat" öyküsü anlatabilirsiniz. Saat sizin saatinizdir. Öykü sizin öykünüzdür. Ama evren, Newtoncu çerçevede olduğu gibi, gene aynı düzenlilik ve öngörülebilirlikle evrimleşir. Eğer bir şekilde, evrenin şu andaki durumunu biliyorsanız -yani *her* parçacığın nerede olduğunu, hangi hızla ve hangi doğrultuda hareket ettiğini biliyorsanız- o zaman, Newton da Einstein da prensipte fizik yasalarını kullanarak evrendeki her şeyin gelecekte herhangi bir zamanda nasıl olacağını öngörebileceğiniz ve geçmişte herhangi bir zamanda nasıl olduğunu anlayabileceğiniz üzerinde anlaşır.²

Kuantum mekaniği bu gelenekten ayrılır. Tek bir parçacığın bile konumunu ve doğrusal hızını tam olarak asla *bilemeyiz*. Bırakın bütün kozmosun evrimini, deneylerin en basitinin bile sonucunu tam bir kesinlikle *tahmin edemeyiz*. Kuantum mekaniği, ancak bir deneyin şu veya bu sonucu verme *olasılığını* tahmin edebileceğimizi gösterir. Kuantum mekaniği on yıllar içinde son

derece duyarlı deneylerle kanıtlandıkça, Newton'un kozmik saati hatta bu saatin Einstein tarafından güncelleştirilmiş hali bile sağlam bir benzetme olmaktan çıkmıştır ve açık bir şekilde evrenin *nasıl işlemediğini* göstermektedir.

Ama gelenekten kopuş henüz tamamlanmamıştır. Her ne kadar Newton'un ve Einstein'ın kuramları uzayın ve zamanın doğası konularında birbirlerinden keskin bir şekilde farklı olsa da, bazı temel gerçeklerde ve kanıt gerektirmiyor gibi görünen bazı doğrularda fikir birliği içindedirler. Eğer iki cismin arasında uzay varsa -yani havada iki kuş varsa ve biri epey uzakta sağınızda, diğeri ise epey uzakta solunuzdaysa- bu iki şeyin birbirinden bağımsız olduğunu kabul edebiliriz ve ediyoruz. Bunları birbirlerinden ayırık, farklı varlıklar olarak ele alırız. Temelde ne olursa olsun uzay, bir cismi diğerdan ayıran, ayırt edilmesini mümkün kılan ortamı sağlar. Uzayın yaptığı budur. Uzayda farklı konumlarda olan şeyler, farklı şeylerdir. Dahası, bir cismin diğerdan bir cismi etkileyebilmesi için ikisini ayıran uzayı bir şekilde aşması gerekir. Bir kuş uçarak diğerdan kuşla arasındaki uzayı kat edip diğerdan gagalayabilir. Bir kimse, kuşa sapanla bir taş atıp taşın kuşla arasındaki uzayı kat etmesini sağlayabilir ya da yüksek sesle bağırıp çarpışan hava moleküllerinin domino etkisiyle başka bir kişinin kulak zarını titreştirmesini sağlayabilir. Başka düzeyde bir örnek verecek olursak, bir kişi diğerdan bir kişinin üzerinde bir lazer demeti göndererek, yani aradaki uzayı bir elektromanyetik dalganın aşmasıyla, bir etki uygulayabilir ya da daha hırslı biriye (geçen bölümdeki şakacı uzaylılar gibi) bir noktadan diğerdan kütleçekimsel etkiler göndererek büyük kütleli bir cismi (örneğin Ay'ı) sallayabilir ya da yerini değiştirebilir. Yani buradan, olduğumuz yerden, oradaki birini etkileyebiliriz, ama bunu nasıl yaparsak yapalım daima bir kişinin veya bir şeyin buradan oraya gitmesi gerekir ve ancak o kişi veya şey buradan oraya gittiğinde bir etki uygulanabilir.

Fizikçiler evrenin bu özelliğine, yalnızca hemen yanınızdaki, yani yerel noktaları doğrudan etkileyebileceğinizi vurgulamak üzere *yerellik* adını verir. Ama örneğin vudu büyülerini, yerelli-

ği aykırıdır, çünkü o durumda burada yaptığınız bir şeyle (buradan oraya herhangi bir şey göndermeden) oradaki bir şeyi etkileyebilirsiniz. Ama ortak deneyimlerimiz, bize doğrulanabilir ve tekrarlanabilir deneylerin yerelliğe uyacağını söyler.³ Ve çoğu da uyar.

Ama son yirmi yirmi beş yılda yapılan bazı deneyler, burada yaptığımız bir şeyin (bir parçacığın belli özelliklerini ölçmek gibi) buradan oraya bir şey *göndermeksizin*, orada olan bir şeyle (uzaktaki bir başka parçacığın özelliklerinin ölçülmesinin sonucu gibi) kolayca fark edilmeyecek bir biçimde bağlantılı *olabileceğini* göstermiştir. Sezgisel olarak şaşırtıcı olsa da, bu olgu kuantum mekaniği yasalarına tamamen uyar; bu deneyin yapılmasını sağlayacak teknolojinin ortaya çıkmasından ve daha da önemlisi yapılan öngörünün doğru olduğunun gözlenmesinden çok daha önce kuantum mekaniği kullanılarak öngörülmüştür. Bu, insana vudu büyüsü gibi geliyor. Kuantum mekaniğinin böyle bir özelliği olabileceğini fark eden ilk fizikçilerden olan -ve bunu eleştiren- Einstein, buna "ürkütücü" demişti. Ama göreceğimiz gibi, bu deneylerin doğruladığı uzun mesafeli bağlantılar son derece zor fark edilebilir bağlantılardır ve bizim kontrol yeteneğimizin temelli dışındalardır.

Bununla birlikte, hem kuramsal hem de deneysel değerlendirmelerden elde edilen bu sonuçlar, evrenin yerel olmayan bağlantılara olanak verdiği fikrini kuvvetli bir biçimde desteklemektedir. Buradan oraya bir şey gitmese bile, hatta iki olay arasında ışık da dahil olmak üzere hiçbir şeyin gitmesi için yeterli zaman olmasa bile, burada olan bir şey orada olan bir şeyle bağlantılı olabilir. Bu, uzayın bir zamanlar düşünüldüğü gibi düşünülemediğini gösteriyor: İki cisim arasında ne kadar uzay bulunursa bulunsun (yani iki cisim birbirinden ne kadar uzak olursa olsun), kuantum mekaniği ikisinin arasında bir etkileşme, bir çeşit bağ olmasını mümkün kıldığından, bu iki cismin birbirinden ayrık olduğunun garantisi yoktur. Örneğin sizi ve beni oluşturan sayısız parçacıktan biri kaçabilir, ama saklanamaz. Kuantum kuramına ve onun öngörülerini doğrulayan birçok deneye

göre, iki parçacık arasında, evrenin iki ayrı ucunda olsalar bile, kuantum bağlantıları bulunabilir. Birbirlerinden trilyonlarca kilometre uzakta olsalar bile, aralarındaki bu bağ açısından üst üsteymiş gibidirler.

Gerçeklik kavramımıza modern fizikten çok sayıda saldırı geliyor; bunlardan çoğunu önümüzdeki bölümlerde göreceğiz. Ama deneysel olarak kanıtlanmış olanlar arasında benim neredeyse aklımı durduran, evrenimizin kendisinin yerel olmadığının anlaşılmasıdır.

Kırmızı ve Mavi

Kuantum mekaniğinden kaynaklanan yerel olmama durumunun ne tür bir şey olduğu konusunda fikir sahibi olmak için, Ajan Scully'nin çoktan hak ettiği tatili yapıp kafa dinlemek amacıyla ailesinin Provence'daki evine çekildiğini düşünün. Bavullarını açmaya bile zaman bulamadan telefon çalar. Ajan Mulder Amerika'dan aramaktadır.

"Kırmızı ve mavi paket kâğıtlarıyla sarılı kutuyu aldın mı?"

Posta kutusundan çıkan her şeyi kapının yanına yığmış olan Scully, yığına göz atar ve paketi görür. "Mulder, lütfen, onca yolu yeni dosyalarla uğraşmak için tepmedim."

"Hayır, hayır, paketi ben göndermedim. Bana da bir tane gelmiş. içinde 1 den 1000'e kadar numaralanmış şu küçük, ışıltılı, ışıltılı, ışıltılı titanyum kutulardan var; sana da aynı paketin gönderildiğini bildiren bir de mektup var."

"Ee, ne olmuş?" diye yavaşça yanıtlar Scully. Titanyum kutuların tatilini yarıda kesmesine neden olacağından korkmaya başlamıştır.

"Şey" diye devam eder Mulder, "mektupta her titanyum kutuda uzaydan gelen bir küre olduğu ve bu kürenin kutunun üzerindeki küçük kapak açıldığı anda kırmızı ya da mavi bir ışık çıkaracağı yazıyor."

"Mulder, etkilenmemi mi bekliyorsun?"

"Henüz değil, ama dinle. Mektupta, bütün kutuların içindeki kürelerin kutular açılmadan önce kırmızı ya da mavi ışık ver-

me yeteneğinin olduğu, kürelerin kırmızıya da mavi ışık vermeye kapak açıldığı anda *rasgele* karar verdiği yazıyor. Ama garip-lik şurada. Mektupta bir de, ker ne kadar sendeki kutular ben-dekilerle tam olarak aynı şekilde çalışıyorsa da -yani kutularımızın her birindeki küreler kırmızı ya da mavi ışık vermeyi *rasgele* seçiyor olsa bile- kutularımızın, bir şekilde birlikte çalıştığı yazılmış. Mektuba göre, arada gizemli bir bağlantı var; öyle ki, ben birinci kutumu açtığımda mavi ışık çıkarsa, sen birinci kutunu açtığımda da mavi ışık çıkacak; eğer ikinci kutumu açtığımda ben kırmızı ışık görürsem, sen de ikinci kutunu açtığımda kırmızı ışık göreceksin vb."

"Mulder, gerçekten çok yorgunum. Bu numaralar ben dönene kadar bekleyemez mi?"

"Scully, lütfen. Tatilde olduğunu biliyorum, ama bekleyemeyiz. Bunun doğru olup olmadığını beş dakikada anlayabiliriz."

Scully direnmenin boşuna olduğunu anlar ve isteksizce gidip küçük kutularını açar. Kutulardaki ışıkları karşılaştırdıklarında, mektupta sözü edilen uyumu görürler. Kutulardaki küreler mavi ya da kırmızı yanmaktadır, ama ikisi de üzerinde aynı numaranın olduğu kutuları açtıklarında hep aynı renk ışıkla karşılaşırlar. Uzaydan gelen bu küreler Mulder'ı heyecanlandırmıştır, ama Scully hiç heyecanlanmaz.

"Mulder, asıl *senin* tatile ihtiyacın var. Bu çok saçma. Açıkça görülüyor ki, kutularımızdaki kürelerin hepsi, içlerinde bulundukları kutuların kapakları açıldığında kırmızı ışık vermek üzere ya da mavi ışık vermek üzere programlanmış. Bu saçmalığı bize gönderen her kimse, kutularımızı *senin* ve benim aynı numaralı kutuları açtığımızda aynı renkleri göreceğimiz şekilde programlamış." der, Scully sertçe.

"Ama mektupta her kürenin kırmızı veya mavi ışığı kutusunun kapağı açıldığında *rasgele* seçtiği yazıyor; kürelerin iki ışıktan birini seçmek üzere önceden programlandığı *yazmıyor*."

"Mulder," diye içini çeker Scully, "benim açıklamam akla yatkın ve verilere de uyuyor. Daha ne istiyorsun? Bir de mektubun sonuna bak. İşte bu çok komik. "Uzaylıların" zor okunsun diye

iyice küçük harflerle yazdıkları bölümde, kürenin ışığının yanmasına sadece kutunun kapağını açmanın neden olmadığı, eğer nasıl çalıştığını anlamak için kutuyu kurcalarsak da -örneğin kutunun kapağını açmadan kürenin renk bileşimini veya kimyasal yapısını öğrenmeye çalışırsak- kürenin ışık vereceği yazılı. Başka bir deyişle, sözde rasgele kırmızıya da mavi ışık seçimini analiz etmeye çalışamayız, çünkü bu yapmaya çalıştığımız deneyi bozar. Bu benim aslında sarışın olduğumu, ama ne zaman sen ya da bir başkası saçlarıma baksaya da herhangi bir şekilde saçlarımı analiz etmeye kalksa saçlarımın kızıla dönüştüğünü söylememe benziyor. Yalan söylediğimi nasıl kanıtlayabilirsin? Senin küçük, yeşil adamlar bayağı zekiymiş, her şeyi hileleri ortaya çıkmayacak şekilde ayarlamışlar. Şimdi sen gidip kutularınla oyna, ben de biraz kafamı dinleyeyim."

Scully her şeyi bilimsel olarak sağlam bir biçimde toplamış gibi görünüyor. Ama bir de şu var: Kuantum mekaniği ile uğraşanlar -uzaylılar değil, bilim insanları- hemen hemen seksen yıldır evrenin, mektupta tanımlanan evrene nasıl bu kadar paralel bir şekilde işlediğine ilişkin iddialar ortaya atıyor. Sorun şurada ki, verilerin Mulder'inkine benzer bir bakış açısını -Scully'ninkine değil- desteklediği yolunda güçlü bilimsel kanıtlar var. Örneğin, kuantum mekaniğine göre bir parçacık, belirli bir özelliğe ya da diğerine sahip olma durumları arasında belirsizlikte kalabilir -içlerinde oldukları kutuların kapağı açılmadan önce kırmızı ya da mavi ışık verme olasılıkları arasında belirsizlikte olan "uzaydan gelmiş" küreler gibi- ve yalnızca ona bakıldığı zaman (yani ölçüldüğü zaman), rasgele bir şekilde belirli bir özelliğe ya da diğerine sahip olabilir. Sanki bu yeterince acayip değilmiş gibi, kuantum mekaniği bir de parçacıklar arasında, tıpkı uzaydan gelmiş küreler arasında olduğu öne sürülen bağlantılara benzer bağlantılar olabileceğini öngörür. İki parçacık kuantum etkileri nedeniyle birbirlerine öyle dolanabilirler ki, şu ya da bu özelliği rasgele seçmeleri bağıntılı olabilir: Yani nasıl küreler kırmızı ya da mavi ışık vermeyi rasgele seçiyorlarsa, ama aynı numaralı kutulardaki kürelerin verdiği ışıklar bir şekil-

de birbirleri ile bağlantılıysa (her ikisi de kırmızı ya da her ikisi de mavi), uzayda birbirlerinden çok uzak iki parçacığın rasgele seçtikleri özellikler de aynı şekilde birbirleri ile tamamen uyumlu olabilir. Kabaca söyleyecek olursak, iki parçacık birbirlerinden çok uzak olsa bile, kuantum mekaniği, bunlardan biri ne yaparsa diğerinin de aynı şeyi yapacağını gösteriyor.

Somut bir örnek verelim: Eğer gözünüzde güneş gözlüğü varsa, kuantum mekaniğine göre, örneğin denizden veya asfalt yoldan size doğru yansıyan belirli bir fotonun gözlüğünüzün parlamayı engelleyen, polarize camlarından geçme olasılığı % 50'dir. Foton cama çarptığı zaman ya geri yansımaya ya da gözlüğünüzün camından geçmeyi rasgele "seçer". Şaşırtıcı olan ise, böyle bir fotonun kilometrelerce uzakta, ters yönde hareket eden bir eş fotonu olabilecek olması ve başka bir polarize gözlük camından geçme olasılığı aynı şekilde % 50 olsa da, o fotonun da bir şekilde ilk foton ne yaparsa onu yapacak olmasıdır. *Her sonuç rasgele belirlense de, fotonlar uzayda birbirlerinden çok uzakta olsa da, eğer bir foton camdan geçerse diğeri de geçecektir.* Kuantum mekaniği tarafından öngörülen yerel olmama (dolanık olma) durumu işte budur.

Hiçbir zaman kuantum mekaniğinin büyük bir hayranı olmayan Einstein, evrenin böyle acayip kurallara göre işliyor olmasını kabul edemiyordu. Parçacıkların özniteliklerini ve ölçüldükleri zaman ortaya çıkan sonuçları rasgele seçmeleri kavramını içermeyen, çok daha klasik açıklamaları destekliyordu. Einstein, eğer birbirinden çok uzaktaki iki parçacığın belirli bazı öznitelikleri paylaştığı gözleniyorsa, bunun o parçacıkların özelliklerini anında bağıntılandırıran gizemli bir kuantum bağlantısının kanıtı olamayacağını öne sürüyordu. Tıpkı Scully'nin kürelerin renkleri rasgele seçmediğini, gözlendikleri zaman belirli renkte ışık vermek üzere programlanmış olduklarını iddia etmesi gibi, Einstein da parçacıkların özelliklerini rasgele seçmediğini, tersine uygun bir şekilde gözlendikleri zaman belirli ve kesin bir özellik sergilemek üzere benzer şekilde "programlanmış" olduklarını iddia ediyordu. Einstein'a göre, birbirinden çok uzaktaki

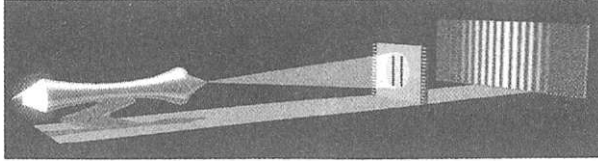
,fotonların davranışlarının dolanık olması, fotonların salındıkları zaman benzer özelliklere sahip olduklarının kanıtıydı, aralarında uzun mesafeli, tuhaf bir kuantum ilişkisi olduğunun değil.

Kimin haklı olduğuna -Einstein'ın mı yoksa kuantum mekaniğini destekleyenlerin mi- elli yıla yakın bir süre boyunca karar verilemedi, çünkü göreceğimiz gibi tartışma Scully ve Mulder arasında yaşanan tartışmaya benzemişti: Var olduğu öne sürülen, kuantum mekaniğine özgü, tuhaf bağlantıların olmadığını kanıtlamak ve bu arada da Einstein'ın klasik görüşüne hiç dokunmamak için yapılan her girişim, deneylerin kendilerinin ölçmeye çalışılan özellikleri kaçınılmaz olarak bozduğu iddiasıyla karşı karşıya kalıyordu. 1960'larda her şey değişti. İrlandalı fizikçi John Bell, mükemmel bir kavrayış sergileyerek bu konunun deneysel olarak bir çözüme kavuşturulabileceğini gösterdi ve 1980'lerde de bu gerçekleşti. Verilerin en basit yorumu, Einstein'ın hatalı olduğunu ve hemen buradaki şeylerle uzakdaki şeyler arasında acayip, tuhaf, "ürkütücü" kuantum dolanıklığı olabileceğini gösteriyordu⁵.

Bu sonucun altında yatan mantığın anlaşılması o kadar zordur ki, fizikçilerin bunu tam olarak anlaması otuz yıldan fazla zaman almıştır. Ama kuantum mekaniğinin temel özelliklerini inceledikten sonra göreceğiz ki, tartışmanın özü aslında o kadar da karmaşık değildir.

Bir Dalga Yaratmak

Yanmış bir 35 mm'lik film parçası üzerine birbirine çok yakın ve çok ince iki çizik atıp sonra film parçasına lazerli işaret kalemi tutarsanız, ışığın bir dalga olduğunun en doğrudan kanıtını görürsünüz. Eğer bunu hiç yapmadıysanız, denemeye değer (film yerine başka şeyler, örneğin üstten bastırılmalı kahve servis aletlerinin içindeki ince tel süzgeç gibi şeyler de kullanabilirsiniz). Lazer ışığı filmin üzerindeki ince yarıklardan geçip arkadaki ekrana düştüğü zaman ortaya çıkan görüntüde (Şekil 4.1 'deki gibi) açık renkli ve koyu renkli şeritler olacaktır. Ekrandaki bu görüntü, dalgaların temel bir özelliğiyle açıklanır. Gözde canlan-

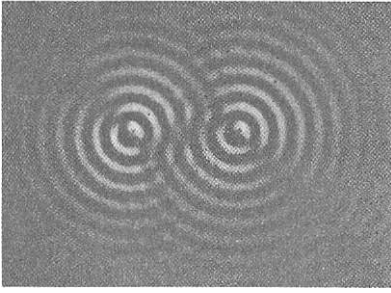


Şekil 4.1 Siyah bir Film üzerine kazınan iki ince çizgiden geçen lazer ışığı, ekranda ışığın dalga olduğunu gösteren girişim desenleri oluşturur.

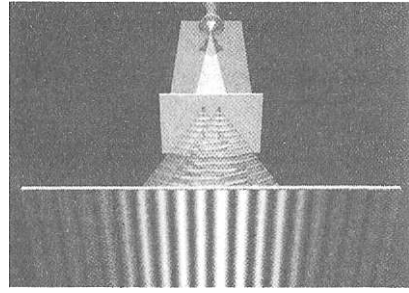
dırılması en kolay dalgalar su dalgaları olduğu için, dalgalarla ilgili temel noktayı önce büyük, sakin bir göldeki dalgalarla açıklayalım, sonra da bunu ışığa uyarlayalım.

Bir su dalgası, bazıları her zamankinden alçak, bazıları da her zamankinden yüksek bölgeler yaratarak sakin bir gölün yüzeyini bozar. Bir dalganın en yüksek kısmı *tepe*, en alçak kısmıysa çukur olarak adlandırılır. Dalga, periyodik bir ardışıklık gösterir: Tepeyi çukur izler, onu yeniden tepe izler ve bu böyle devam eder. Eğer iki dalga birbirine doğru gelirse -örneğin sakin bir gölde, birbirine yakın iki noktadan suya birer taş atarak birbirlerine doğru yayılan dalgalar yaratırsak- karşılaştıkları zaman Şekil 4.2a'da gösterilen ve *girişim* olarak bilinen önemli bir etki ortaya çıkar. Bir dalganın tepesiyle diğerinin tepesi kesiştiği zaman suyun yüksekliği artar, iki tepenin yüksekliğinin toplamı kadar olur. Benzer biçimde bir dalganın çukuru diğerinin çukuruyla kesiştiğinde, çukurun derinliği artar, iki çukurun derinliğinin toplamı kadar olur. En önemli birleşim ise şudur: Bir dalganın tepesi diğerinin çukuruyla karşılaştığında tepe suyu yukarıya, çukursa aşağıya çekmeye çalışacağı için, tepe ve çukur birbirini yok eder. Eğer dalgalardan birinin tepe yüksekliği, diğerinin çukur derinliğine eşitse, tepe ve çukur birbirini tam olarak yok edeceği için suyun o noktası tamamen düz kalır.

Aynı ilke, iki ince yarıktan geçtikten sonra ışığın ortaya çıkardığı, Şekil 4.1'de görülen deseni de açıklar. Işık bir elektromanyetik dalgadır; iki yarıktan geçerken ekrana doğru ilerleyen iki dalgaya ayrılır. Yukarıda tanımlanan su dalgaları gibi bu iki ışık dalgası da birbirleriyle girişir. Ekranda çeşitli noktalara çarptık-



(a)



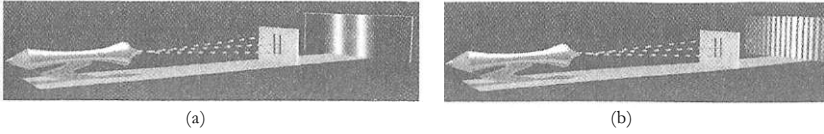
(b)

Şekil 4.2 (a) Üst üste binen su dalgaları bir girişim deseni oluşturur, (b) Üst üste binen ışık dalgaları bir girişim deseni oluşturur.

larında bazen iki dalga da tepe noktasında olur. ve ekranı aydınlatır, bazen de iki dalga da çukur noktasında olur ve ekranı gene aydınlatır, ama bazen bir dalganın tepesi diğerinin çukuruyla karşılaşır ve birbirlerini yok eder, böylece ekranın o noktası karanlık kalır. Bu durum Şekil 4.2b'de görülüyor.

Dalga hareketinin matematiksel ayrıntıları çözümlendiğinde (dalgaların tepeleri ve çukurları arasındaki çeşitli aşamalarda gerçekleşen kısmi yok etme durumları da dahil), Şekil 4.1'deki şeritleri, karanlık ve aydınlık noktaların doldurduğu gösterilebilir. Karanlık ve aydınlık şeritler ışığın bir dalga olduğunun açık bir kanıtıdır. Bu konu, Newton'un ışığın bir dalga olmadığını, akan parçacıklardan oluştuğunu öne sürmesinden bu yana (bu konuya birazdan geleceğiz) yoğun olarak tartışılmaktadır. Üstelik, bu çözümleme *bütün* dalga türleri için (ışık dalgası, su dalgası, ses dalgası, ne isterseniz) aynen geçerlidir ve dolayısıyla girişim desenleri, bir benzetme yapacak olursak hâlâ dumanı tütmekte olan bir tabancaya benzetilebilir: Yani uygun büyüklükte -ki bu büyüklük gelen dalganın tepesiyle çukuru arasındaki mesafe tarafından belirlenir- iki yarıktan geçirildikten sonra Şekil 4.1'dekine benzeyen bir ışık güç deseni (aydınlık bölgeler yüksek ışık şiddetini, karanlık bölgelerse düşük ışık şiddetini gösterir) ortaya çıkaran şey mutlaka dalgadır.

1927'de Clinton Davisson ve Lester Germer bir nikel kristalli parçasına bir elektron demeti (görünürde dalgalarla hiç ilişkisi



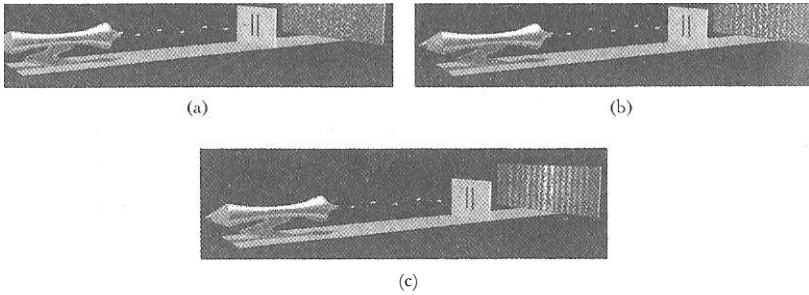
Şekil 4.3 (a) Klasik fizik, üzerinde iki yarık bulunan bir engele gönderilen elektronların ekranda aydınlık iki şerit oluşturacağını öngörür, (b) Kuantum mekaniği ise elektronların bir girişim deseni oluşturacağını öngörür; bu da elektronların dalga benzeri özellikler taşıdığını gösterir. Deneyler de bunu doğrulamaktadır.

olmayan parçacıklar) gönderdiler. Deneyin ayrıntıları bizi ilgilendirmiyor, ama şu ilgilendiriyor: Bu deney, üzerinde iki yarık bulunan bir engele elektron gönderilmesiyle eşdeğerdir. Deneyciler elektronların yarıklardan geçtikten sonra fosforla kaplı bir ekrana düşmesini sağladılar. Ekrana çarpan elektronlar ekranda küçük birer ışık çakımı olarak iz bırakacaktı (bu ışık çakımları televizyonunuzun ekranındaki görüntüleri oluşturan ışık çakımlarıyla aynıdır). Sonuç, şaşırtıcıydı. Elektronları küçük mermilere benzetirsek, ekrana çarptıkları noktaların konumlarının Şekil 4.3a'da olduğu gibi, iki yarıkla hizalı olması beklenir. Ama Davison ve Germer'in bulduğu bu değildi. Deneyleri Şekil 4.3b'de şematik olarak gösterilen sonucu vermişti: Elektronların ekrana çarptıkları noktalar, dalgalara özgü girişim desenleri yaratıyordu. Davison ve Germer hâlâ dumanı tütmede olan tabancayı bulmuşlardı. *Parçacık* özelliğine sahip *elektronların bir tür dalga olarak davranması gerektiğini göstermişlerdi, bu da beklenmedik bir şeydi.*

Siz bunu pek de şaşırtıcı bulmayabilirsiniz. Su H_2O moleküllerinden oluşmuştur ve birçok molekül düzenli bir biçimde hareket ettiği zaman bir su dalgası ortaya çıkar. Belli bir konumdaki bir grup H_2O molekülü yükselirken yakınlarda bir başka konumdaki bir grup H_2O molekülü alçalır. Şekil 4.3'te gösterilen veriler, elektronların da bazen H_2O molekülleri gibi birlikle hareket ettiğini ve toplam, makroskopik hareketlerinin dalga ya benzeyen bir desen ortaya çıkardığını gösteriyor olabilir. İlk bakışta bu akla yakın bir öneri gibi gelse de, asıl öykü çok daha beklenmedik şeyler anlatır.

Başlangıçta Şekil 4.3'teki elektron tabancasının kesintisiz olarak elektron gönderdiğini düşünmüştük. Ama tabancayı her geçen saniye giderek azalan sayıda elektron gönderecek şekilde ayarlayabiliriz; hatta her 10 saniyede 1 elektron gönderecek şekilde ayarlayabiliriz. Sabırlı davranırsak, bu deneyi uzun bir zamana yayabilir ve yarıklardan geçen her elektronun ekrana hangi noktada çarptığını kaydedebiliriz. Şekil 4.4 (a), Şekil 4.4 (b) ve Şekil 4.4 (c) bir saat sonra, yarım gün sonra ve bir gün sonra biriken verileri gösteriyor. 1920'lerde böyle görüntüler fiziği temellerinden sarsmıştı. *Parçacık karakterli elektronların, ekrana birbirlerinden bağımsız, ayrı ayrı, tek tek gönderildiklerinde bile dalgalara özgü girişim desenini oluşturdıklarını görüyoruz.*

Bu sanki *tek bir* H₂O molekülünün, bir su dalgasına benzer bir şey içermesi gibidir. Ama bu nasıl olabilir ki? Dalga hareketi, tek tek, ayrı bileşenlerine indirgendiği zaman bir anlamı olmayan toplu, ortak bir özelliştir. Eğer tribündeki seyirciler birkaç dakikada bir ayrı ayrı ayağa kalkıp yeniden otursa o dalga hareketi *oluşmaz*. Dahası, dalga girişim deseni oluşması için *buradan çıkan* bir dalganın *oradan gelen* bir dalga ile kesişmesi gerekir. Öyleyse tek tek, ayrı ayrı, parçacık yapısında bileşenlerin girişimle nasıl bir ilgisi olabilir ki? Ama işte Şekil 4.4'teki verilerin de gösterdiği gibi, çok küçük madde parçacıkları olan tek tek elektronların her biri dalga benzeri bir özelliğe de sahiptir.

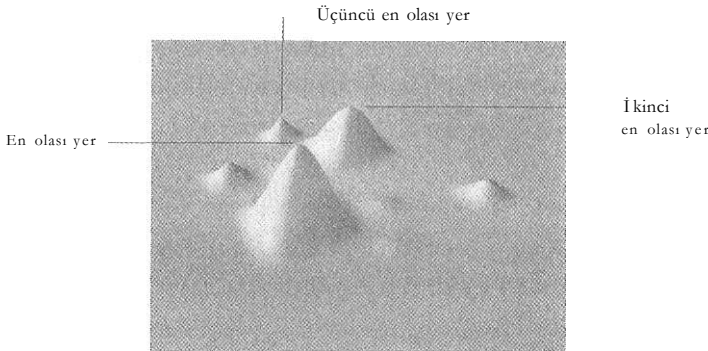


Şekil 4.4. Yarıklara doğru gönderilen elektronlar nokta nokta bir girişim deseni oluşturur. (a)-(c)'de zamanla oluşan desenler gösterilmiştir.

Olasılık ve Fizik Yasaları

Eğer tek bir elektron aynı zamanda dalga ise, o zaman dalgalanan nedir? İlk tahmini Erwin Schrödinger yaptı: Belki de elektronları oluşturan madde uzayda dağılmaktadır, dalgalanan da işte bu dağılıp yayılmış elektron özüdür. Bu bakış açısına göre, demek ki bir elektron parçacığı elektron sisinde keskin bir çıkıntıdır. Ama bu önerinin doğru olamayacağı hemen anlaşıldı, çünkü çıkıntılı bir dalga bile -örneğin dev bir gelgit dalgası-eninde sonunda yayılır. Eğer çıkıntılı bir elektron dalgası yayılacak olsaydı, tek bir elektronun elektrik yükünün bir bölümü burada, kütesinin bir bölümü ötede olurdu. Ama öyle olmuyor. Bir elektronun yerini saptadığımızda, daima tüm kütlesi ve tüm elektrik yükü de orada, küçücük, nokta benzeri bir bölgede yoğunlaşmış oluyor. 1927'de Max Born farklı bir öneride bulundu. İleride bu önerinin, fiziği yepyeni bir alana girmeye zorlayan, belirleyici bir adım olduğu anlaşılacaktı. Born, dalganın ne yayılmış elektron ne de bilimde daha önce karşılaşmış bir şey olduğunu öne sürdü. Ona göre, dalga bir *olasılık dalgası* idi.

Bunun ne anlama geldiğini anlayabilmek için, bir su dalgasının yüksek genlikli bölgelerini (tepelerin ve çukurların yakınlarındaki bölgeler) ve düşük genlikli bölgelerini (tepeler ve çukurların arasındaki, daha düz geçiş bölgeleri) gösteren bir fo-



Şekil4.5. Bir parçacığın, örneğin bir elektronun olasılık dalgası bize o parçacığı bir yerde bulma olasılığını gösterir.

toğraf düşünün. Genlik büyüdükçe su dalgasının yakındaki gemiler ve kıyıdaki yapılar üzerine kuvvet uygulama potansiye-
li de o kadar büyür. Born'un öngördüğü olasılık dalgalarının
da yüksek ve düşük genlikli bölgeleri vardı, ama onun bu dal-
ga şekillerine yüklediği anlam çok beklenmedik bir anlamdı:
*Uzayda, belirli bir yerdeki bir dalganın büyüklüğü, elektronun
uzayda o noktada bulunma olasılığıyla orantılıdır.* Olasılık dal-
gasının büyük olduğu yerler, elektronun bulunma olasılığının
en yüksek olduğu yerlerdir. Olasılık dalgasının küçük olduğu
yerler, elektronun bulunma olasılığının düşük olduğu yerlerdir.
Olasılık dalgasının sıfır olduğu yerler ise elektronun bulunama-
yacağı yerlerdir.

Şekil 4.5'te Born'un olasılıkçı yaklaşımını vurgulayan bir ola-
sılık dalgasının "fotoğrafı" görülüyor. Su dalgalarının fotoğrafı-
nın tersine, şekildeki görüntü gerçekte bir fotoğraf makinesiyle
çekilmiş olamaz. Hiç kimse bir olasılık dalgasını doğrudan gör-
memiştir, kuantum mekaniğinin mantığı hiç kimsenin de göre-
meyeceğini söyler. Bunun yerine, bir olasılık dalgasının veri-
li bir durumda nasıl olması gerektiğini görmek için (Schrödin-
ger, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Paul Dirac ve başkaları ta-
rafından geliştirmiş) matematiksel denklemler kullanırız. Daha
sonra bu kuramsal hesaplamaları deneysel sonuçlarla karşılaştı-
rıp sınarız. Şöyle: Bir elektronun verili bir deney düzeneğindeki
varsayılan olasılık dalgasını hesapladıktan sonra, deneyi sıfırdan
başlayarak tekrar tekrar yapar ve her seferinde elektronun he-
saplanan konumunu kaydederiz. *Newton 'un böyle bir durumda
bekleyeceğinin aksine, birbirinin eşi deneyler ve başlangıç ko-
şulları mutlaka aynı ölçümlerle sonuçlanmaz.* Yaptığımız ölçüm-
ler farklı konumlar belirtir. Elektronu bazen burada, bazen bi-
raz ötede, bazen de *hıce* ötede buluruz. Eğer kuantum mekaniği
doğru ise, elektronu verili bir noktada kaç kere bulduysak, işte
o sayı hesapladığımız olasılık dalgasının o noktadaki büyüklüğü
ile orantılıdır (aslında bu büyüklüğün karesidir). Seksen yıldır
yapılan deneyler, kuantum mekaniğinin tahminlerinin hesapla-
malarını şaşırtıcı bir doğrulukla onaylamaktadır.

Şekil 4.5 te elektronun olasılık dalgasının yalnızca bir bölümü gösterilmektedir; kuantum mekaniğine göre, her bir olasılık dalgası, uzayın her tarafına, evrenin tümüne yayılır.⁶ Ama pek çok koşulda, bir parçacığın olasılık dalgası, küçük bir bölgenin dışında çabucak sıfıra yakın bir değere düşer; bu da o parçacığın çok ama çok büyük bir olasılıkla işte o küçük bölgede olduğunu gösterir. Böylesi durumlarda olasılık dalgasının Şekil 4.5'te gösterilmeyen bölümü (evrenin geri kalanına yayılan bölümü) şeklin kenarlarına çok benzer: Düz ve sıfıra yakın değerde. Bununla birlikte, Anromeda galaksisinin herhangi bir yerindeki bir olasılık dalgasının değeri sıfırdan farklı olduğu sürece, elektronun orada olma olasılığı ne kadar küçük olsa da gerçektir (yani sıfırdan farklıdır).

Böylece, kuantum mekaniğinin başarısı bizi elektronun (yani maddenin çok küçük bir parçası olduğunu, normalde uzayda çok küçük, nokta benzeri bir bölgeyi kapladığını düşündüğümüz elektronun) bütün evrene yayılan bir dalgayı içeren bir betimlemesinin de olduğunu kabul etmeye zorlar. Dahası, kuantum mekaniğine göre bu parçacık-dalga birleşmesi yalnızca elektron için değil doğanın tüm bileşenleri için geçerlidir: Protonlar da hem parçacığa hem dalgaya benzer, nötronlar da hem parçacığa, hem dalgaya benzer. 1900'lerin başında yapılan deneyler, Şekil 4.1 'de dalga gibi davrandığı görülen ışığın bile parçacıkla, daha önce sözünü ettiğimiz, foton adı verilen "ışık paketçikleriyle" tanımlanabildiğim ortaya koymuştur.' Örneğin, yüz vatlık bir elektrik ampulünden yayılan elektromanyetik dalgalar da ampulün saniyede yüz milyar kere milyar foton yayması şeklinde de tanımlanabilir. Kuantum dünyasında her şeyin hem parçacık hem de dalga özneliğine sahip olduğunu öğrendik.

Geçtiğimiz seksen yıl süresince, kuantum mekaniğine özgü olasılık dalgalarının deney sonuçlarının öngörülmesinde ve açıklanmasında her zaman işe yaradığı her türlü kuşkunun ötesinde kabul görmüştür. Ama hâlâ kuantum mekaniğine özgü olasılık dalgalarının aslında ne olduklarını gözümüzde canlandırmamızı sağlayacak, üzerinde fikir birliğine varılmış evrensel bir

fikir yoktur. Elektronun olasılık dalgasının elektronun *kendisi* mi olduğunu yoksa elektronla *ilişkili* bir şey mi olduğunu yoksa elektronun hareketini tanımlamak için kullanılan *matematiksel bir araç* mı olduğunu yoksa elektron hakkında *bilebildiğimiz her şeyin somut halimi* olduğunu söylememiz gerektiği hâlâ tartışma konusudur. Açıkça bilinen şey var ki, o da şu: Kuantum mekaniği bu dalgalar yoluyla fizik yasalarına, hiç kimsenin beklemediği bir biçimde, olasılık kavramını sokmaktadır. Meteorologlar yağış tahmini yaparken olasılık kavramını kullanır. Kumarhaneler müşterilerin zarda bir bir atma ihtimalini tahmin etmek için olasılık hesaplarını kullanır. Ama bu örneklerde olasılığın oynadığı rol, elimizde kesin öngörülerde bulunmaya yetecek kadar bilgi olmamasından kaynaklanıyor. Newton'a göre, eğer çevrenin durumunu (onu oluşturan parçacıkların her birinin konumunu ve hızını) tüm ayrıntılarıyla bilseydik, o zaman (eğer yeterince hesap becerimiz varsa) yarın öğleden sonra 4:07'de yağmur yağıp yağmayacağını öngörebilirdik; zar oyunu ile ilgili bütün fiziksel ayrıntıları (zarların tam şeklini ve neden yapıldığını, elinizden çıktıkları andaki yönelimlerini ve hızlarını, masanın ve yüzeyinin neden yapıldığını vb.) bilseydik, zarın kaç kaç geleceğini tam olarak hesaplayabilirdik. Pratikte bütün bu bilgiyi bir araya getiremediğimiz için (eğer bir araya getirebilsek bile, henüz bu tip öngörülerde bulunmamızı sağlayacak hesaplamaları yapacak kadar güçlü bilgisayarlarımız olmadığı için) daha azıyla yetiniyor ve sahip olmadığımız verilerle ilgili akılcı tahminler yaparak, sadece havanın yağmurlu olması veya zarların bir bir gelmesi olasılığını öngörüyoruz.

Kuantum mekaniğinde tanımlanan olasılık kavramının ise daha farklı, daha temel bir karakteri var. Kuantum mekaniğine göre yapabileceğimiz tek şey, veri toplama yöntemlerindeki veya bilgisayarların gücündeki ilerlemelerden bağımsız olarak, şu veya bu sonucun ortaya çıkma olasılığını hesaplamak. Yapabileceğimiz tek şey bir elektronun, protonun, nötronun veya doğadaki bileşenlerden herhangi birinin burada veya şurada olma olasılığını öngörmek. Yani mikro düzeydeki evrenin egemen gücü olasılıktır.

Örneğin kuantum mekaniğinin, elektronların Şekil 4.4'teki aydınlık ve karanlık şeritleri birer birer, zamanla nasıl oluştuduğuna ilişkin açıklaması artık açıkça anlaşılmıştır. Her bir elektron kendi olasılık dalgasıyla tanımlanır. Elektron yarıklara doğru gönderildiğinde olasılık dalgası iki yarıktan birden geçer. Tıpkı ışık dalgalarında ve su dalgalarında olduğu gibi, yarıklardan geçen olasılık dalgaları da birbirleri ile etkileşir. Ekranın bazı noktalarında iki olasılık dalgası birbirini desteklediği için oluşan genlik büyük olur. Başka noktalarda dalgalar birbirlerini kısmen yok ettiği için genlik küçük olur. Başka bazı noktalarda ise, olasılık dalgalarının tepeleri ve çukurları birbirlerini tümüyle yok ettiği için, dalga genliği tam olarak sıfır olur. Yani ekranda elektronların çarpma olasılığının çok yüksek olduğu noktalar, bu olasılığın daha az olduğu ve hiç olmadığı noktalar vardır. Zaman içinde elektronun çarpma noktaları bu olasılık profiline göre dağılır, bu nedenle de ekranda parlak, daha az parlak ve tamamen karanlık bölgeler ortaya çıkar. Ayrıntılı çözümler, bu aydınlık ve karanlık bölgelerin aynen Şekil 4.4'teki gibi görüneceğini gösteriyor.

Einstein ve Kuantum Mekaniği

Kuantum mekaniği için olasılıkçı doğası nedeniyle, kendinden önce gelen temel evren tanımlamalarının hepsinden hem nitelik hem de nicelik olarak kesin olarak farklıdır. Geçen yüzyıldaki başlangıcından itibaren fizikçiler bu tuhaf ve alışılmadık yapıyı, herkesin bildiği dünya görüşü ile bağdaştırmaya çalıştı, hâlâ da çalışıyorlar. Sorun, günlük hayatın makroskopik deneyimlerini kuantum mekaniğinin ortaya koyduğu mikro gerçeklikle uzlaştırmakta. Ekonomik ve politik kazaların kaprislerine maruz kalsa da en azından fiziksel özellikleri göz önüne alındığında dengeli ve güvenilir görünen bir dünyada yaşamaya alışmışız. Şu anda solumakta olduğunuz havayı oluşturan atomların birden dağılırarak kuantum dalgası özellikleri sayesinde Ay'ın karanlık yüzünde tekrar ortaya çıkıp sizi havasız bırakacağından endişe etmezsiniz. Çok da haklısınız, çünkü kuantum mekaniği-

ne göre bunun olma olasılığı sıfır değilse de çok ama çok düşüktür. Ama bu olasılığı bu kadar düşük yapan nedir?

Bunun iki ana nedeni vardır. Birincisi, atom ölçeğinde Ay olağanüstü derecede uzaktır. Söz ettiğimiz gibi, pek çok koşulda (ama her koşulda değil) kuantum denklemleri bir olasılık dalgasının uzayın küçük bir bölgesinde dikkate alınabilir bir değeri varken, o bölgeden uzaklaştıkça bu değerin hızla neredeyse sıfıra düştüğünü gösteriyor (Şekil 4.5'te olduğu gibi). Bu nedenle, sizinle aynı odada olmasını umduğunuz tek bir elektronun bile -örneğin şu anda verdiğiniz soluğun içindeki bir elektronun- bir iki dakika sonra Ay'ın karanlık yüzünde olma olasılığı sıfır değilse bile son derece küçüktür. O kadar küçüktür ki, Nicole Kidman veya Antonio Banderas'la evlenme olasılığınız bile bunun yanında çok büyük kalır. İkincisi, odanızdaki havayı oluşturan çok sayıda elektron, proton ve nötron vardır. Bu parçacıkların *hepsinin*, tek bir parçacık için bile çok olası olmayan bir şeyi yapma olasılığı o kadar düşüktür ki üzerinde bir an bile düşünmeye değmez. Bu olasılık ancak hayranı olduğunuz film yıldızıyla evlenmekle kalmayıp bir de uzun bir süre boyunca (örneğin, evrenin şu anki yaşının yanında kozmik bir göz kırpmaya süresine eşit olacağı kadar bir süre) her ay piyangoda en büyük ikramiyeyi kazanma olasılığı ile karşılaştırılabilir.

Bunlar günlük hayatta kuantum mekaniğinin olasılıkçı yönüyle neden doğrudan karşılaşmadığımız konusunda size bir fikir verir. Bununla birlikte, deneyler kuantum mekaniğinin temel fiziği tanımladığını kanıtladığı için, kuantum mekaniği gerçekliğin ne olduğu konusundaki temel düşüncelerimize açık bir saldıridir. Özellikle Einstein, kuantum kuramının olasılıkçı özelliğinden son derece rahatsızdı. Hep vurguladığı gibi fizik, çevremizdeki dünyada geçmişte ne olup bittiğini, şimdi ne olmakta olduğunu ve gelecekte ne olacağım kuşkuya yer bırakmayacak şekilde belirlemekle uğraşır. Fizikçiler bahisçi olmadığı gibi, fizik de olasılık hesaplama işi değildir. Ama Einstein kuantum mekaniğinin, her ne kadar istatistiksel bir çerçeve içinde de olsa, mikro dünyadaki deneysel gözlemleri öngörmekte ve açıklamaktaki

olağanüstü başarısını inkâr edemiyordu. Bu yüzden Einstein, elde ettiği benzersiz başarılar göz önüne alındığında akıntıya karşı kürek çekmeye benzeyeceğinden kuantum mekaniğinin yanlış olduğunu göstermeye çalışmak yerine, kuantum mekaniğinin evrenin işleyişi konusunda son söz olmadığını göstermeye çalıştı. Her ne kadar ne olduğunu tam olarak söyleyemese de, herkesi evrenin henüz bulunamamış, daha derin ve bu kadar tuhaf olmayan bir betimlemesi olduğuna ikna etmek istedi.

Yıllar içinde Einstein, kuantum mekaniğinin yapısındaki boşlukları ortaya çıkarmayı amaçlayan, giderek karmaşıkleşan pek çok fikir ortaya attı. Solvay Enstitüsü'nün⁸ 1927'deki Beşinci Fizik Konferansı'nda sunduğu bu fikirlerden biri, her ne kadar bir elektronun olasılık dalgası Şekil 4.5'tekine benzese de, yerini hesapladığımız zaman elektronun mutlaka belli bir yerde olduğunu bulmamıza ilişkindir. Einstein şunu soruyordu: Bu durum, bir elektronun konumunu saptayabilecek daha kesin bir betimleme bulunana kadar, olasılık dalgasının sadece geçici bir şey olduğunu göstermez mi? Ne de olsa eğer elektron X'te bulunduyorsa, gerçekte ölçümün yapılmasından bir an önce de *tam* X'te veya ona çok yakın bir yerde olmuş olması gerekmez mi? Eğer öyleyse, Einstein sorgulamaya devam ediyordu, kuantum mekaniğinin olasılık dalgasına -bu örnekte, elektronun X'ten uzakta bulunması olasılığının olduğunu söyleyen dalga- dayanıyor olması, kuramın altta yatan gerçekliği tanımlamaktaki yetersizliğini göstermez mi?

Einstein'ın bakış açısı basit ve ikna ediciydi. Bir parçacığın şu anda, bir an sonra bulunacağı yerde ya da hiç değilse yakınlarında olmasını beklemekten daha doğal ne olabilirdi. Eğer durum buysa, fiziği daha derinlemesine kavrayan bir bakış işte *bu* bilgiyi sağlamalı ve daha olasılıklardan oluşan "kaba" çerçeveden kurtulmalıydı. Ama Danimarkalı fizikçi Niels Bohr ve kuantum mekaniğini savunan arkadaşları aynı fikirde değildi. Bu mantıcın köklerinin, elektronun ileri geri hareket ederken tek ve belirli bir yol izlediğini savunan geleneksel düşünce biçiminde yattığını öne sürüyorlardı. Ama Şekil 4.4 bu düşünceye açıkça mey-

dan okuyordu. Eğer her elektron tek ve belirli bir yol izliyorsa -bir tabancanın namlusundan çıkan mermiler gibi- gözlenen girişim desenlerini açıklamak son derece zor olurdu: Ne, neyle girişiyordu? Tek bir tabancadan sırayla atılan normal mermiler elbette birbirleriyle etkileşmez; eğer elektronlar da mermiler gibi hareket ediyorsa Şekil 4.4'teki deseni nasıl açıklayacaktık?

Bohr'a ve başını çektiği Kopenhag ekolünün kuantum mekaniğine göre, *bir elektronun konumu* ölçmeden önce, nerede olduğunu sormanın *bile bir anlamı yoktur*. Elektronun belirli bir konumu yoktur. Olasılık dalgası, elektronun uygun bir şekilde incelendiğinde, burada veya şurada olma olasılığını şifreler; bir elektronun konumu konusunda söylenebilecekler *gerçekten* bundan ibarettir. Nokta. Elektronun, ancak ona "bakıp" yani konumunu ölçüp yerini kesinlikle belirlediğimiz anda bildiğimiz, sezgisel anlamda bir yeri vardır. Ama bundan önce (ve sonra) var olan tek şey, diğer tüm dalgalar gibi girişime uğrayan bir olasılık dalgasıyla tanımlanan potansiyel konumlardır. Sanki elektronun bir konumu var da biz ölçüm yapmadan önce bu konumu bilmiyoruz gibi de değil. Beklenenin tersine, ölçüm yapılmadan önce elektronun *belirli bir konumu yoktur*.

Bu baştan çok tuhaf bir gerçekliktir. Çünkü bu bakış açısına göre, elektronun konumunu ölçtüğümüz zaman gerçekliğin nesnel, önceden var olan bir özelliğini ölçmüyoruz. Ölçme işi, ölçtüğümüz gerçekliğin oluşmasıyla tamamen iç içe. Bu konuyu elektron düzeyinden günlük hayat düzeyine çıkararak ele alan Einstein şu espriyi yapıyordu: "Gerçekten bakmadığımız sürece Ay'ın orada olmadığını mı düşünüyorsunuz?" Kuantum mekaniği taraftarları da şöyle cevap veriyordu: Eğer kimse Ay'a bakmıyorsa -yani kimse "Ay'ı görerek konumunu ölçmüyorsa"- Ay'ın orada olup olmadığını bilmemizin bir yolu yoktur, dolayısıyla bu soruyu sormak da anlamsızdır. Einstein bu cevabı kesinlikle tatmin edici bulmuyordu. Bu, onun gerçeklik kavramıyla tam bir uzlaşmazlık içindeydi; Einstein bakan olsa da olmasa da Ay'ın kesinlikle orada olduğunu düşünüyordu. Ama kuantum taraftarları ikna olmuyordu.

Einstein'in 1930'daki Solvay konferansında ileri sürdüğü ikinci fikir, birinciye bağlıydı. Einstein varsayımsal bir aygıt tanımlıyordu. Zekice bir araya getirilmiş bir tartı, bir saat ve fotoğraf makinelerine benzeyen bir örtücünden oluşan bu aygıt, - kuantum mekaniği aksini söylese de bir parçacığın örneğin bir elektronun -ölçülmeden ve bakılmadan önce- belirli bazı özelliklere *sahip olması gerektiğini* ortaya koyuyor gibi görünüyordu. Konunun ayrıntıları önemli değil, ama sonuca bağlanma biçimi çok ilginç. Bohr, Einstein'ın bu fikrini ilk duyduğunda önce şaşırır, çünkü Einstein'ın fikirlerinde bir hata göremiyordu. Ama birkaç gün sonra Einstein'ın iddialarını temelden çürüttü, işte ilginç olan da, Bohr'un bulduğu cevabın çıkış noktasının genel görelilik olmasıydı! Bohr, Einstein'ın kendi keşfi olan kütleçekiminin zamanı yamulttuğu -saatlerin, etkilendikleri kütleçekimine göre hızlı veya yavaş işlediği- gerçeğini hesaba katmadığını fark etmişti. Bu durum da düşünüldüğünde, Einstein elde ettiği sonuçların kuantum kuramıyla tamamen örtüştüğünü kabul etmek zorunda kaldı.

İtirazları çürütülmüş olsa bile Einstein kendini kuantum mekaniği konusunda hep son derece rahatsız hissetti, izleyen yıllarda birbiri ardına yeni fikirler ileri sürerek Bohr ve çalışma arkadaşlarını diken üstünde tuttu. En güçlü ve etkili saldırısı, kuantum mekaniğinin doğrudan bir sonucu olan ve 1927'de Werner Heisenberg'in açıkladığı *belirsizlik ilkesi* olarak bilinen şey üzerine odaklanmıştı.

Heisenberg ve Belirsizlik

Belirsizlik ilkesi, olasılığın kuantum evreninin dokusunun içine nasıl derin bir biçimde işlemiş olduğunun nicel ve kesin bir ölçüsünü verir. Bunu anlayabilmek için, bazı Çin lokantalarındaki menüleri düşünün. Yemekler A ve B sütunları olarak sıralanmıştır; örneğin A sütunundaki ilk yemeği ısmarlamışsanız, B sütunundaki ilk yemeği ısmarlayamazsınız, A sütunundaki ikinci yemeği ısmarlamışsanız, B sütunundaki ikinci yemeği ısmarlayamazsınız ve bu kural listenin sonuna kadar böyle devam eder.

Böylece lokanta, yemekle ilgili bir ikilik (düalizm), bir tamamlayıcılık (en pahalı ana yemeklerin birkaçını birden ısmarlamana engel olmak için) kurmuştur. Örneğin bu menüden Pekin ördeği ya da Kanton ıstakozu seçebilirsiniz, ama ikisini birden seçemezsiniz.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi de buna benzer. Kabaca, mikro dünyadaki fiziksel özellikler (parçacık konumları, hızlar, enerjiler, açısal momentumlar vb.) A ve B olarak iki listeye ayrılabilir, der. Heisenberg, A listesindeki ilk özelliğe ait bütün bilgiye sahipseniz, B listesindeki ilk özelliğe ait bilgiye ulaşamayacağınızı keşfetmiştir. Aynı şekilde, A listesindeki ikinci özelliğe ait bilgi, B listesindeki ikinci özelliğe ait bilgiye ulaşmanızı engeller, listenin sonuna kadar bu böyle devam eder. Tıpkı hem biraz Pekin ördeğinden hem de biraz Kanton ıstakozundan oluşan bir ana yemek sipariş edebilmeniz, ama bu iki yemeğin tabaktaki oranına göre belirlenen toplam fiyatın tek bir ana yemek fiyatını aşmaması gibi, listelerden birindeki bir özellik hakkındaki bilginiz kesinleştikçe, diğer listedeki ona karşılık gelen özellik hakkındaki bilginiz daha az kesin hale gelir. Heisenberg ilkesinin ortaya koyduğu belirsizlik işte bu iki listedeki bütün özellikleri aynı anda belirlemenin -mikro dünyaya özgü tüm bu özelliklerin hepsini kesin bir şekilde belirlemenin- temel olarak mümkün olmamasıdır.

Örneğin bir parçacığın nerede olduğunu ne kadar kesin belirlerseniz, hızını belirlemedeki kesinlik o kadar az olur. Benzer biçimde bir parçacığın hızını ne kadar kesin belirlerseniz, parçacığın nerede olduğu konusundaki bilginiz o kadar az olur. Böylece kuantum kuramı kendi ikiliğini kurar: Mikro dünyadaki bazı fiziksel özellikleri kesinlikle belirleyebilirsiniz, ama bunu yaparken bazı başka, tamamlayıcı özellikleri kesinlikle belirleme olasılığını ortadan kaldırmış olursunuz.

Bunun nedenini anlamak için Heisenberg'in kendisinin geliştirdiği, ileride tartışacağımız gibi belli bazı bakımlardan eksik olmakla birlikte gene de yararlı bir sezgisel kavrayış sağlayan, kaba bir tanıımı izleyelim. Herhangi bir cismin konumunu ölçtü-

ğümüzde, genellikle onunla bir şekilde etkileşiriz. Karanlık bir odada el yordamıyla elektrik düğmesini ararken, düğmeye dokunduğumuzda onu bulduğumuzu anlarız. Bir yarasa, tarla faresi ararken hedefe doğru sonar dalgaları gönderir ve aldığı yansımaları yorumlar. Ama en yaygın olan bir şeyin yerini onu göreyerek -yani cisimden yansıyan ışığın gözlerimize girmesiyle- belirlemektir. Burada önemli olan nokta şudur: Bu etkileşimler yalnız bizi değil, konumu belirlenen cismi de etkiler. Işık bile, bir cisimden yansıdığı anda küçük bir itme yaratır. Elinizdeki kitap, duvardaki saat gibi gündelik hayatta sık karşılaştığımız cisimler söz konusu olduğunda, ışığın uyguladığı bu çok ama çok küçük itmenin fark edilebilir bir etkisi yoktur. Ama elektron kadar küçük bir parçacığa çarptığında etkisi büyük olabilir: Tıpkı sert esen bir rüzgârın yürüyüş hızınızı etkilemesi gibi, ışık da elektronun hızını değiştirir. Aslında bir elektronun konumunu ne kadar büyük bir kesinlikle belirlemek isterseniz, göndermeniz gereken ışın demetinin de o kadar yüksek enerjili olması gerekir ki, bu da elektronun hareketi üzerinde daha büyük bir etki yapar.

Bu, bir elektronun konumunu büyük bir kesinlikle ölçerseniz, kendi yaptığınız deneyi mutlaka bozuyorsunuz demektir: Elektronun konumunu kesin olarak ölçme işlemi, elektronun hızını değiştirir. Dolayısıyla elektronun nerede olduğunu tam olarak bilebilirsiniz, ama tam o andaki hızını kesin olarak bilemezsiniz. Tersine, elektronun hızını kesin bir biçimde ölçebilirsiniz, ama bunu yaparken de tam yerini ölçemezsiniz. Doğanın, bu tür birbirini tamamlayan özelliklerin belirlenmesinin kesinlik derecesi konusunda yapısal bir sınırı vardır. Her ne kadar biz elektronlar üzerine odaklandıysak da belirsizlik ilkesi tümüyle geneldir: Her şeyi içine geçerlidir.

Günlük hayatta, rahat rahat bir otomobilin kırmızı ışıktaki (konum) 145 kilometre hızla (hız) geçtiğini söyleyebiliriz, bunu söylediğimizde iki fiziksel özellik belirtmiş oluruz. Oysa kuantum mekaniği, bir cismin hem konumunu hem de hızını aynı anda kesin olarak belirleyemeyeceğiniz için, böyle bir ifadenin kesin bir anlamı olmadığını söyler. Fiziksel dünyaya ilişkin böy-



Şekil 4.6 Birbirini düzgün bir şekilde izleyen tepeleri ve çukurları olan bir olasılık dalgası, belirli bir hızı olan bir parçacığı temsil eder. Ama tepe ve çukurlar uzaya düzgün ve tekbiçimli olarak yayıldığı için, parçacığın konumu tamamen belirsizdir. Herhangi bir noktada olma olasılığı bütün noktalar için aynıdır.

lam anlamıyla her yerde bulunabilir. Yani, parçacığın hızını tam bir kesinlikle bilmekteyken, yeri konusunda dev bir belirsizlik var. Gördüğünüz gibi, bu sonuç bizim parçacığa etki etmemize de bağlı değil. Parçacığa hiç dokunmadık. Belirsizlik dalgalarının temel bir özelliğine dayanır: Dalgalar yayılabilir.

Ayrıntılar önemli olmakla birlikte, benzer bir mantık diğer bütün dalga şekilleri için de geçerlidir, dolayısıyla buradan çıkan genel ders de açıktır. Kuantum mekaniğinde belirsizlik vardır, o kadar.

Einstein, Belirsizlik ve Bir Gerçeklik Sorusu

Sizin de aklınıza gelmiş olabilecek önemli bir soru, belirsizlik ilkesinin gerçekliğe ilişkin neler bilebileceğimizle mi yoksa gerçekliğin kendisiyle mi ilişkili olduğu sorusudur. Her ne kadar kuantum belirsizliği gerçekliğin bu özelliklerini aynı anda bilmemizin, ilkesel düzeyde bile, yeteneğimizin ebediyen ötesinde olduğunu söylüyorsa da, evrendeki şeylerin -süzülen bir top, kaldırımda koşan bir sporcu, Güneş'in gökyüzündeki yolunu izleyen bir ayçiçeği- gerçekten bir konumu ve hızı var mı? Ya da kuantum belirsizliği klasik kalıpları tümenden kırarak, klasik sezgimizin gerçekliğe atfettiği özellikler listesinin, başında dünyayı oluşturan parçacıkların konum ve hızlarının olduğu listenin yanlış olduğunu mu söylüyor? Kuantum belirsizliği, bize son derece

basit bir biçimde, belirli bir anda parçacıkların kesin bir konuma ve hıza sahip olmadığını mı söylüyor?

Bohr için bu konu Zen Budizmindeki mantıksal sonucu olmayan problemlere benziyordu. Fizik yalnızca ölçebildiğimiz şeylerle ilgilenir. Fiziğin bakış açısına göre gerçeklik *budur*. Fiziğin "daha derin" gerçekliği, yani ölçerek bilemediğimiz gerçekliği çözümllemek için kullanmak fiziğin "çarpan tek bir elin sesini" çözümlemesini istemeye benzer. Ama Einstein 1935'te Boris Podolsky ve Nathan Rosen adlı iki meslektaşıyla birlikte, bu konuyu öyle zekice ele aldı ki, "çarpan tek elin sesi" olarak başlayan şey, elli yıl boyunca yankılanarak bir gök gürültüsüne dönüştü ve gerçekliği kavrayış biçimimize Einstein'ın bile hayal etmediği ölçüde büyük bir saldırının habercisi oldu.

Einstein-Podolsky-Rosen makalesinin amacı, kuantum mekaniğinin öngöründe bulunmak ve verileri açıklamaktaki inkâr edilemeyecek başarısına rağmen, mikro evrenin fiziği ile ilgili son söz olamayacağını göstermekti. Stratejileri basitti: Her parçacığın, zamanda verili bir anda belirli bir konumu ve hızı olduğunu göstermek ve buradan da belirsizlik ilkesinin, kuantum mekaniğine özgü yaklaşımdaki temel bir sınırlılığı açığa çıkardığı sonucuna varmak istiyorlardı. Eğer her parçacığın konumu ve hızı varsa, fakat kuantum mekaniği gerçekliğin bu özelliklerinin üstesinden gelemiyorsa, demek ki kuantum mekaniği evrenin yalnızca kısmen betimleyebiliyor demektir. Dolayısıyla kuantum mekaniğinin fiziksel gerçeklikle ilgili tamamlanmamış bir kuram olduğunu ve belki de ileride keşfedilecek, daha derin bir çerçeveye yönelik bir adım olduğunu göstermek istiyorlardı. Aslında çok daha olağandışı bir şeyin, kuantum dünyasının yerel olmama özelliğinin kanıtlanmasına zemin hazırlamışlardı.

Einstein, Podolski ve Rosen kısmen Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle ilgili henüz ayrıntısına inilmemiş açıklamasından esinlenmişti: Bir şeyin nerede olduğunu ölçerken kaçınılmaz olarak onunla etkileşir ve o andaki hızını da ölçme işlemini en baştan bozmuş olursunuz. Her ne kadar kuantum belirsizliği "bozma" açıklamasının gösterdiğinden daha genel ise de Einstein, Po-

dolsky ve Rosen, *bütün* belirsizlik kaynaklarını etkisiz hale getirmiş gibi görünen, zekice ve ikna edici bir çözüm yolu bulmuşlardı. "Bir parçacığın hem konumunu hem de hızını, parçacığın kendisiyle doğrudan hiç etkileşime girmeden, dolaylı bir yoldan ölçebilirsek ne olur" diye soruyorlardı. Klasik bir benzetmeye başvuralım: Rod ve Todd Flanders'ın Springfield'in yeni Nükleer Çölü'nde gezinti yapmaya karar verdiğini düşünelim. Çölün tam ortasında sırt sırta verip önceden belirledikleri bir hızda, dümdüz, ters yönlerle doğru yürüyecekler. Dokuz saat sonra babaları Ned, Springfield Dağı'nda yaptığı yürüyüşten dönerken uzaktan Rod'u görüp ona doğru koşarak telaşla Todd'un nerede olduğunu soruyor. Artık Todd uzaktadır, ama Ned yine de Rod'u gözleyerek ve ona sorular sorarak Todd ile ilgili çok şey öğrenebilir. Eğer Rod başlangıç noktasından tam olarak 45 kilometre doğudaysa, Todd da başlangıç noktasından tam olarak 45 kilometre batıda demektir. Eğer Rod doğuya doğru tam olarak saatte 5 kilometre hızla yürüyorsa, Todd da batıya doğru tam olarak saatte 5 kilometre hızla yürüyor demektir. Yani 90 kilometre uzaktaysa bile, dolaylı yoldan da olsa Ned Todd'un konumunu ve hızını öğrenmiş demektir.

Einstein ve meslektaşları benzer bir stratejiyi kuantum akınına uyguladı. Özellikleri birbirleriyle bir şekilde ilişkili olan (Rod'un ve Todd'un hareketlerinin birbirleriyle ilişkili olması gibi) iki parçacığın ortak bir konumda ortaya çıktığı, iyi bilinen fiziksel süreçler vardır. Öneğin tek bir parçacık, kütleleri eşit ve ters yönlerle giden iki parçaya bölünürse (patlayıp ikiye ayrılan bir cismin parçalarının ters yönlerle fırlaması gibi, ki bu atomaltı parçacıkların dünyasında çok yaygın bir şeydir) iki parçacığın hızı aynı ve ters yönde olur. Dahası, bu parçacıkların konumları da birbirleriyle yakından bağlantılı olacaktır, kolaylık olsun diye bu parçacıkların her zaman ortak başlangıç noktasından eşit uzaklıkta olduğu düşünülebilir.

Rod ve Todd'la ilgili klasik örnekle, iki parçacığın kuantum tanımı arasında önemli bir fark var: iki parçacığın hızları arasında belirli bir ilişki olduğunu kesin bir şekilde söyleyebilirsek de

-eğer birinin sola doğru belirli bir hızla gittiği ölçülmüşse, diğeri de mecburen sağa doğru ve aynı hızla gidiyor demektir- parçacıkların hızının gerçek sayısal değerini öngöremeyiz. Yapabileceğimizin en iyisi, belirli bir hızın parçacığın ulaştığı hız olma olasılığını öngörmek için kuantum fiziği yasalarını kullanmaktır. Aynı şekilde, parçacıkların konumları arasında belirli bir ilişki olduğunu kesin bir şekilde söyleyebilesek de -eğer verili bir anda bir parçacığın belirli bir konumda olduğu hesaplanmışsa, diğeri de mecburen ters yönde, başlangıç noktasından aynı uzaklıkta olacaktır- her iki parçacığın da gerçek konumlarını kesin bir şekilde öngöremeyiz. Yapabileceğimizin en iyisi, parçacıklardan birinin, seçilen bir noktada olma olasılığını öngörmektir. Yani kuantum mekaniği parçacıkların konumları ve hızları konusunda kesin cevaplar vermiyorsa da, belli durumlarda, parçacıkların hızları ve konumları arasındaki *ilişkiler* konusunda kesin ifadelerde bulunur.

Einstein, Podolsky ve Rosen bu ilişkileri kullanarak, aslında zamanın verili her anında iki parçacığın da kesin bir konumu ve kesin bir hızı olduğunu göstermek istiyordu. Şöyle: Sağa doğru giden parçacığın konumunu ölçtüğünüzü ve bu yolla, dolaylı da olsa, sola doğru giden parçacığın konumunu öğrendiğinizi düşünün. Einstein, Podolski ve Rosen sola doğru giden parçacığa kesinlikle hiç ama hiçbir şey yapmadığınız için, parçacığın o konumda olması *gerektiğini*, bütün yaptığınızın, dolaylı da olsa, o konumu belirlemek olduğunu ileri sürüyorlardı. Sonra da gayet zekice, sağa doğru giden parçacığın konumu yerine, hızını ölçmeyi seçmiş de olabileceğinize işaret ediyorlardı. Bu durumda sola doğru giden parçacığın hızını, onunla hiç etkileşmeden, dolaylı olarak bulmuş olacaktınız. Einstein, Podolski ve Rosen sola doğru giden parçacığa kesinlikle hiç ama hiçbir şey yapmamış olacağınız için, parçacığın o hızda olması *gerektiğini*, bütün yaptığınızın o hızı belirlemek olduğunu ileri sürüyorlardı. Bunları bir araya getirince de -yaptığınız ölçüm ve yapmış *olabileceğiniz* ölçüm- sola doğru giden parçacığın, herhangi bir verili anda kesin bir konumu ve kesin bir hızı olduğu sonucuna varıyorlardı.

Bu anlaşılması biraz zor bir nokta, ama çok önemli olduğu için bir kez daha tekrarlayayım: Einstein, Podolski ve Rosen, iki parçacık birbirlerinden ayrı ve uzak varlıklar olduğu için, sağa doğru hareket eden parçacığı ölçme eyleminin sola doğru hareket eden parçacık üzerinde hiçbir etkisi olamayacağı, şeklinde akıl yürütüyorlardı. Sola doğru hareket eden parçacık sağa doğru giden parçacığa ne yaptığınızdan ya da ne yapmış olabileceğinizden tümüyle habersizdir. Sağa giden parçacık üzerinde ölçüm yaptığınızda, iki parçacık birbirlerinden metrelerce, kilometrelerce hatta ışık yıllarca uzak olabilir ve bu yüzden de, yani kısacası sizin ne yaptığınız sola giden parçacığın umurunda değildir. Bu nedenle, sağa giden eşini inceleyerek sola giden parçacığa ilişkin gerçekten öğrendiğiniz ya da ilkesel olarak öğrenebileceğiniz herhangi bir özellik, sola giden parçacımın, yaptığınız ölçümden tümüyle bağımsız *kesin, var olan* bir özelliği olmalıdır. Eğer sağa giden parçacığın konumunu ölçmüşseniz sola giden parçacığın konumunu öğreneceğiniz, sağa giden parçacığın hızını ölçmüşseniz sola giden parçacığın hızını öğreneceğiniz için, demek ki sola giden parçacığın hem kesin bir konumu, hem de kesin bir hızı vardır. Elbette tüm bu çözümleme sağa ve sola giden parçacıkların rolleri değiştirilerek tekrarlanabilir (aslında, herhangi bir ölçüm yapmadan önce hangi parçacığın sola, hangisinin sağa gittiğini bile söyleyemeyiz); bu da bizi her iki parçacığın da kesin bir konumu ve hızı olduğu sonucuna götürür.

Böylece Einstein, Podolski ve Rosen kuantum mekaniğinin, gerçekliğin eksik bir tanımlaması olduğu sonucuna vardı. Parçacıkların kesin konumları ve hızları vardır, ama kuantum mekaniğine özgü belirsizlik ilkesi gerçekliğin bu özelliklerinin kuramın yapabileceklerinin ötesinde olduğunu gösterir. Eğer Einstein, Podolski, Rosen ve diğer fizikçilerin çoğu gibi eksiksiz bir doğa kuramının gerçekliğin bütün özniteliklerini betimlemesi gerektiğini düşünüyorsanız, kuantum mekaniğinin parçacıkların hem konumlarını hem de hızlarını tanımlayamaması bazı öznitelikleri ıskaladığı ve dolayısıyla da son söz yani son kuram ol-

mediği anlamına gelir. İşte Einstein, Podolsky ve Rosen bunu savunuyordu.

Kuantumun Yanıtı

Einstein, Podolski ve Rosen her parçacığın verili bir anda kesin bir konumu ve hızı olduğu sonucuna ulaştığı halde, önerdikleri süreci izlemekle bu öznitelikleri belirleyemeyeceğinize dikkat edin. Yukarıda, sağa giden parçacığın hızını ölçmeyi seçebileceğinizi söylemiştim. Öyle yapsaydınız, konumunu bozmuş olacaktınız; öte yandan konumunu ölçmeyi seçmiş olsaydınız, hızını bozmuş yani deşitirmiş olacaktınız. Eğer sağa giden parçacığın bu iki niteliğı birden elinizde değılse, sola giden parçacığın da bu nitelikleri elinizde olmaz. Demek ki, burada *belirsizlik ilkesiyle bir çelişki yok*: Einstein ve çalışma arkadaşları, verili bir parçacığın hem hızını, hem de konumunu aynı anda belirleyemeyeceklerinin gayet iyi farkındaydı. Ama Einstein, Podolski ve Rosen'in yürüttüğü mantık (işte burası çok önemli) iki parçacığın da hem konumunu hem hızını belirlemeden de her bir parçacığın kesin bir konumu ve hızı *olduğunu* gösteriyor. Onlara göre bu bir gerçeklik sorunuydu. Onlara göre bir kuram, betimleyemediğı gerçeklik öğeleri olduğu sürece tam bir kuram olma iddiasında bulunamazdı.

Kuantum mekaniğinin savunucuları bu beklenmedik gözleme tepki olarak, ünlü fizikçi Wolfgang Pauli'nin çok iyi özetlediğı, her zamanki pragmatik yaklaşımlarını benimsedi: "İnsanın, hakkında hiçbir şey bilemediğı bir şeyin yine de var olup olmadığı konusunda zihnini yorması, bir iğnenin ucuna kaç meleğin süğacağı sorusunun cevabını aramasından daha anlamlı değıldir."⁹ Genelde fizik, özelde kuantum mekaniğı yalnızca evrenin ölçülebilir özelliklerini ele alabilir. Bunun dışındaki hiçbir şey fiziğin alanında değıldir. Eğer bir parçacığın hem konumunu hem hızını ölçemiyorsanız, o zaman bu parçacığın hem konumu hem hızı olup olmadığını tartışmak anlamsızdır.

Einstein, Podolski ve Rosen aynı fikirde değıldi. Gerçeklik, detektörlerin gösterdiğinden daha fazla bir şeydi; gerçeklik, ve-

rili bir anda yapılan tüm gözlemlerin toplamından daha fazla bir şeydi. Hiç kimse, hiçbir araç, hiçbir cihaz, hiçbir şey Ay'a "bakmasa da", Ay'ın hâlâ orada olduğunu düşünüyordlardı. Ay o zaman da gerçekliğin bir parçasıydı.

Bir anlamda bu tartışma Newton'un ve Leibniz'in uzayın gerçekliği konusundaki tartışmasının yankısı gibiydi. Gerçeklen dokunamadığımız, göremediğimiz ve bir şekilde ölçemediğimiz bir şey gerçek sayılabilir mi? 2. Bölüm de Newton'un kovasının, dönmekte olan suyun içbükey yüzeyinde uzayın etkisinin doğrudan gözlenebileceğini öne sürerek uzay tartışmasının karakterini nasıl değiştirdiğinden söz etmiştim. 1964'te İrlandalı fizikçi John Bell, bir gözlemcinin "bilimin en büyük keşfi" dediği tek bir hamlede, aynı şeyi kuantum gerçekliği tartışmasında yaptı.

Bundan sonraki dört başlık altında, teknik ayrıntılardan mümkün olduğunca uzak durarak Bell'in keşfini tanımlayacağız. Yine de, bu tartışmada zar oyunundaki olasılıkları hesaplarken kullanılan kadar karmaşık olmayan bir akıl yürütme kullanılıyorsa da, önce tanımlamamız sonra da birbiriyle ilişkilendirmek zorunda olduğumuz birkaç adım var. Ayrıntılardan çok hoşlanmıyorsanız, işin özüne gelmek isteyebilirsiniz. Eğer öyle olursa, Bell'in keşfinin doğurduğu sonuçların ve ilgili tartışmanın özetini bulacağınız "Duman Yok, Ateş Var" başlığına (s. 137) geçebilirsiniz.

Bell ve Spin

John Bell, Einstein-Podolsky-Rosen makalesinin ana fikrini felsefi düşünce alanından çıkarıp sağlam deneysel ölçümle cevaplanabilecek bir soruya dönüştürdü. Şaşırtıcı bir biçimde, bunu başarabilmek için tek yapması gereken, kuantum belirsizliğinin aynı anda belirlememizi engellediği yalnızca iki özelliğin -örneğin konum ve hız- olmadığı bir durumu göz önüne almak oldu. Bell, eğer aynı anda belirsizliğin şemsiyesi altına giren üç veya daha fazla özellik varsa -birini ölçtüğünüzde diğerlerini bozduğunuz ve haklarında hiçbir şey bilemediğiniz üç ve-

ya daha fazla özellik- gerçeklik sorusunu ele alan bir deney *olduğunu* gösterdi. Böyle en basit örnek, *spin* (dönme) olarak bilinen bir şeyle ilgilidir.

1920'lerden beri fizikçiler, parçacıkların spinleri olduğunu, kaleye doğru giderken aynı zamanda kendi çevresinde dönen bir futbol topuna benzer şekilde döndüklerini biliyordu. Yine de kuantum parçacık spini, bu klasik örnekten temel birkaç noktada farklıdır ve şu ikisi bizim için çok önemlidir: Birincisi, parçacıklar -örneğin elektronlar ve fotonlar- herhangi bir belirli ekseninde, hiçbir zaman değişmeyen bir hızla, sadece saat yönünde ve saat yönünün tersi yönde dönebilir; bir parçacığın dönme eksenini yön değiştirebilir ama dönme hızı artamaz ve azalmaz. ikincisi, kuantum belirsizliğinin spin hareketine uygulanması (nasıl bir parçacığın konumunu ve hızını aynı anda belirleyemiyorsanız) bir parçacığın spinini de birden fazla ekseninde aynı anda belirleyemeyeceğinizi gösterir. Örneğin, bir futbol topu kuzeydoğu yönündeki bir ekseninde dönüyorsa, dönmesi kuzey yönündeki ve doğu yönündeki iki ekseninde paylaşıyor demektir ve uygun bir ölçümle, her iki eksenindeki dönüş oranlarını belirleyebilirsiniz. Ama eğer bir elektronun rasgele seçilmiş bir eksenindeki spinini ölçerseniz, hiçbir zaman kesirli bir sonuç bulamazsınız. Hiçbir zaman. Sanki ölçme işleminin kendisi elektronu, tüm dönme hareketlerini toplayıp sizin üzerine odaklanmış bulunduğunuz ekseninde, ya saat yönünde ya da bunun tersi yönde dönmeye zorluyor gibidir. Dahası, ölçümünüzün elektronun spini üzerindeki etkisinden dolayı, elektronun siz ölçüm yapmadan önce yatay ekseninde ya da ileri-geri ekseninde ya da herhangi bir başka ekseninde nasıl döndüğünü belirleme yeteneğinizi kaybedersiniz. Kuantum mekaniğine özgü spinin bu özelliklerini tam olarak göz önünde canlandırmak zordur ve bu zorluk klasik imgelerin kuantum dünyasının gerçek doğasını ortaya koymadaki sınırlarını gösterir. Bununla birlikte kuantum kuramının matematiği ve on yıllardır yapılan deneyler, kuantum spininin bu özelliklere sahip olduğunu kuşkuyla yer bırakmayacak şekilde gösteriyor.

Spini işin içine katmamızın sebebi parçacık fiziğinin anlaşılması zor dünyasına girmek değil. Tersine, parçacık dönmesi örneği birazdan gerçeklik sorusuna hiç beklenmedik cevaplar bulmamıza yardım edecek basit bir laboratuvar görevi yapacak. Yani, her ne kadar biz kuantum belirsizliği yüzünden belli bir anda sadece tek bir eksendeki spinini bilebilsek bile, bir parçacığın her bir ekseninde belirli bir miktar spin *var mı?* Yoksa belirsizlik ilkesi bize başka bir şey mi anlatıyor? Gerçeklikle ilgili tüm klasik kavrayışların tersine, bir parçacığın aynı anda böyle niteliklere sahip olmadığını ve olamayacağını mı söylüyor? Herhangi bir verili ekseninde belli bir spin olmadan, bir kuantum tereddütü halinde bekleyen bir parçacığın, bir kimse veya bir şey onu ölçtüğü anda birden bire, seçilen bir ekseninde, seçilme olasılığı kuantum kuramı tarafından belirlenen belli bir spin değerine (saat yönünde veya bunun tersi yönde) sahip olduğunu mu söylüyor? Parçacıkların konumları ve hızları ile ilgili olarak sorduğumuz soruyla temelde aynı olan bu soruyla uğraşırken, spin kullanarak kuantum gerçekliği dünyasına girebilir ve spin örneğini büyük ölçüde aşan cevaplar bulabiliriz. Şimdi bunu görelim.

Fizikçi David Bohm¹¹ tarafından açıkça gösterildiği gibi, Einstein, Podolsky ve Rosen'in akıl yürütme biçimi, parçacıkların seçilmiş bütün eksenlerde belli bir spinleri olup olmadığı sorusunu kapsayacak biçimde rahatça genişletilebilir. Şöyle: Biri laboratuvarın sağ tarafında, diğeri de sol tarafında olmak üzere, bir elektronun spinini ölçebilecek iki detektör kurun. Bu iki detektörün tam ortasındaki, yani detektörlere eşit uzaklıktaki bir kaynaktan ters yönler doğru iki elektron çıkmasını sağlayın, öyle ki (daha önceki örnekte olduğu gibi elektronların konumları ve hızları arasında değil de) spinleri arasında bir bağıntı bulunsun, lının nasıl yapıldığının ayrıntıları önemli değil; önemli olan yapılabileceği hatta kolaylıkla yapılabileceği. Bağıntı, eğer soldaki ve sağdaki detektörler aynı yöndeki eksenlerdeki spinleri ölçecek şekilde kurulmuşlarsa, ikisi de aynı sonucu alacak şekilde ayarlanabilir: Eğer detektörler kendilerine doğru gelen elektronların düşey eksenindeki spinlerini ölçecek şekilde ayarlanmış-

sa ve soldaki detektör elektronun spinin saat yönünde olduğunu bulmuşsa, sağdaki de kendi yönüne gelen elektronun spininin saat yönünde olduğunu bulacaktır. Eğer detektörler düşey eksenenden saat yönünde 60 derece açı yapan bir eksendeki spinleri ölçecek şekilde ayarlanmışsa ve soldaki detektör elektronun spinin saat yönünün tersinde olduğunu bulmuşsa, sağdaki de aynısını bulacaktır. Kuantum mekaniğinde yapabileceğimizin en iyisi yine detektörlerin saat yönünde ve saat yönünün tersi yönde spin bulmaları olasılığını hesaplamaktır, ama detektörlerden biri ne bulduysa diğerinin de aynısını bulacağını yüzde yüz kesinlikle söyleyebiliriz.*

Einstein, Podolski ve Rosen tartışmasına Bohm'un getirdiği yorum, her anlamda konum ve hız üzerine odaklanmış olan özgün tartışmayla aynıdır. Parçacıkların spinleri arasındaki bağıntı sayesinde sola giden parçacığın herhangi bir eksendeki spinini dolaylı yoldan, yani sağa doğru giden eşinin aynı yöndeki eksenindeki spinini ölçerek bulabiliriz. Bu ölçüm laboratuvarın sağ tarafında yapıldığı için, sola doğru giden parçacığı herhangi bir şekilde etkileyemez. Dolayısıyla, sola doğru giden parçacık baştan beri şimdi ölçülen spin değerine sahip olmuş olmalıdır. Bizim tek yaptığımız dolaylı da oldu bu değeri ölçmek olmuştur. Dahası, bu ölçümü istediğimiz *herhangi bir* ekseninde yapmayı seçebileceğimiz için, aynı sonuç bütün eksenler için geçerli olmalıdır: Her ne kadar her seferinde yalnızca bir eksendeki spinini net olarak ölçbilsek de, sola giden parçacığın bütün eksenlerde belli bir spini olmalıdır. Elbette sola ve sağa giden parçacıkların rolleri değiştirilebilir, bu da her parçacığın her ekseninde belli bir spine sahip olduğu sonucuna yol açar.¹²

Bu aşamada, konum/hız örneğinden açık bir fark olmadığı için, siz de Pauli gibi böyle konular üzerinde kala yormanın

* Dilde olabilecek karışıklıklardan kaçınmak için elektronların spinlerini tamamen bağıntılı olarak (yani aynı yönde) tanımlıyorum, ama yaygın tanımlamada elektronların spinleri tamamen ters bağıntılı olarak tanımlanır (yani ters yönde): Bir detektör ne bulursa, diğer detektör onun tam tersini bulur. Yaygın tanımlamayla karşılaştırmak için, detektörlerden birindeki bütün "saat yönünde" veya "saat yönünün tersinde" yazan etiketlerin yerlerini değiştirdiğimi düşünün.

bir anlamı olmadığını düşünebilirsiniz. Eğer farklı eksenlerdeki spinleri gerçekten ölçemiyorsanız, yine de parçacığın her eksen- de belli bir spini -saat yönünde veya saat yönünün tersine- olup olmadığını düşünmenin ne amacı olabilir? Kuantum mekaniği ve daha genel olarak fizik, dünyanın yalnızca ölçülebilir özelliklerini açıklamakla yükümlüdür. Zaten Bohm da, Einstein, Podolsky ve Rosen de bu ölçümlerin yapılabileceğini iddia etmedi. Bunun yerine, her ne kadar ölçüm değerlerini bilemiyor olsak da, parçacıkların belirsizlik ilkesinin yasakladığı özelliklere sahip olduğu fikrini ortaya attılar. Bu özellikler *gizli özellikler* veya daha yaygın şekliyle *gizli değişkenler* olarak bilinir.

John Bell in her şeyi değiştirdiği nokta burasıdır. Bell, bir parçacığın birden çok eksendeki spinini aslında belirleyemesek bile, eğer bütün eksenlerde spini *varsa*, o zaman bu spinin sını- nabilir, gözlenebilir sonuçları olduğunu keşfetti.

Gerçeklik Sınaması

Bell in görüşünün ana fikrini anlamak için tekrar Mulder ve Scully'ye dönelim ve ikisinin de, içinde yine titanyum kutular olan birer paket almış olduğunu düşünelim. Ama bu sefer titan- yum kutular değişik. Her birinin bir yerine üç kapağı var: Biri üstte, biri yanda, biri de önde.¹³ Paketteki mektupta, bir kutu- nun üç kapağından herhangi biri açıldığında, o kutunun içindeki kürenin rasgele kırmızıya da mavi yanmayacağı seçeceği yazı- lı. Eğer kapaklarından biri açılan kutunun o kapağı değil de baş- ka bir kapağı açılırsa kürenin rasgele seçeceği renk farklı olabi- lir, ama bir kapak açılıp da küre ışığını yaktığında, başka bir ka- pak açılmış olsaydı ışığın hangi renk olacağını belirlemenin artık hiç yolu yok. (Fiziğe uygularsak bu özellik kuantum belirsizliği- ne karşılık gelir: Bir özelliği ölçtünüzse diğer özellikler hakkın- da hiçbir şey belirleyemezsiniz. Mektupta son olarak, iki titan- yum kutu seti arasındayine esrarengiz bir bağlantı olduğu yazı- lı: Her ne kadar bütün küreler içinde bulundukları kutunun üç kapağından herhangi biri açıldığında hangi renk ışık verecekle- rini *rasgele* seçiyorlarsa da, mektup eğer numarası *aynı* olan ku-

tularındaki *aynı* kapağı açacak olurlarsa hem Mulder'ın hem de Scully'nin aynı renkte ışık çıktığını göreceğini öngörüyor. Yani Mulder 1 numaralı kutusunun üst kapağını açıp mavi ışık görürse, mektuba göre Scully de 1 numaralı kutusunun üst kapağını açtığında mavi ışık görecektir; Mulder 2 numaralı kutusunun yan kapağını açtığında kırmızı ışık görürse, gene mektuba göre Scully de 2 numaralı kutusunun yan kapağını açtığında kırmızı ışık görecektir. Gerçekten Scully ve Mulder, telefonda hangi kutunun hangi kapağını açacaklarını kararlaştırarak ilk on beş yirmi kutuyu açtıklarında, mektuptaki öngörülerin doğru olduğunu anlıyorlar.

Her ne kadar Mulder ve Scullyye öncekinden daha karmaşık bir problem verilmişse de, ilk bakışta Scully'nin önceki duruma uyguladığı akıl yürütme biçimi burada da uygulanabilir gibi görünüyor.

Scully "Mulder, bu da dünkü paket kadar aptalca hazırlanmış. Yine ortada gizemli bir şey yok. Her kutunun içindeki küre önceden programlanmış olmalı. Anlamıyor musun?" diyor.

Mulder "Ama şimdi üç kapak var" diyerek Scully'yi uyarıyor, "o nedenle kutu, hangi kapağı açacağımızı önceden 'bilemez', öyle değil mi?"

"Önceden bilmesi gerekmiyor. Bu, programlamanın bir parçası. Bak, şöyle bir örnek vereyim: Henüz açmadığımız 37 numaralı kutuyu al. Ben de aynısını yapacağım. Şimdi, benim 37 numaralı kutumun içindeki kürenin, kutunun üst kapağı açıldığında kırmızı, yan kapağı açıldığında mavi, ön kapağı açıldığında da kırmızı ışık verecek şekilde programlandığını varsayalım. Ben bu programa *kırmızı*, *mavi*, *kırmızı* adını veriyorum. O zaman bu kutuları bize gönderen her kimse, senin 37 numaralı kutunu da aynı şekilde programlamışsa ve ikimiz de aynı kapağı açarsak tabii ki aynı rengi göreceğiz. 'Esrarengiz bağlantı' bu kadar: Eğer sendeki ve bende aynı numaralı kutular aynı şekilde programlanmışsa, o zaman aynı kapakları açtığımızda aynı renkleri göreceğiz demektir. Ortada gizemli bir şey *yok*" diye cevaplıyor Scully.

Ama Mulder kürelerin programlandığına inanmıyor, mektuba inanıyor. Kutularından birinin herhangi bir kapağı açıldığında, kürelerin kırmızı ve mavi renkli ışıklardan birini rasgele seçtiğini ve bu nedenle de kendisinin ve Scully'nin kutuları arasında uzun erimli, esrarengiz bir bağ *olduğunu* düşünüyor.

Kim haklı? Küreleri, rasgele yapıldığı varsayılan renk seçiminden önce ve seçim sırasında incelemenin bir yolu olmadığı için (herhangi bir müdahalede bulunulduğunda kürelerin hemen rasgele bir şekilde kırmızı veya mavi renklerden birini seçeceğini, böylece kürelerin aslında nasıl çalıştığını araştırmamanın olanaksız hale geleceğini hatırlayın) Scully'nin mi yoksa Mulder'ın mı haklı olduğunu kesin olarak anlamak olanaksız gibi görünüyor.

Ama, biraz düşününce, Mulder, bu soruyu kesin olarak cevaplayacak bir deney yapabileceklerini anlar. Mulder'ın düşüncesi hayli basit olmakla birlikte şimdiye kadar ele aldığımız konuların gerektirdiğinden biraz daha ayrıntılı bir matematiksel akıl yürütme gerektiriyor. Ayrıntıları anlamak için göstereceğiniz çaba boşa gitmeyecek -zaten o kadar da fazla ayrıntı yok- ama bir kısmını anlayamasanız da dert etmeyin, birazdan sonucunu özetleyeceğiz.

Mulder, kendisinin ve Scully'nin o ana kadar, yalnızca aynı numaralı kutuların aynı kapaklarını açarlarsa ne olacağı konusunda düşündüklerini fark ediyor. Heyecanlı bir şekilde Scullyyi tekrar arayıp her zaman aynı kapakları açmak yerine, kutularının her birindeki kapakları rasgele ve birbirlerinden bağımsız bir şekilde açmayı seçerlerse çok daha fazla şey öğreneceklerini söylüyor.

"Mulder, yapma. Bırak da tatilimin keyfini çıkarayım. Bunu yaparak ne öğrenebiliriz ki?"

"Senin açıklamanın doğru olup olmadığını anlayabiliriz."

"Tamam, anlat o zaman."

"Çok basit. Eğer sen haklıysan, şunu anlıyorum: Eğer verili bir kutunun hangi kapağını açacağımızı birbirimizden bağımsız ve rasgele seçer ve gördüğümüz ışığın rengini yazarsak, bunu birçok kutu için tekrarladıktan sonra, baktığımız kutuların top-

lamının yüzde 50'sinden *fazlasında* aynı rengi gördüğümüz sonucuna ulaşmamız gerekir. Ama öyle olmazsa, kutuların yüzde 50'sinden fazlasında aynı renkleri gördüğümüz konusunda anlaşılmazsak, o zaman sen haklı değilsin demektir" diye devam ediyor Mulder.

"Öyle mi, o nasıl oluyor?" Scully'nin ilgisi biraz artmıştır.

Mulder bu soruyu "Şöyle bir örnek vereyim: Varsayalım sen haklısın ve her küre bir programa göre davranıyor. Durumu somutlaştırmak için, belirli bir kutudaki kürenin programının *mavi, mavi, kırmızı* olduğunu düşünelim. Her ikimiz de üç kapak arasından seçim yaptığımıza göre, bu kutudaki kapakları toplam dokuz olası kombinasyonda açabiliriz. Örneğin ben kendi kutumdaki üst kapağı açmayı seçerken, sen kendi kutundaki yan kapağı açmayı seçebilirsin veya ben ön kapağı seçerken sen üst kapağı seçebilirsin." diyerek cevaplıyor.

"Evet, elbette" diye söze giriyor Scully. "Eğer üst kapağa 1, yan kapağa 2, ön kapağa 3 dersek, o zaman dokuz olası kombinasyon da şöyle olur: (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3)"

"Evet, doğru. İşte önemli nokta da burada. Dikkat edersen, bu dokuz olası kombinasyondan beşi -(1,1), (2,2), (3,3), (1,2), (2,1)- kutularımızdaki kürelerden aynı renkte ışık çıktığını görmemize neden olacak. Bunların ilk üçünde aynı kapağı seçiyoruz, bildiğimiz gibi bu da *her zaman* aynı renkte ışık görmemizle sonuçlanıyor. Diğer iki kombinasyon da, yani (1,2) ve (2,1) de aynı rengi görmemizle sonuçlanıyor, çünkü program 1. ve 2. kapaklardan biri ya da diğeri açıldığında aynı renk -mavi- görülecek şekilde yapılmış. 5 de 9'un yarısından fazla olduğuna göre, olası kapak kombinasyonlarının yarısından fazlasında -yani yüzde ellisinden fazlasında- küreler aynı renkte ışık verecek." diyor Mulder.

Scully "Ama bir dakika! Bu örnek yalnızca bir programa, *mavi, mavi, kırmızı* programına ait. Ben açıklamamda farklı numaralı kutuların farklı programları olabileceğini ve genel olarak da öyle olacağını söylemiştim" diyerek itiraz ediyor.

"Aslında hiç fark etmez. Bu sonuç, tüm olası programlar için geçerli. Gördüğün gibi, benim *mavi, mavi, kırmızı* programıyla ilgili düşünüş şeklim yalnızca programdaki iki rengin aynı olduğu gerçeğine dayanıyor; bu yüzden aynı sonuç *kırmızı, kırmızı, mavi ve kırmızı, mavi, kırmızı* vb tüm programlar için geçerli. Her programda renklerin en azından ikisi aynı olmak zorunda. Gerçekten farklı olanlar, üç rengin de aynı olduğu programlar: *kırmızı, kırmızı, kırmızı ve mavi, mavi, mavi*. Ama bu programlardan herhangi biriyle programlanmış kutular için, hangi kapağı açarsak açalım aynı rengi göreceğiz. Dolayısıyla üzerinde fikir birliği varmamız gereken oran azalmayacak, tersine artacak. Onun için, eğer senin açıklaman doğruysa ve kutular programlanmışsa -bu programlar bir kutudan diğerine değişse bile- gördüğümüz renklerin aynı olduğu konusunda yüzde 50'den *yüksek* bir oranda anlaşılmamız gerekiyor."

Tartışma bu. Zor kısmını geride bıraktık. Temel nokta, Scully'nin haklı olup olmadığını ve her kürenin, hangi kapağın açıldığına bağlı olarak hangi renkte ışık çıkacağını kesin olarak belirleyen bir programa göre işleyip işlemediğini belirleyecek bir deneyin bulunması. Scully ve Mulder, kutularındaki üç kapaktan hangisini açacaklarını birbirlerinden bağımsız olarak ve rasgele bir şekilde seçer ve sonra da gördükleri rengi karşılaştırmalara, kutuların yüzde 50'sinden *fazlasında* aynı rengi gördükleri konusunda anlaşıyor olmaları gerekir.

Aşağıdaki başlıkta yapacağımız gibi bunu fizik diline çevirirsek, Mulder'ın fark ettiği şey John Bell'in keşfettiği şeydir.

Melekleri Açılarla Saymak

Bu sonucun fizik diline çevirisi basittir. Birisi laboratuvarın sağ tarafında diğeri ise sol tarafında olan (daha önce bahsettiğimiz deneyde de anlatıldığı gibi) gelen bir parçacığın örneğin bir elektronun spinini ölçen iki detektörümüz olsun. Detektörler spinin ölçüleceği eksenini seçmenizi gerektiriyor (düşey, yatay, öne-arkaya veya bunların arasında kalan sayılamayacak kadar çok eksenenden biri). Basit olsun diye, detektörlerimizin yalnızca

üç eksene izin verdiğini düşünelim. Deneyi her yaptığınızda gelen elektronun seçtiğiniz eksen de ya saat yönünde ya da saat yönünün tersinde döndüğünü bulacaksınız.

Einstein, Podolsky ve Rosen e göre, gelen her elektron detektöre kendi "programı" diyebileceğimiz bir bilgiyle girer: Einstein, Podolski ve Rosen, gizli olsa bile, ölçemiyor olsanız bile, her elektronun seçilen bütün eksenlerde belli bir miktar spini -saat yönünde veya saat yönünün tersinde- olduğunu öne sürdü. Bu nedenle, bir elektron bir detektöre girdiğinde, hangi eksen seçmiş olursanız olun, spininin saat yönünde mi yoksa saat yönünün tersinde mi olduğunu ölçeceğinizi kesin olarak belirler. Örneğin, üç eksen de saat yönünde dönmekte olan elektronun programı *saat yönünde, saat yönünde, saat yönünde* iken, ilk iki eksen de saat yönünde, üçüncü eksen de ise saat yönünün tersinde dönem elektronun programı *saat yönünde, saat yönünde, saat yönünün tersinde* olacaktır vb. Einstein, Podolsky ve Rosen, sola doğru giden elektronla sağa doğru giden elektron arasındaki bağıntıyı açıklamak için bu elektronların spinlerinin aynı olduğunu, bu nedenle de detektörlere aynı programlarla girdiklerini öne sürdü. Nitekim, eğer soldaki ve sağdaki detektörler için aynı eksenler seçilirse, spin detektörleri aynı sonuçları bulacaktır.

Dikkat edilirse bu spin detektörleri, Scully ve Mulder'ın uğraştığı konuları aynen ama daha basit biçimde tekrarlıyor: Titanyum kutulardaki kapaklardan birini seçmek yerine spin eksenlerini seçiyoruz; kırmızı veya mavi ışık görmek yerine saat yönünde veya saat yönünün tersinde spin ölçüyoruz. Dolayısıyla, nasıl aynı numarayı taşıyan iki kutuda aynı kapakları açmak aynı renkte ışık görmekle sonuçlanıyorsa, iki detektörde aynı eksen seçmek de aynı spin yönünün bulunmasıyla sonuçlanır. Gene, nasıl bir titanyum kutudaki belli bir kapağın açılması, eğer başka bir kapak açılsaydı hangi renkte ışık görüleceğini bilebilmemizi engelliyorsa, elektronun belli bir eksenindeki spininin belirlenmesi de -kuantum belirsizliği sayesinde- eğer başka bir eksen seçmiş olsaydık bulacağımız spinin hangi yönde olacağını bilmemizi engeller.

Tüm bu anlatılanlar, Mulder'ın kimin haklı olduğu yolundaki çözümlemesinin, Dünya dışından gelen kutulara olduğu kadar bu duruma da uygulanabileceğini gösteriyor. Eğer Einstein, Podolski ve Rosen haklıysa, gerçekten her elektronun üç ekseninde de belli bir spin değeri varsa -her elektronun, olası üç spin ölçümünün de sonucunu kesin olarak belirleyen bir "programı" varsa- o zaman şu öngöründe bulunabiliriz: Deneyin birçok kez tekrarlanması -her detektör için eksenlerin bağımsız ve rasgele seçilerek tekrarlanması- sonucunda elde edilen verilerin incelenmesi, *elektronların spinlerinin deneylerin yarısından fazlasında -her ikisi de saat yönünde veya her ikisi de saat yönünün tersinde olmak üzere- uyumluğunu gösterecektir.* Eğer elektronların spinleri deneylerin yüzde 50'sinden fazlasında uyuşmuyorsa Einstein, Podolsky ve Rosen haksızdır.

Bell'in keşfi budur. Bu keşif, elektronun birden fazla eksendeki spinini gerçekten ölçemeseniz bile -elektronun detektöre verdiği programı "okuyamasanız" bile- elektronun birden fazla ekseninde belli bir spin olup olmadığını öğrenmeye çalışmanın, bir iğnenin ucundaki melekleri saymakla aynı anlama *gelmediğini* gösterir. Tam aksine Bell bir parçacığın belirli spin değerlerine sahip olmasına ilişkin gerçek ve sınanabilir bir sonuç olduğunu buldu. Uç açıda, üç ayrı eksen kullanarak Pauli'nin meleklerinin sayılabilmesi için bir yol buldu.

Duman Yok, Ateş Var

Kaçırdığınız ayrıntılar olabilir diye, şimdiye kadar elde ettiklerimizi özetleyelim. Kuantum mekaniği Heisenberg'in belirsizlik ilkesi yoluyla, dünyadaki bazı özelliklerin -örneğin bir parçacığın konumu ve hızı, bir parçacığın çeşitli eksenlerdeki spinini aynı anda kesin değerler alamayacağını öne sürer. *Kuantum kuramına göre bir parçacık, kesin bir konuma ve kesin bir hıza sahip olamaz; bir parçacık birden fazla ekseninde belli bir spine (saat yönünde veya saat yönünün tersinde) sahip olamaz; bir parçacık belirsizlik çizgisinin iki ayrı tarafında bulunan şeyler söz konusu olduğunda belli özelliklere aynı anda sahip olamaz.* Ter-

sine, parçacıklar tüm olasılıkların belirsiz, şekilsiz ve olasılıksal karışımında yüzer; ancak ölçüm yapıldığı zaman, pek çok sonuç arasından kesin bir sonuç seçilmiş olur. Bunun, klasik fiziğin gösterdiği gerçeklik resminden çok farklı bir gerçeklik resmi olduğu açık.

Kuantum mekaniği konusunda her zaman kuşkucu olan Einstein, çalışma arkadaşları Podolsky ve Rosen ile birlikte, kuantum mekaniğinin bu yönünü kuramın kendisine karşı bir silah olarak kullanmaya çalıştı. Einstein, Podolski ve Rosen, kuantum mekaniği böylesi özelliklerin aynı anda belirlenmesine izin vermiyor olsa bile, parçacıkların konum ve hızlarının yine de kesin değerlerinin olduğunu; parçacıkların bütün eksenlerde belli spin değerleri olduğunu; parçacıkların, kuantum belirsizliğinin yasakladığı her şey için kesin değerleri olduğunu öne sürdüler. Yani onlara göre kuantum mekaniği fiziksel gerçekliğin her yönünü ele alamadığının için -bir parçacığın konumunu ve hızını aynı anda ele alamaz; bir parçacığın birden fazla eksenindeki spinini ele alamaz- tam bir kuram değildi.

Uzun bir süre boyunca Einstein, Podolski ve Rosen'in haklı olup olmadığı konusu, fizikten çok metafiziğin sorunu gibi görüldü. Pauli'nin söylediği gibi, eğer kuantum belirsizliğinin yasakladığı özellikleri gerçekten ölçemiyorsanız, bu özellikler gerçekliğin gizli katmanları arasında var olsa bile ne fark eder? Ama Bell, Einstein'ın, Bohr'un ve yirminci yüzyılın tüm diğer kuramsal fizik devlerinin göremediği bir şey bulmuştu: Doğrudan ölçülemiyor veya belirlenemiyor olsalar bile, bazı şeylerin sırf var olması bile fark eder ve bu fark deneysel olarak sınanabilir. Bell, eğer Einstein, Podolski ve Rosen haklı olsaydı, birbirlerinden çok uzağa yerleştirilmiş ve parçacıkların belli özelliklerini (yukarıda benimsediğimiz yaklaşıma göre, elektronların rasgele seçilmiş çeşitli eksenlerdeki spinlerini) ölçen detektörlerin bulunduğu sonuçların birbirleri ile yüzde 50'den fazla uyuması gerektiğini buldu.

Bell bu buluşu 1964 yılında yaptı, ama o zaman gerekli deneyleri yapacak teknoloji yoktu. 1970lerin başına gelindiğinde ise

vardı. Berkeley den Stuart Freedman ve John Clauser'ın başlattığı, Teksas A&M'den Edward Fry ve Randall Thompson'un sürdürdüğü, 1980'lerin başında da Fransa'da çalışan Alain Aspect ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmalarla bu deneylerin giderek yetkinleşen, etkileyici örnekleri yapıldı. Aspect deneyinde, birbirlerinden 13 metre uzaktaki iki detektörün tam ortasına yüksek enerjili kalsiyum atomları içeren bir kaynak yerleştirildi. Fizik kurallarından biliyoruz ki, her kalsiyum atomunun daha az enerjili, normal durumlarına dönerken iki foton salar; bu fotonlar, ters yönlere doğru hareket eder ve spinleri de, biraz önce incelediğimiz örnekteki spinleri bağıntılı elektronlar gibi, tamamen bağıntılıdır. Nitekim Aspect deneyinde de, detektörlerin ayarları aynı iken iki fotonun ölçülen spinlerinin aynı yönde olduğu görüldü. Eğer Aspect'in detektörlerine saat yönünde spin belirlediklerinde kırmızı, saat yönünün tersinde spin belirlediklerinde ise mavi ışık verecek bir düzenek eklenseydi, gelen fotonlar her iki detektörün de aynı renk ışık vermesine neden olacaktı.

Ama, ki burası son derece önemli, Aspect defalarca tekrarlanan bu deneyin sonucunda elde edilen verileri -soldaki ve sağdaki detektörlerin ayarlarının her zaman aynı olmadığı, her deneyde rasgele ve birbirinden bağımsız olarak değiştirildiği deneyler sonucunda elde edilen veriler- incelediğinde, *detektörlerin yüzde 50'den fazla oranda uyummadığını* buldu.

Bu, çok çarpıcı bir sonuç. Okuduğunuzda nefesinizin kesilmiş olması gerekir. Ama öyle olmamış olması olasılığına karşı, biraz daha açıklayayım. Aspect'in sonuçları, Einstein, Podolsky ve Rosen'in haklı olmadığını deneysel olarak -yani kuramsal olarak değil, düşünce yoluyla değil, bizzat doğa sayesinde- kanıtlıyordu. Bu da Einstein, Podolski ve Rosen'in, parçacıkların kesin değerler almaları belirsizlik ilkesi tarafından yasaklanmış özelliklerinin aslında kesin değerleri -örneğin birbirinden farklı eksenlerdeki spin değerleri- olduğu sonucuna ulaşırken kullandıkları akıl yürütme biçiminin, bir yerde yanlış olduğu anlamına geliyordu.

Nerede yanlış yapmış olabilirlerdi? Einstein, Podolsky ve Rosen'in görüşlerinin şu temel varsayıma dayandığını hatırlayalım: Eğer verili bir anda bir cismin bir özelliğini, ondan uzakta olan bir başka cisim üzerinde yapılan bir deneyle belirleyebiliyorsanız, o zaman ilk cisim de baştan beri bu özelliğe sahiptir. Bu varsayımın gerekçesi basit ve son derece mantıklıydı. İlk cisim *orada* iken, ölçme işlemi *burada* yapılıyordu. İki cisim uzamsal olarak ayrıkta, bu nedenle ölçme işleminin ilk cisim üzerinde bir etkisi olmuş olamazdı. Daha doğrusu, hiçbir şey ışıktan daha hızlı gitmediği için, bir cisim üzerinde yaptığınız ölçüm eğer diğer cisimde bir değişikliğe -örneğin diğer cismin seçilmiş bir ekseninde kendisiyle aynı dönme hareketine başlamasına- neden olacaksa olsaydı, bu ancak bir gecikmeyle gerçekleşebilirdi. En azından ışığın bu iki cisim arasındaki uzaklığı kat etmesi için gereken zaman kadar bir gecikme. Ama hem bizim soyut akıl yürütmemizde hem de gerçek deneylerde, iki parçacık detektörler tarafından *aynı* anda ölçülmüştü. Bu nedenle, ikinci parçacığı ölçerek birinci parçacık hakkında ne öğrenirsek öğrenelim, öğrendiğimiz o şey birinci parçacığın, bizim deney yapıp yapmamamızdan tümüyle bağımsız olarak sahip olduğu bir özellik ile ilgili olmak zorundadır. Kısaca, Einstein, Podolsky ve Rosen'in iddiasının merkezinde *oradaki bir cismin, buradaki bir cisme ne yaptığımızla hiç ilgisi olmadığı* düşüncesi vardır.

Ama az önce gördüğümüz gibi bu akıl yürütme, detektörlerin ölçümlerin yarısından fazlasında aynı sonuçları bulacağı öngörüsüne yol açıyor. Ama deneyler bu öngörüü çürütüyor. Ne kadar mantıklı görünürse görünsün, Einstein, Podolsky ve Rosen'in varsayımının, kuantum evreninin işleyiş biçimi olmayacağı sonucuna varmak zorunda kalıyoruz. Böylece, dolaylı ama üzerinde dikkatle düşünülmüş bu akıl yürütmeyle, deneyler *oradaki bir cismin, buradaki bir cisme ne yaptığımızla ilgisi olduğu* sonucuna varmamıza neden oluyor.

Kuantum mekaniği her ne kadar parçacıkların ölçüldükleri anda rasgele şu veya bu özelliği aldığını göstermekteyse de, rasgeleliğin uzayda ilişkilendirilebileceğini öğreniyoruz. Uygun bi-

çimde hazırlanmış parçacık çiftleri -bunlara dolanık parçacıklar denir- ölçülen özelliklerini bağımsız olarak edinmez. Sihirli bir çift zara benzerler. Biri Atlantic City'de, diğeri Las Vegas'ta atılır, her birinde *rasgele* bir sayı gelir, yine de her seferinde iki zardaki sayılar bir şekilde birbirinin aynı olur. Dolanık parçacıklar da benzer şekilde davranır, tek farkları ortada sihir olmayışıdır. *Dolanık parçacıklar, uzamsal olarak ayrık olsalar da kendi başlarına davranmazlar.*

Einstein, Podolsky ve Rosen, kuantum mekaniğinin getirdiği evren tanımının eksik olduğunu göstermek üzere yola çıkmışlardı. Bu üçlünün çalışmalarının esinlediği kuramsal fikirler ve deneysel sonuçlar, yarım yüzyıl sonra, onların analizini tepeteklak edip, akıl yürütmelerindeki en temel, sezgisel açıdan en mantıklı ve klasik olarak en anlamlı kısmının yanlış olduğu sonucuna varmamıza neden oluyor: Evren yerel değildir. Bir yerde yaptığınız şeyin sonucu (bu iki nokta arasında herhangi bir şey gitmese bile; herhangi bir şeyin bu iki nokta arasındaki yolculuğu tamamlayacak kadar vakti olmasa bile) başka bir yerde olan bir şeyle ilişkili olabilir. Eldeki veriler, Einstein, Podolsky ve Rosen'in parçacıklar en baştan belli ve bağıntılı özelliklere sahip olduğu için böyle uzun erimli bağıntıların ortaya çıktığı yolundaki önerisini çürütüyor. Tüm bunları bu kadar sarsıcı yapan da bu.¹⁴

1997'de Nicolas Gisin ve Cenevre Üniversitesi'ndeki çalışma arkadaşları, Aspect deneyinin bir benzerini yaptı. İki detektörün birbirinden 11 kilometre uzağa yerleştirildiği bu deneyde sonuçlar değişmedi. Fotonun dalga boyu olan mikro ölçeklere göre 11 kilometre çok büyük bir uzaklıktır. Aslında mesafe 11 milyon kilometre veya 11 milyar ışık yılı da olsa fark etmezdi. Detektörler birbirinden ne kadar uzağa yerleştirilirse yerleştirilsin, fotonların arasındaki dolanıklığın değişmeyeceğini düşünmek için çok neden var.

Bu insana son derece acayip geliyor. Ama artık *kuantum dolanıklığı* adı verilen bu olguyu destekleyen çok fazla kanıt var. Eğer iki foton dolanıksa, bunlardan birinin bir eksenindeki spininin başarıyla ölçülmesi, uzakta olan diğer fotonu aynı eksen-

aynı spine sahip olmaya "zorluyor". Bir fotonun ölçülmesi işlemi, uzaktaki fotonu olasılık sisinden çıkıp belli bir spin değeri, uzaktaki eşiyle kesinlikle aynı olan bir spin değeri seçmeye mecbur ediyor. Bu da insanın aklını durduruyor.*

Dolanıklık ve Özel Görelilik: Standart Görüş

"Zorluyor" ve "mecbur ediyor" ifadelerini tırnak içine aldım, çünkü bu ifadeler klasik sezgimize uygun anlamlar iletse de, bu bağlamdaki tam anlamları daha da büyük bir altüst oluşa hazır olup olmamamız bakımından çok önemlidir. Gündelik anlamıyla bu sözcükler istemli bir nedensellik imgesi akla getirir: Orada özel bir şey olmasına *neden olmak* veya *zorlamak* için burada bir şey yapmayı seçeriz. Eğer iki fotonun karşılıklı ilişkisinin doğru tanımı bu olsaydı, özel görelilik *zor durumda olurdu*. Deneyler gösteriyor ki, laboratuvar da deney yapan kişi açısından, bir fotonun spininin ölçüldüğü anda diğer foton da aynı spin özelliğini alıyor. Eğer soldaki fotondan sağdaki fotona bir şey gidiyor ve sağdaki fotonu soldaki fotonun spininin ölçüldüğü yönünde uyarıyor olsaydı, bu şeyin fotonlar arasında eşanlı olarak yol alması gerekirdi, ki bu da özel göreliliğin koyduğu hız limitiyle çelişir.

Özel görelilikle görünürdeki bu tip çelişkilerin yanılısına olduğu konusunda fizikçiler arasında fikir birliği vardır. Bunun sezgisel nedeni şudur: Fotonlar uzamsal olarak ayrık olsa bile, ortak kökenleri aralarında temel bir bağ oluşturur. Her ne kadar fotonlar birbirlerinden uzaklaşıp uzamsal olarak ayrık duruma gelseler de, geçmişleri onları birbirine bağlar; birbirlerinden uzak oldukları zaman bile hâlâ tek bir fiziksel sistemin parçasıdırlar. Yani aslında uzaktaki fotonu buradaki fotonla aynı

* Benim de aralarında olduğum birçok araştırmacı, Bell'in öne sürdüğü savın ve Aspect'in deneyinin, birbirinden çok uzaktaki parçacıklar arasında gözlenen dolanıklığın Scully'nin mantığıyla -bu dolanıklığı, parçacıkların (daha önce) bir arada iken edinmiş oldukları belirli özelliklere atfeden mantık- açıklanamayacağını gayet ikna edici bir şekilde gösterdiğini düşünüyor. Bazı araştırmacılar da, bunun bizi vardığı şu şaşırtıcı "yerel olmama" özelliğinden kaçınmaya, bu özelliğin etkisini azaltmaya çalışıyor. Onların kuşkuçuluğunu paylaşıyorum, ama bu seçeneklerden bazılarını ele alan ve genel okuyucuya Kitap eden bazı çalışmaları notlar bölümüne aldım.¹⁵

özellikleri almaya zorlayan ya da mecbur bırakan şey bu foton üzerindeki ölçüm değildir, iki foton birbirine öylesine yakından bağlıdır ki -uzamsal olarak birbirlerinden çok uzak olsalar bile- tek bir fiziksel varlığın parçaları olarak düşünülebilirler. O zaman, bu tek fiziksel varlıkla -iki foton içeren tek varlık- ilgili bir ölçümün varlığı etkilediğini söyleyebiliriz; yani her iki fotonu da aynı anda etkiler.

Bu tanımlamalar iki foton arasındaki bağı biraz daha inanılır hale getiriyorsa da, böyle söylendiğinde biraz belirsizdir. Yani, uzamsal olarak birbirinden ayrı olan iki şeyin tek olduğunu söylemek gerçekten ne anlama gelir? Şöyle bir sav biraz daha ke-sindir: Özel görelilik hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı gidemeyeceğini söylediği zaman, buradaki "hiçbir şey" bildiğimiz madde ve enerji anlamındadır. Ama eldeki durum daha karışık, çünkü görünüşe göre burada iki foton arasında herhangi bir madde veya enerji gitmiyor, yani hızınıölçeceğimiz bir şey yok. Bununla birlikte, özel görelilikle tam bir çatışma içinde olup olmadığımızı öğrenmenin bir yolu var. Madde ve enerjinin ortak bir özeliği, bir yerden bir yere giderken bilgi iletebilmeleridir. Bir radyo istasyonunda radyonuza gelen fotonlar bilgi taşır. İnternet kabloları aracılığı ile bilgisayarınıza gelen elektronlar bilgi taşır. Bu nedenle, herhangi bir şeyin -tanımlanmamış bir şey olsa bile- ışıktan hızlı gittiğinin öne sürüldüğü her durumda, bu şeyin bilgi iletip ilemediği veya en azından iletip iletemeyeceği sorusunu sormak bir turnusol kâğıdı görevi yapar. Cevap hayır ise standart mantık işler, ışıktan hızlı giden bir şey yoktur, özel göreliliğe meydan okunmamış olur. Pratikte, karışık bir sürecin özel görelilik yasalarını ihlal edip etmediği konusunda fizikçilerin sık sık başvurduğu test budur. (Şimdiye kadar hiçbir süreç bu testten geçemedi.) Bu testi elimizdeki sürece uygulayalım.

Sola giden ve sağa giden fotonların verili bir eksendeki spinleriniölçerek, bu fotonların birinden diğerine bilgi göndermenin bir yolu var mı? Cevap, hayır. Neden? Hem soldaki hem de sağdaki detektörlerin verdiği sonuçlar, *rasgele* bir saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde spinler dizisinden başka bir şey de-

ğildir; çünkü deneyin her yapılışında parçacığın bu yönde ya da diğeryönde dönüyor olma olasılığı eşittir. Hiçbir ölçümün sonucunu hiçbir şekilde öngöremez ve kontrol edemeyiz. Dolayısı ile her iki detektörden elde edilen *rasgele* sonuçlar listenin hiçbirinde ne bir mesaj, ne gizli bir şifre, ne de herhangi bir bilgi vardır. Bu iki listeyle ilgili tek ilginç şey aynı olmalarıdır, ama bu da listeler ışıktan daha yavaş bir araçla (örneğin fax, e-posta, telefon vb.) yan yana getirilip karşılaştırılmadan anlaşılamaz. Böylece standart sav, her ne kadar fotonlardan birinin spininin ölçülmesi eşanlı olarak diğerini etkiliyor gibi görünüyorsa da, bir fotondan diğerine hiçbir bilgi iletilmediği ve özel göreliliğin getirdiği hız sınırının geçerli olduğu sonucuna varır. Fizikçiler -listeler birbirinin aynısı olduğu için- spin sonuçlarının bağıntılı olduğunu, ama iki uzak konum arasında hiçbir şey gelip gitmediği için, bunun klasik bir neden-sonuç ilişkisini temsil etmediğini söylüyor.

Dolanıklık ve Özel Görelilik: Karşı Görüş

Bu kadar mı? Kuantum mekaniğinin yerel olmayışı ile özel görelilik arasındaki potansiyel çatışma ortadan kalktı mı? Büyük olasılıkla. Yukarıdaki görüşler temelinde, fizikçilerin çoğu , Aspect'in bağlantılı parçacıklarla ilgili olarak vardığı sonuçlar ile özel görelilik arasında uyumlu bir birliktelik olduğunu söyleyerek konuyu özetler. Kısacası özel görelilik paçayı sıyrıyor. Birçok fizikçi bunu ikna edici buluyor, bazıları işe işin başka yönleri de olduğu gibi rahatsız edici bir duygu içinde.

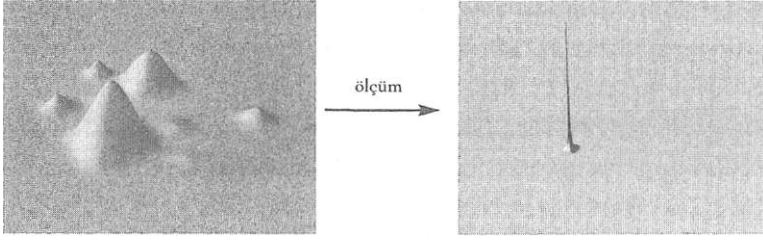
Ben sezgisel düzeyde her zaman birlikte var oluş görüşünü paylaştım, ama konunun çok hassas olduğu da inkâr edilemez bir gerçek. Ama sonuçta bütünsellik görüşü ne kadar savunulsa da, bilgi eksikliğine ne kadar dikkat çekilse de, kuantum mekaniğinin raslantısallığı tarafından yönetilen, birbirinden çok uzak iki parçacık biri ne yaparsa diğeri de anında aynı şeyi yapacak kadar "temasta" kalıyor. Bu da, ikisinin arasında ışıktan hızlı *bir şeyin* işlediğini gösteriyor.

Şu an durumumuz ne? Sağlam, evrensel olarak kabul gören bir cevap yok. Kimi fizikçiler ve filozoflar, ilerlemenin şimdiye

kadar yaptığımız tartışmanın yanlış yere odaklandığını anlamamıza bağlı olduğunu öne sürüyor. Çok haklı olarak, özel göreliliğin özünün ışığın bir hız sınırı koymasından çok, ışık hızının bütün gözlemcilerin kendi hareketlerinden bağımsız olarak üzerinde anlaştığı bir şey olması olduğuna işaret ediyorlar.¹⁶ Daha genel olarak, bu araştırmacılar özel göreliliğin temel ilkesinin, hiçbir gözlem noktasının diğerinden daha farklı olmaması olduğunu vurguluyor. O nedenle de, sabit hızla hareket eden tüm gözlemcilerin eşit olarak ele alınması ile bağlantılı parçacıklar üzerindeki deneysel sonuçlar uyuşursa, özel görelilikle aradaki gerginliğin çözümleneceğini öne sürüyorlar (pek çok kimse de buna katılıyor).¹⁷ Ama bu hedefe ulaşmak çok da kolay değil. Bunu somut olarak görmek için, eski model bir kuantum mekaniği ders kitabında Aspect deneyinin nasıl açıklandığını düşünelim.

Standart kuantum mekaniğinde, ölçüm yaparak bir parçacığın burada olduğunu bulduğumuzda, o parçacığın olasılık dalgasını değiştiririz: Önceki potansiyel sonuçlar aralığı, ölçümümüz sonucunda bulduğumuz tek gerçek sonuca indirgenir (Şekil 4.7). Fizikçiler, ölçümün olasılık dalgasının çökmesine neden olduğunu söyler. Bir yerdeki ilk olasılık dalgası ne kadar büyükse, dalganın o noktada çökme olasılığının o kadar büyük olduğunu -yani parçacığın o noktada bulunma olasılığının o kadar büyük olduğunu- düşünürler. Standart yaklaşımda çökme tüm evrende eşanlı olarak gerçekleşir: Bu düşünce biçimine göre, parçacığı burada bulduğunuzda *başka bir yerde* bulunma olasılığı anında sıfıra düşer, bu da olasılık dalgasının anında çökmesiyle ifade bulur.

Aspect deneyinde sola doğru giden fotonun spinini ölçülüp de diyelim herhangi bir ekseninde, saat yönünde olduğu bulunduğunda, fotonun tüm uzaydaki olasılık dalgası çöker ve saat yönünün tersinde spinin sıfır olmasına neden olur. Bu çökme her yerde olduğu için, sağa doğru giden fotonun olduğu yerde de olur. Öyle görünüyor ki, o zaman sağa giden fotonun olasılık dalgasının saat yönünün tersindeki bölümü de çökerek sıfır olur. Bu nedenle sağa giden foton sola giden fotondan ne kadar uzak



Şekil 4.7 Bir parçacık belli bir konumda gözleendiğinde, aynı parçacığı başka herhangi bir yerde bulma olasılığı sıfıra düşerken, gözleendiği noktadaki olasılık % 100'e çıkar.

olursa olsun, olasılık dalgası sola giden fotonun olasılık dalgasındaki değişiklikten anında etkilenir ve onun spini de seçilen ek-sende sola giden fotonla aynı olur. O zaman standart kuantum mekaniğine göre, ışıktan daha hızlı etkiden sorumlu olan şey olasılık dalgalarındaki bu ani değişikliktir.

Kuantum mekaniğinin matematiği bu niteliksel tartışmayı ke-sinleştirir. Nitekim çöken olasılık dalgalarının yol açtığı uzun erimli etkiler, Aspect'in soldaki ve sağdaki detektörlerinin (ek-senleri rasgele ve birbirinden bağımsız olarak seçildiğinde) han-gi sıklıkta aynı sonucu bulması gerektiği ile ilgili öngörülerini de-ğiştirir. Kesin cevabı bulmak matematiksel hesaplar yapmayı ge-rektirir (bu konuyla ilgileniyorsanız notlar bölümüne bakın¹⁸), ama hesap sonucunda da detektörlerin *tam olarak* yüzde 50 uyuşması gerektiği sonucu çıkar (yani daha önce Einstein, Po-dolski ve Rosen'in *yerelevren* hipotezini kullanarak vardığımız, yüzde 50'nin üzerinde uyuşma öngörüsünden farklı bir sonuç). Bu sonuç yani *yüzde 50 uyuşma*, Aspect'in deneylerinde *buldu-ğu sonuçla tamamen aynı*. Standart kuantum mekaniği verilerle etkileyici bir uyum gösteriyor.

Bu çok büyük bir başarı. Ama yine de bir pürüz var. *Yetmiş yıldan daha uzun bir süre sonra hiç kimse bir olasılık dalgası-nın nasıl çöktüğünü, hatta gerçekten çöküp çökmediğini bilmi-yor*. Olasılık dalgalarının çöktüğü *varsayımının*, kuantum kura-mının öngördüğü olasılıklar ile deneylerin ortaya koyduğu ke-sin sonuçlar arasında güçlü bir bağ oluşturduğu yıllar içinde ka-

nıtlanmıştı. Ama bu, bilmecelerle dolu bir varsayımdır. Bir ke-
re, çökme kuantum kuramının matemetiğinden kaynaklanmı-
yor; bu kuramı alıp oraya biz yerleştiriyoruz, çünkü bunu yap-
manın üzerinde fikir birliğine varılmış ve deneyle kanıtlanmış
bir yolu yok. İkincisi, New York'taki detektörünüzde bir elekt-
ron bulmakla bu elektronun Andromeda galaksisindeki olasılık
dalgasının anında sıfıra düşmesine sebep olmanız nasıl mümkün
olabilir? Elbette parçacığı New York'ta belirlediğinizde artık
Andromeda'da da olamayacağı kesin, ama hangi bilinmeyen me-
kanizma bunun böylesi bir etkinlikle gerçekleşmesini sağlayabi-
lir? Daha serbest bir dille, olasılık dalgasının Andromeda'daki
ve diğer her yerdeki parçaları eşanlı olarak sıfıra düşmeyi na-
sıl "biliyor"?¹⁹

Bu *kuantum mekaniksel ölçme problemi* 7. Bölüm de ele
alacağız (ve göreceğiz ki olasılık dalgalarının çökmesi varsa-
yımının kullanılmadığı başka öneriler de var). Ama şimdilik 3.
Bölüm de tartıştığımız gibi, bir bakış açısından eşanlı olan bir şe-
yin, hareket etmekte olan başka bir gözlemcinin bakış açısından
eşanlı olmayabileceğini akılda tutmak yeterli, (hareket eden bir
trende saatlerini ayarlayan Itchy ve Scratchy'yi hatırlayın.) Do-
layısı ile eğer bir olasılık dalgası bir gözlemciye göre tüm uzay-
da eşanlı olarak çökecek olsaydı, hareket etmekte olan bir baş-
ka gözlemciye göre eşanlı *çözmecektir*. Aslında, hareketleri-
ne bağlı olarak bazı gözlemciler soldaki fotonun önce ölçüldü-
ğünü bildirecek, aynı derecede güvenilir olan diğer gözlemciler-
se sağdaki fotonun önce ölçüldüğünü söyleyecektir. Bu neden-
le de olasılık dalgalarının çökmesi fikri doğru olsa bile, hangi öl-
çümün diğerini etkilediği -soldaki fotonun ölçülmesi mi, sağdaki
fotonun ölçülmesi mi- konusunda nesnel bir doğru olmayacak-
tır. O zaman da olasılık dalgalarının çökmesi, bir bakış noktası-
nı tercih ediyormuş gibi görünecekti: Çökmenin kendisine göre
uzayda eşanlı olduğu bakış noktasını, soldaki ve sağdaki ölçüm-
lerin kendisine göre aynı anda olduğu bakış noktasını. Ama belli
bir bakış noktasının seçimi, özel göreliliğin eşitlikçi özülüyle uyuş-
maz. Bu problemi aşmak için bazı yollar önerilmişse de, hangi-

sinin -o da, eğer mümkünse- daha başarılı olduğu yönünde tartışmalar sürüyor.²⁰

Yani her ne kadar çoğunluğa göre ortada uyumlu bir birlikte var olma durumu varsa da, bazı fizikçiler ve filozoflar kuantum mekanığı, dolanık parçacıklar ve özel görelilik arasındaki ilişkinin tam olarak ne olduğu sorusuna cevaplanmamış bir soru olarak bakar. Çoğunluğun bakış açısının sonunda değiştirilmez bir şekil alarak hâkim olması elbette olası ve bana göre mümkün. Ama tarih, bazı karışık ve temele ilişkin soruların bazen devrim tohumları attığını gösteriyor. Bu durumda da, ne olacağını ancak zaman gösterecek.

Peki Bütün Bu Bilgilerle Ne Yapacağız?

Bell'in akıl yürütmesi ve Aspect'in deneyleri, Einstein'ın gözünde canlandırdığı evrenin gerçeklikte değil, ancak zihinsel olarak var olabileceğini gösterdi. Einstein'ın evreni, burada yapılan bir şeyin, gene ancak burada olan şeylerle bağlantılı olabileceği bir evrendi. Onun bakış açısına göre fizik tam anlamıyla yereldi. Ama şimdi veriler bu düşüncesini boşa çıkarıyor, böyle bir evren olamayacağını gösteriyor.

Einstein'ın evreni bir de cisimlerin tüm olası fiziksel özniteliklerinin kesin değerler aldığı bir evrendi. Öznitelikler, bir deneyci onları ölçüp de "var edene" kadar var olmakla yok olmak arasında beklemeydi. Fizikçilerin çoğunluğu Einstein'ın bu noktada da hatalı olduğunu söyleyecektir. Çoğunluğun bu düşüncesine göre, parçacık özellikleri bir ölçümün onları zorlamasıyla var olur -bu noktayı 7. Bölüm de daha ayrıntılı olarak inceleyeceğiz. Parçacık özellikleri gözlenmedikleri ve çevreyle etkileşmedikleri zamanlarda, tek özelliği yalnızca bir ya da diğer potansiyel durumun gerçekleşmesi olasılığı olan, bulutsu, bulanık bir varlığa sahiptir. Bu fikrin en ateşli savunucuları, bir kimse ve bir şey Ay'a "bakmadığı" veya herhangi bir şekilde onunla etkileşmediği zaman Ay'ın gerçekten de *orada olmadığını* ileri sürer.

Bu konuda jüri kararını hâlâ vermedi. Einstein, Podolsky ve Rosen ölçüm yapılmasının birbirinden çok uzakta bulunan par-

çacıkların aynı özelliklere sahip olduğunu ortaya çıkarmasının tek anlamlı açıklamasının, parçacıkların baştan beri o belli özelliklere sahip olması olduğunu öne sürdüler (ortak geçmişleri nedeniyle özellikleri bağıntılıydı). Yıllar sonra Bell in çözümlemeleri ve Aspect'in verileri, sezgisel açıdan gayet kabul edilebilir olan ve parçacıkların her zaman kesin özelliklere sahip olduğu ön kabulüne dayanan bu önerinin, deneysel olarak gözlenen, yerel olmayan bağıntıları açıklamakta yetersiz kaldığını kanıtladı. Ama yerel olmayan bağıntıların gizemini açıklayamamak, parçacıkların her zaman kesin özelliklere sahip olması kavramının kendisinin de yanlış olduğu anlamına gelmez. Veriler evrenin yerel olmadığını gösteriyor, ama parçacıkların böyle saklı özelliklere sahip olmasının mümkün olmadığını göstermiyor.

Aslında Bohm 1950'lerde yerel olmama özelliğini *ve* saklı değişkenleri birleştiren kendi kuantum mekaniği yorumunu geliştirmişti. Bu yaklaşımda, her ikisini de aynı anda ölçemiyor olsak bile, parçacıkların her zaman hem kesin bir konumu hem de kesin bir hızı vardır. Bohm un yaklaşımı bildiğimiz kuantum mekaniği ile tamamen uyuşan öngörülerde bulunuyordu, ama formülasyonu yerel olmayışla ilgili daha da cesur bir öge içeriyordu: Belli bir konumdaki bir parçacığa etkiyen *kuvvetler* eşanlı olarak uzak konumlardaki koşullara bağlıydı. Yani bir anlamda Bohm'un yorumu, Einstein'ın klasik fiziğin sezgisel açıdan anlamlı -parçacıkların kesin özelliklere sahip olması- ancak kuantum devrimi tarafından terk edilmiş özelliklerinden bazılarını tekrar yerine koyma amacına nasıl yaklaşılabileceğimizi gösterir. Ama aynı zamanda bunu yapmanın yerel olmama özelliğinin daha da dikkat çekici bir yönünü kabul etmek gibi bir bedeli olduğunu da gösterir. Bu yüksek bedel karşısında, Einstein bu yaklaşımda pek de teselli bulamazdı.

Einstein, Podolsky, Rosen, Bohm, Bell, Aspect ve bu alanda önemli rol oynayan pek çok araştırmacının çalışmalarından çıkan en şaşırtıcı sonuç yerellikten vazgeçmek gerektiğidir. Şu anda evrenin çok farklı bölgelerinde bulunan cisimler, geçmişleri dolayısıyla, kuantum mekaniğine özgü, bağlantılı bir büt-

nün parçaları olabilir. Her ne kadar birbirinden çok uzak da olsalar böyle cisimler rasgele ama eşgüdümlü bir şekilde davranıyor olabilir.

Uzayın temel özelliklerinden birinin iki cismi birbirinden ayırması, farklı kılması olduğunu düşünmüşüzdür. Ama şimdi, kuantum mekaniğinin bu görüşü kökten değiştirdiğini görüyoruz. İki şey uzayla *birbirinden* çok uzakta, tamamen *ayrı olabilir ama gene de tam anlamıyla birbirlerinden bağımsız bir varlıkları olmayabilir*. Bir kuantum bağlantısı birinin özelliklerini diğerine bağlı kılarak bunları birleştiriyor olabilir. Uzay, böylece bağlantılı cisimleri birbirinden ayıramaz, bu karşılıklı bağları yok edemez. Bütün bir uzay böyle iki cisim arasındaki kuantum mekaniğine özgü karşılıklı bağları zayıflatamaz.

Bazıları bunu "her şey diğer her şeye bağlıdır" veya "kuantum mekaniği hepimizi tek bir evrensel bütünde dolanık kılar" şeklinde yorumlamıştır. Çünkü ne de olsa akıl yürütmemiz şöyle: Büyük Patlama da her şey bir yerden ortaya çıktı (bugün ayrı olduğunu düşündüğümüz her yer ta en başta tek bir yerdi diye düşünüyoruz). Her şey başlangıçtaki o aynı şeyden ortaya çıktığı için de (tıpkı bir kalsiyum atomunun saldığı iki foton gibi), her şey diğer her şeyle kuantum mekaniğine özgü bir biçimde bağlantılıdır.

Bu hoşuma gidiyor olsa da, böyle coşkulu sözler biraz abartılı. Kalsiyum atomundan çıkan iki fotonun arasında kuantum bağlantıları var elbette, ama o kadar hassaslar ki Aspect'in ve başkalarının yaptığı deneylerde, fotonların çıktıkları kaynaktan detektörlere ulaşana kadar kesinlikle hiçbir engelle karşılaşmaması gerekir. Eğer fotonlar detektörlerden birine ulaşmadan önce civardaki parçacıklarla çarpışır, deney düzeniğinin başka parçalarına çarparlarsa, fotonlar arasındaki kuantum bağlantılarını tanımlamak çok ama çok daha zor olur. Çünkü o durumda, iki fotonun özellikleri arasındaki bağıntıları aramak yerine, fotonlar ve çarpışmış olabilecekleri her şey arasında karmaşık bir bağıntı örüntüsü aramak gerekir. Bütün bu parçacıklar yollarına devam ederken daha da başka parçacıklarla çarpışacakları için, çevrey-

le bu etkileşimler sonucunda kuantum bağlantısı o kadar yayılacaktır ki saptanması olanaksız olacaktır. Fotonlar arasındaki ilk bağlantı hemen hemen silinmiş olacaktır.

Yine de bu bağlantıların var olması ve dikkatle düzenlenmiş laboratuvar koşullarında ciddi mesafelerde gözlenebiliyor olmaları gerçekten de şaşırtıcıdır. Bunun temel olarak bize gösterdiği şey uzayın bir zamanlar düşündüğümüz gibi olmadığıdır.

Ya zaman?

2 Zaman ve Yaşananlar

Donmuş Nehir

Zaman Akar mı?

Zaman, insanlığın şimdiye kadar karşılaştığı en bilindik ama en az anlaşılmış olan kavramlar arasındadır. Zamanın uçarcasına geçtiğini söyleriz, vakit nakittir deriz, zamandan tasarruf etmeye çalışırız ve zamanı boşa harcadığımız zaman üzülürüz. Ama acaba zaman *nedir*? Aziz Augustin ve Justice Potter Stewart onu ancak gördüğümüzde anlayacağımızı söylemiş olsalar da, üçüncü binyılın başlarındaki zaman kavrayışımız bundan biraz daha derinlikli olmalıdır. Bazı bakımlardan öyledir de. Ama diğer bazı bakımlardan öyle değildir. Yüzyıllar süren gizemden ve derin düşüncülerden sonra zamanın bazı sırları konusunda epeyce bir şeyler öğrenmiş olsak da pek çoğu hâlâ esrarını koruyor. Zaman nereden geldi? Zamanın olmadığı bir evren ne anlama gelir? Tıpkı uzayın birden fazla boyutu olduğu gibi zamanın da birden fazla boyutu olabilir mi? Geçmişe "yolculuk" yapabilir miyiz? Eğer yapabiliyorsak yolculuğumuzu

izleyen zaman dilimindeki olaylar zincirini değiştirebilir miyiz? Zamanın en küçük, mutlak bir birimi var mıdır? Acaba zaman, gerçekten evrenin yapısının temel bir bileşeni midir yoksa algılarımızı düzene koymaya yaramakla birlikte evrenin temel yasalarının yazımında kullanılan sözlükte bulunmayan bir yapı mıdır? Zaman, henüz keşfedilmemiş olan çok daha temel bir kavramdan kaynaklanan, türev bir kavram olabilir mi?

Bu sorulara tam ve tümüyle inandırıcı yanıtlar bulmak, modern bilimin en temel amaçları arasındadır. Ama bu önemli sorular, başka sorular da olmadığı anlamına gelmez. Zamana ilişkin gündelik deneyimlerde bile evrenin en karışık bilmeceleeri gizlidir.

Zaman ve Yaşananlar

Özel ve genel görelilik zamanın evrenselliği ve tekliğini paramparça etti. Bu kuramlar, her birimizin, Newton'un tanımladığı eski, evrensel zamanın bir parçasını alarak onu kendimizle birlikte taşımakta olduğumuzu gösterdi. Bu zaman, bizi dur durak bilmeden bir andan diğerine götüren kişisel saatimizdir. Görelilik kuramları bizi şaşırtmıştır çünkü kendi kişisel saatimiz kendi sezgisel zaman kavramımızla uyum içinde, düzgün, tekdüze işliyor olsa da başka saatlerle karşılaştırdığımızda ortaya bir fark çıkmaktadır. Sizin zamanınızla benim zamanım aynı olmak zorunda değildir.

Bunu verildiğini kabul edelim, peki acaba zamanın benim için gerçek anlamı *nedir*? Başkalarının zaman deneyimiyle bir karşılaştırmayı odak noktasına koymazsak, bir birey tarafından yaşıandığı ve kavrandığı biçimiyle zamanın tam karakteri nedir? Bu deneyimler acaba zamanın gerçek doğasını kesinlikle yansıtabiliyorlar mı? Ve bunlar bize gerçekliğin doğası konusunda neler söylüyorlar?

Kendi deneyimlerimiz bize, ezici bir şekilde, geçmişin gelecekte farklı olduğunu anlatır. Gelecek, pek çok olasılık sunuyor gibi görünürse de, geçmiş tek bir şey, gerçekleşen şey olmak zorundadır. Geleceği bir dereceye kadar etkileyebileceği-

mizi, yönlendirebileceğimizi veya belli bir kalıba sokabileceğimizi hissediyoruz ama geçmiş, değişmez gibi görünür. *Geçmiş* ile *gelecek* arasında, tıpkı bir film şeridinin, film makinesinin parlak ışığının önünden geçerken anlık olarak "şimdi"ye dönüşen kareleri gibi kendini bir andan diğerine, geçici bir tutunma noktası olarak yeniden yaratan, kaygan bir şimdi kavramı vardır. Sanki zaman, trampetçinin her vuruşuyla şimdi hedefine doğru sonsuz, tekdüze bir ritimle gidiyor gibidir.

Deneyimlerimiz bize aynı zamanda, olayların zaman içinde nasıl geliştiği konusunda apaçık bir yönlülük olduğunu söyler. Dökülen siit için ağlamanın bir yararı yoktur, süt bir kez dököldüyse asla geriye dönüşü yoktur: Yere saçılmış sütün toparlanarak yerden yükseldiğini ve mutfak tezgâhının üzerinde duran bardağın içine dolduğunu hiçbir zaman görmeyiz. Yaşadığımız dünya tutarlı bir şekilde, olayların her zaman *böyle* başlayıp şöyle bitebileceği, hiçbir zaman şöyle başlayıp *böyle* bitemeyeceği koşulundan asla sapmayan, tek yönlü bir zaman okuna takılı kalmış gibi görünmektedir.

Bu nedenle, deneyimlerimiz bize, zaman konusunda birbirinin üzerine kapanan iki şey öğretir. Birincisi, zaman *akmaktaymış gibi görünür*. Sanki zaman nehrinin kıyısında oturmuşuz ve çok güçlü bir akıntı, geleceği bize doğru getiriyor, zaman bize ulaştığında şimdi oluyor ve nehrin aşağısına, geçmişe doğru akıyor gibidir. Bu benzetme size çok edilgen geldiyse, çevirebilirsiniz: Acımasızca ileriye doğru akan zaman nehrinde sürüklenmekteyizdir, bu nehir bizi bir şimdi anından diğerine götürür, geçmiş, akan manzarayla birlikte geride kalırken gelecek, nehrin alt tarafında bizi bekler. (Deneyimlerimiz, zamanın bize en duygusal benzetmeler konusunda ilham verdiğini de öğretmiştir.) İkincisi, *zamanın bir oku varmış gibi görünür*. Zaman, olayların yalnızca bir zamansal sıralamada olması anlamında tek bir yöne ve hep aynı yöne doğru akıyor gibidir. Birisi size, içinde bir bardak sütün dököldüğü kısa bir film bulunan ama kareleri tek tek kesilip karıştırılmış olan bir kutu vermiş olsa, film yapımcısının yardımı olmadan bu kareleri doğru zaman sıralamasına so-

kabilirsiniz. Zamanın yapısal bir yönü varmış ve geçmiş adı verilenden gelecek adı verilene akmakta, olaylar da bu evrensel sıralamaya göre gelişmekte-süt dökülür, yumurtalar kırılır, mumlar yanar, insanlar yaşlanır-gibidir.

Zamanın kolayca algılayabildiğimiz özellikleri, onun en büyük bilmecelerinden bazılarını ortaya koyar. Zaman gerçekten akıyor mu? Eğer öyleyse gerçekten akan nedir? Ve bu zaman denen şey hangi hızda akıyor? Zamanın gerçekten bir oku var mı? Uzay, yapısından ayrılmaz bir oka sahip değilmiş gibi duruyor. Örneğin, evrenin karanlık derinliklerindeki bir astronot için sağ-sol, ileri-geri, aşağı-yukarı yönleri eşit durumdadır, o zaman bu zaman oku nereden geliyor? Eğer zaman oku varsa, acaba mutlak mı? Ya da bazı şeyler zaman okunun gösteriyormuş gibi görüldüğü yönün tersi yönde gelişebilir mi?

Şimdiki kavrayışımızı ilk olarak bu sorulan klasik fizik çerçevesinde düşünerek pekiştirelim. Bu bölümün kalan kısmında ve gelecek bölümde (ki o bölümde önce zamanın akışını, sonra da okunu inceleyeceğiz) kuantum olasılığı ve kuantum belirsizliğini gözardı edeceğiz. Bununla birlikte öğreneceklerimizin büyük bölümü doğrudan kuantum alanıyla bağlantılıdır ve Bölüm 7'de de zamana kuantum kuramının bakış açısını inceleyeceğiz.

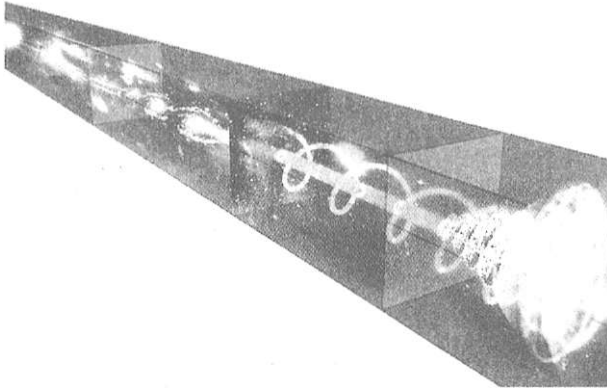
Zaman Akar mı?

Hissedebilen varlıklar açısından cevap açıkmiş gibi durmaktadır. Bu kelimeleri yazarken zamanın aktığını açıkça *hissediyorum*. Her tuşa dokunuşum, bir diğeri tarafından izleniyor. Bu kelimeleri okurken, gözleriniz sayfada bir kelimedenden diğerine giderken, hiç kuşkusuz, siz de zamanın aktığını hissediyorsunuz. Ama fizikçiler ne kadar uğraşırlarsa uğraşınsınlar, hiç kimse fizik yasaları içinde zamanın aktığı yönündeki sezgisel hissi destekleyen, inandırıcı bir kanıt bulamamıştır. Aslında Einstein'ın özel göreliliğe ilişkin görüşlerinden bazılarının yeniden yorumlanması, zamanın akmadığı yönünde kanıtlar ortaya koymaktadır.

Bunu anlayabilmek için, Bölüm 3'te kullandığımız, uzay-zamanın ekmek somunu benzetmesine geri dönelim. Somunu

oluşturan dilimlerin, belirli gözlemciler açısından "şimdi"ler olduğunu hatırlayalım; her dilim o gözlemcinin bakış açısından zamanın bir anındaki uzayı temsil eder. Dilimleri, gözlemcinin onları yaşadığı sırayla yan yana koyarak elde ettiğimiz bütün, bir uzay-zaman bölgesini doldurur. Eğer bu bakış açısını mantıksal bir uç noktaya taşır ve her dilimin bir gözlemcinin bakış açısından zamanın verilen bir anında uzayın *tümünü* tanımladığını varsayar ve eğer çok eski geçmişten uzak geleceğe kadar olası tüm dilimleri düşünersek, o zaman somun, bütün zamanlar için evrenin tümünü - yani uzay-zamanın bütünü - kaplayacaktır. Nerede ve ne zaman olmuş olursa olsun, her olay bu somunda bir nokta taralıdan temsil edilir.

Şekil 5.1'de gösterilen bu bakış açısı aklınızı biraz kurcalamış olmalı. Şekildeki tüm evrene, zamanın her anında uzayın tamamına baktığımız "dış" bakış noktası, hiçbirimizin hiçbir zaman bulunamayacağı, hayali bir noktadır. Hepimiz uzay-zamanın *içindeyiz*. Sizin veya benim yaşadığımız her şey uzayda bir yerde, belirli bir zamanda gerçekleşir. Şekil 5.1 bütün uzay-zamanı temsil etmeyi amaçladığı için, böylesi yaşantıların hepsini, sizin, benim, herkesin ve her şeyin yaşantılarını kapsar. Eğer çok ya-



Şekil 5.1 Bütün uzayın, bazı ilk galaksilerin oluşumunu, Güneş ve Dünya'nın oluşumunu ve şimdilik uzak bir gelecekte olacağını düşündüğümüz, Güneş'in bir kırmızı dev haline gelmesi sonucunda Dünya'nın kaçınılmaz ölümünü kapsayan, tüm zamanlardaki (elbette zamanın bir bölümünde uzayın bir bölümünü gösteren) şematik gösterimi.

kından bakarak yerküre gezegeninde tüm olup bitenleri görebilseydiniz, Büyük İskender'i Aristo'dan ders alırken, Leonardo da Vinci'yi Mona Lisa'nın son fırça darbesini vururken ve George Washington u Delaware'den geçerken görebilirdiniz. Görüntülere soldan sağa doğru bakmaya devam ettiğinizde büyükanne-nizi küçük bir kız olduğu zamanlarda oyun oynarken, babanızı onuncu yaş gününü kutlarken, okuldaki ilk gününüzü görebilirdiniz. Görüntüde daha sağa baktığınızda kendinizi bu kitabı okurken, torununuzun torununu doğarken ve biraz daha sağda da onu başkan olurken, törende görebilirdiniz. Şekil 5.1'in çözünürlüğü düşük olduğu için bu anları gerçekten göremezsiniz ama bir gaz bulutu olarak çöküşlerinden başlayarak (şematik olarak) Güneş ve Dünya'nın tarihini, Güneş'in bir kırmızı dev haline gelip Dünya'nın ölümüne neden oluşuna kadar görebilirsiniz. Bunların hepsi oradadır.

Şekil 5.1'in hayali bir bakış açısı olduğu kuşkusuzdur. Bu nokta, uzay ve zamanın dışında durmaktadır. Şekildeki manzara hiçbir yerden ve hiçbir zaman görülemeyecek bir manzardır. Ama böyle olsa bile-gerçekten uzay-zamanın ötesine bir adım atıp evreni bir bütün olarak tarayamıyor olsak bile-Şekil 5.1'in şematik tanımlaması bize, uzay ve zamanın temel özelliklerinin çözülmesi ve açıklığa kavuşturulması için güçlü bir araç sağlamaktadır. Önemli bir örnek olarak, zamanın akışına ilişkin sezgisel his, bu yapıda film projektörü benzetmesindeki bir değişiklikle son derece canlı bir şekilde gösterilebilir. Zaman dilimlerini birbiri ardısıra aydınlatan bir ışığı gözümüzde canlandırabiliriz. Bu ışık aydınlattığı dilimi anlık olarak canlandırır-onu anlık olarak şimdi yapar-ve ışık bir sonraki dilimi aydınlatırken önceki dilim yeniden karanlığa gömülür. Zaman hakkındaki bu sezgisel düşünüş biçimine göre, şu anda ışık sizin Dünya gezegeninde oturmuş *bu* kelimeyi okuduğunuz dilimi aydınlatıyor, şimdi de *bu* kelimeyi okuduğunuz dilimi aydınlatıyor. Buna rağmen, bu görüntü yaşadıklarımızla örtüşüyor gibi görünüyorsa da, bilim insanları fizik yasaları içinde böyle hareketli bir ışığı ima eden herhangi bir şey bulamadılar. Bu bilimciler,

mekanizma sürekli olarak geleceğe doğru akarken, bir anı diğerinden ayıran, onun anlık olarak gerçek-anlık olarak şimdi olmasını sağlayan bir mekanizma bulamadılar.

Tam tersine. Şekil 5.1'deki *bakış açısı* elbette hayalidir ama uzay-zaman somunu -dilimler değil ama uzay-zamanın bütünü- gerçektir. Einstein'ın çalışmasının pek de yaygın olarak kabul görmeyen bir sonucu, özel göreliliğin bütün zamanları eşit olarak ele aldığını söyler. Her ne kadar şimdi kavramı dünyaya bakışımızda merkezi bir rol oynuyorsa da, görelilik önsezi-lerimizi bir kez daha alt-üst ederek bizim evrenimizin, her bir anı diğer kadar gerçek olan eşitlikçi bir evren olduğunu bildirir. Bölüm 3'te özel görelilik bağlamında dönen kova konusunu düşünürken bu fikre şöyle bir dokunup geçmiştik. Orada, Newton'unkine benzeyen dolaylı bir mantık yürütmeye uzay-zamanın, ivmeli hareket için bir referans noktası oluşturmaya yeterli bir şey olduğu sonucuna varmıştık. Burada bu konuyu bir başka açıdan ele alıyor ve daha ileri götürüyoruz. Şekil 5.1'deki uzay-zaman somununun her parçasının diğer parçalarıyla eşit olarak var olduğunu, bunun da Einstein'ın inandığı gibi, gerçekliğin geçmiş, günümüz ve geleceği *eşit olarak* kucakladığını ve gözümüzde canlandırığımız, bir dilimi ışığın altına getirip diğerini karanlığa gömen akışın aldatıcı bir görüntü olduğunu tartışıyoruz.

Geçmiş, Şimdi ve Gelecek Yanılsaması

Einstein'ın perspektifini anlamak için geçerli bir gerçeklik tanımına, verilen bir anda nelerin var olduğunu belirleyen bir algoritmaya ihtiyaç duyuyoruz. Bu konudaki yaygın biryaklaşım şudur: Gerçekliği -şu anda neyin var olduğunu- düşünürken, akıl gözümde bir fotoğraf, bütün evrenin şu andaki donmuş, zihinsel görüntüsünü canlandırırım. Bu kelimeleri yazarken, şu anda neyin var olduğu konusundaki hissim, gerçeklik hissim tüm şu listeyle -mutfaktaki saatin gece yarısını vuruşu; yerden pencere pervazına atlarken havada uçan kedin; Dublin'i aydınlatan, sabahın ilk ışıkları; Tokyo borsasının uğultusu; Güneş'te iki belir-

li hidrojen atomunun kaynaşması; Orion bulutsusundan bir fotonun salınması; ölmekte olan bir yıldızın kara deliğe dönüşmeden önceki son anı- yani şu andaki donmuş zihinsel görüntülerle aynı şeydir. Bunlar, hemen şimdi olan şeyler oldukları için, şu anda var olduklarını öne sürdüğüm şeylerdir. Şu anda Şarلمان (Charlemagne) var mı? Yok. Şu anda Neron var mı? Yok. Şu anda Lincoln var mı? Yok. Şu anda Elvis var mı? Yok. Hiçbiri benim şu anda var olanlar listemde yok. Şu anda 2300 yılında veya 3500 yılında veya 57.000 yılında doğmuş olan birisi var mı? Yok. Bütün bunlar benim akıl gözümün zihinsel donmuş görüntüleri arasında yok, şu andaki zaman dilimimde yok ve sonuç olarak hiçbirisi benim şu anda var olanlar listemde yok. Bu nedenle hiç duraksamadan onların şu anda var olmadığını söylüyorum. Benim belirli bir anda gerçekliği tanımlayışım böyledir; ve bu, varlık konusunu düşünürken üstü kapalı bir şekilde, çoğumuzun kullandığı sezgisel bir yaklaşımdır.

Şimdi bu kavramı aşağıda kullanacağım ama burada ince bir noktaya dikkat etmelisiniz. Bir şimdi-listesi -bu düşünüş biçimindeki gerçeklik- tuhaf bir şeydir. Hemen şimdi gördüğünüz hiçbir şey sizin şimdi-listenizde olamaz çünkü ışığın gözlerinize ulaşması bir zaman alır. Şu anda gördüğünüz şey olup bitmiştir. Bu sayfadaki kelimeleri, onların şu anda oldukları gibi görmezsiniz, eğer bu kitabı gözünüzden 30 cm uzakta tutuyorsanız, bu kelimeleri saniyenin milyarda biri kadar önceki halleriyle görürsünüz. Orta boyutlara sahip olan bir odada etrafınıza bakarsanız, eşyaları saniyenin on milyarda biriyle yirmi milyarda biri kadar önceki halleriyle görürsünüz; Grand Canyon'un karşısına bakarsanız, o tarafı saniyenin on binde biri kadar önceki haliyle görürsünüz; Ay'a bakarsanız onu bir buçuk saniye önceki haliyle görürsünüz; Güneş'i sekiz dakika önceki haliyle, çıplak gözle görülen yıldızları birkaç yılla 10.000 yıl arası önceki halleriyle görürsünüz. O zaman, her ne kadar zihinsel donmuş görüntüler gerçeklik hissimizi, "orada ne var" şeklindeki sezgisel hissimizi yansıtıyorsa da, aslında şu anda yaşayamayacağımız, etkileyemeyeceğimiz hatta kaydedemeyeceğimiz olayları kapsar. Bu

nedenle güncel bir şimdi-listesi ancak olaylar olup bittikten sonra yapılabilir. Eğer herhangi bir şeyin ne kadar uzakta olduğunu biliyorsanız, o zaman sizin şimdi gördüğünüz ışığı onun ne zaman gönderdiğini ve onun sizin zaman dilimlerinizin hangisinde -geçmişteki hangi şimdi-listesinde- kaydedilmesi gerektiğini belirleyebilirsiniz. Bununla birlikte, ki bu kilit öneme sahip olan bir noktadır, verilen herhangi bir andaki şimdi-listesini oluşturmak için bu bilgiyi kullanırken, daha uzaktaki kaynaklardan ışık aldıkça bu listeyi güncelleriz, listeye konanlar önsezimizle o anda var olduğuna inandığımız şeylerdir.

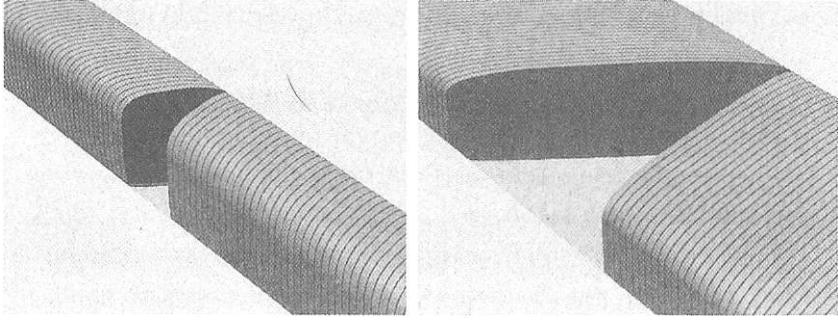
Bu görünüşte basit düşünüş şeklinin gerçeklik kavramının beklenmedik ölçüde genişlemesine yol açması dikkat çekicidir. Görüyorsunuz ki, Newton'un mutlak uzay ve mutlak zamanına göre verilen bir anda herkesin evrene ait donmuş görüntüleri tam olarak aynı olayları kapsar; herkesin şimdisi aynı şimdidir, bu nedenle herkesin verilen bir andaki şimdi-listesi birbirinin aynıdır. Eğer verilen bir anda herhangi birisi veya herhangi bir şey sizin şimdi-listenizdeyse, o zaman aynı anda zorunlu olarak benim de şimdi-listemde bulunacaktır. Pek çok kimsenin önsezileri hâlâ bu düşünce şekliyle sınırlıdır ama özel göreliliğin anlattığı öykü bambaşkadır. Şekil 3.4'e yeniden bakın. Birbirlerine göre hareket halinde olan iki gözlemcinin her birinin perspektifinden, şimdileri -zaman içindeki anları- farklıdır: Bunların şimdileri uzay-zamanı farklı açılarda keser. Farklı şimdiler, farklı şimdi-listeleri demektir. *Birbirlerine göre hareket halinde olan gözlemcilerin, verilen bir anda neyin var olduğu kavramları birbirinden farklıdır ve bu nedenle de gerçeklik kavramları farklıdır.*

Gündelik hızlarda iki gözlemcinin şimdi-dilimleri arasındaki açı çok küçüktür, günlük hayatta bizim şimdi tanımımızla bir başkasınınki arasındaki farka hiçbir zaman dikkat etmememizin nedeni budur. Bu nedenle özel göreliliğin çoğu tartışmaları, çok yüksek hızlarla -ışığın hızına yakın hızlarla- hareket ediyor olsak ne olacağı üzerine odaklanır, çünkü böylesi hızlarla hareket etmek, etkileri çok büyütecektir. Ama iki gözlemcinin şimdi kav-

ramları arasındaki farkı büyütmenin bir yolu daha vardır ve ben bunun, gerçeklik sorusuna özellikle çok aydınlatıcı bir yaklaşım sağladığını düşünüyorum. Bu yol, şu basit gerçeğe dayanır: Eğer siz ve ben, normal bir somunu çok az farklı açılarda dilimlersek, bunun ortaya çıkan dilimler üzerindeki etkisi çok az olur. Ama somun *dev boyutluysa*, sonuç farklı olur. Nasıl çok uzun bir makası çok az açtığımız halde uçları arasındaki uzaklık çok büyük olabiliyorsa, dev bir ekmek somununu çok az farklı açılarda dilimlemek de dilimlerin kesişim noktalarının çok farklı yerlerde olmaları sonucunu doğurur. Bunu Şekil 5.2'de görebilirsiniz.

Aynı şey uzay-zaman için de doğrudur. Gündelik hızlarda birbirlerine göre hareket halinde olan gözlemciler için şimdiyi tanımlayan dilimler, birbirlerinden çok az farklı açılarda bulunurlar. Eğer iki gözlemci birbirine yakınsa, bunun neredeyse hiç etkisi olmaz. Ama, tıpkı ekmek somununda olduğu gibi, etkilerine büyük uzaklıklardan bakıldığında, küçük açılar, dilimler arasında devasa uzaklıklar yaratırlar. Uzay-zaman dilimleri için, dilimler arasındaki büyük bir açı farkı, her gözlemcinin hangi olayın şimdi olduğunu göz önüne aldığı konusunda çok büyük farklılıkların ortaya çıkmasına neden olur. Birbirlerine göre hareket halinde olan bireylerin, eğer birbirlerinden giderek uzaklaşıyorlarsa, sıradan, gündelik hızlarda bile gittikçe daha farklı şimdi kavramlarına sahip olacakları, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Bunu daha iyi anlamak için Chewie'nin çok çok uzaktaki -Dünya'dan 10 milyar ışık yılı uzaktaki- bir galakside bulunan gezegeninde, oturma odasında sakince oturmakta olduğunu düşünelim. Sizin (sakince oturuyor ve bu kelimeleri okuyorsunuz) ve Chewie'nin birbirinize göre hareket etmediğinizi de varsayalım (daha basit olsun diye gezegenlerin hareketini, evrenin genişlemesini, kütleçekimsel etkileri vb. gözardı edelim). Birbirinize göre hareketsiz olduğunuz için siz ve Chewie, uzay ve zaman konularında tam anlamıyla aynı fikirdesiniz: Uzay-zamanı aynı şekilde dilimleyeceğiniz için şimdi-listeleriniz çakışacaktır. Kısa bir süre sonra Chewie kalkar ve yürüyüşe çıkar. Ağır adım-

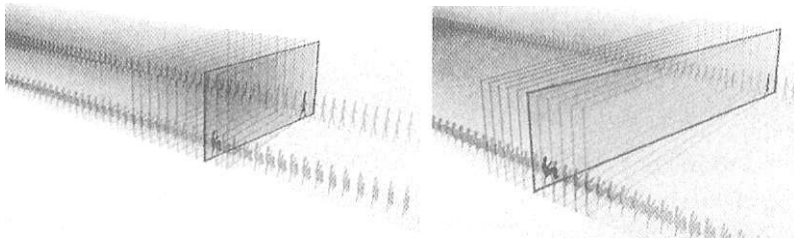


(a)

(b)

Şekil 5.2 (a) Sıradan bir somunda, çok küçük açı farklarıyla kesilen dilimler birbirinden çok ayrılmaz, (b) Ama somun büyüdükçe, aynı açı farklarının yarattığı ayrılma daha büyük olur.

larla sizden uzağa doğru yürümeye başlar. Chewie'nin hareket durumundaki bu değişiklik, onun şimdi kavramının, onun uzay-zaman diliminin sizinkine göre küçük bir açıyla döneceği anlamına gelir (Şekil 5.3'e bakınız). Bu çok küçük açısal değişiklik Chewie'nin çevresinde gözlenebilir bir etki yaratmaz: Onun yeni şimdisi ile onun odasında oturmakta olan birininki arasındaki fark çok küçüktür. Ama aradaki 10 milyar ışık yıllık deva-



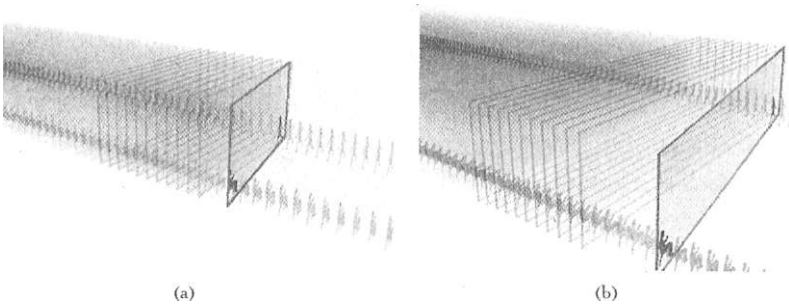
(a)

(b)

Şekil 5.3 (a) Birbirlerine göre hareketsiz olan iki birey, aynı *şimdi* kavramlarına, aynı zaman dilimlerine sahiptir. Eğer gözlemcilerden biri diğerinden uzaklaşırsa, zaman dilimleri -her gözlemcinin neyin *şimdi* olduğu konusundaki yargısı- birbirine göre döner; şekildeki hareketli gözlemcinin karartılmış *şimdi* dilimi, sabit gözlemcinin geçmişine doğru dönmüştür, (b) Gözlemciler arasındaki uzaklığın artması, dilimler arasında daha büyük bir sapmaya, onların *şimdi* kavramında daha büyük bir sapmaya yol açar.

sa uzaklık nedeniyle, Chewie'nin şimdi kavramındaki minik değişiklik çok büyür (Şekil 5.3a'dan 5.3b'ye geçer gibi, ama kahramanlarımız birbirinden çok uzakta olduğu için şimdileri arasındaki kayma vurgulanır). *O sakın bir biçimde otururken aynı olan onun şimdisi ve sizin şimdiniz, bu küçük hareket nedeniyle birbirinden aniden farklılaşır.*

Şekil 5.3 ve 5.4'te bu temel fikir şematik olarak gösterilmiştir. Özel göreliliğin denklemlerini kullanarak şimdilerinizin ne kadar farklı olacağını hesaplayabiliriz.¹ Eğer Chewie sizden uzağa doğru saatte yaklaşık 15 kilometrelik bir hızla yürürse (Chewie gerçekten uzun adımlarla yürüyor) onun yeni şimdi-listesindeki olaylar, size göre 150 yıl önce olmuş olaylar olacaktır. Onun şimdi kavramına göre -ki her bir parçası sizinki kadar geçerlidir ve bir an öncesine kadar sizin şimdi kavramınızla tam bir uyum içindedir- siz daha doğmamışsınızdır. Eğer Chewie size doğru aynı hızda yürürse, açılmalı kayma Şekil 5.4'te görüldüğü gibi, öncekinin tersi olacak, onun şimdi kavramı sizin açınızdan 150 yıl sonra olacak olayları kapsayacaktır! Şimdi, onun şimdi kavramına göre, siz artık bu dünyanın bir parçası olamazsınız. Eğer yürümek yerine Chewie, saatte 1500 kilometre hızla giden (Concorde uçağının hızından daha az) bir *Millenium Falcon'a*



Şekil 5.4 (a) Şekil 5.3a'nın aynısı, tek fark, bir gözlemci diğerine göre hareket ettiğinde onun *şimdi* dilimi diğer gözlemcinin geçmişine doğru değil, geleceğine doğru döner, (b) 5.3b'nin aynısı -daha büyük uzaklık, *şimdi* kavramları arasında, aynı görelî hız için daha büyük sapmaya yol açar- dönme de geçmiş yerine geleceğe doğru olur.

binmiş olsaydı, onun şimdisi, sizin perspektifinizden, size doğru veya sizden uzağa doğru gidiyor olmasına bağlı olarak 1500 yıl gelecekte veya 1500 yıl geçmişte olan olayları kapsayacaktı. Hareketin yön ve hızı uygun olarak seçilirse, Elvis ya da Charlemagne ya da Neron ya da Lincoln veya gelecekte doğacak birisi onun yeni şimdi-listesinde bulunabilir.

Şaşırtıcı olsa da, bunların hiçbiri bir karşıtlık veya ikilem yaratmaz, çünkü yukarıda anlatıldığı gibi, bir şey ne kadar uzaktaysa, onun yaydığı ışığın alınması ve dolayısı ile onun belirli bir şimdi-listesine ait olduğunun belirlenmesi de o kadar uzun sürer. Örneğin, kalkıp saatte 14 kilometre hızla² Dünya'dan uzağa doğru yürüdüğünde State Box at Ford's Theatre a yaklaşımakta olan John Wilkes Booth, Chewie'nin şimdi-listesinde olsa da o, Başkan Lincoln ü kurtarmak için bir hareket yapamaz. Böylesine devasa bir uzaklıktan mesajların alınıp verilmesi de çok uzun zaman alacağı için, ancak milyarlarca yıl sonra Chewie'nin soyundan gelenler, Washington daki o kader gecesinden çıkan ışığı alabileceklerdir. Önemli nokta şudur ki, Chewie'nin soyundan gelenler geçmişteki çok uzun şimdi-listelerini güncellemek için bu bilgiyi kullandıklarında, Lincoln suikastinin Chewie'nin kalkıp Dünya'dan uzağa doğru yürüdüğü zamana ait şimdi-listesinde yer aldığını göreceklerdir. Onlar yine, Chewie'nin yürümeye başlamasından hemen önceki şimdi-listesinin, pek çok başka şeylerin yanı sıra, Dünya'nın yirmi birinci yüzyılında, sakince oturmuş bu kelimeleri okumakta olan sizi de kapsadığını göreceklerdir.³

Benzer şekilde, 2100 yılındaki ABD başkanlık seçimlerini kimin kazanacağı gibi, geleceğimize ait olan ve tümüyle açık gibi görünen sorular vardır: Büyük olasılıkla o seçimlerde yarışacak adaylar ofislerine gitmek şöyle dursun, daha doğmamışlardır bile. Ama eğer Chewie sandalyesinden kalkıp Dünyaya doğru saatte 10,2 kilometre hızla yürürse, onun şimdi-dilimi -onun neyin var olduğu kavramı, onun neyin olduğu kavramı- yirmi ikinci yüzyılın ilk başkanının seçimini de *kapsayacaktır*. Bizim için henüz kararlaştırılmamış olan bir şey, onun için çoktan

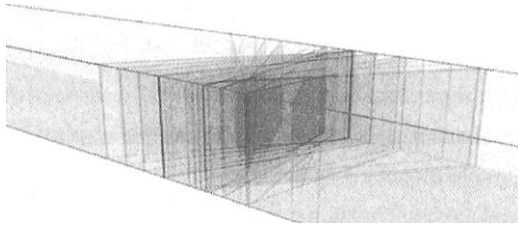
olup bitmiştir. Ama bizim televizyon sinyallerimizin ona ulaşması milyarlarca yıl alacağı için, Chewie de bu seçimin sonuçlarından milyarlarca yıl boyuca haberdar olmayacaktır. Ama seçim sonuçlarına ilişkin haber Chewie'nin soyundan gelenlere ulaşmış, onlar da bu bilgiyi kullanarak Chewie'nin tarihsel sinema defterini, onun geçmişteki şimdi-listesini güncelledikleri zaman, seçim sonuçlarının, Chewie'nin kalkıp Dünyaya doğru yürümeye başladığı zamana ait olan şimdi-listesinde olduğunu bulacaklardır. Chewie'nin soyundan gelenler, bu şimdi-listesinin, Dünya'nın yirmi birinci yüzyılının ilk yıllarında, bu paragrafı bitiren sizi içeren listeden bir an sonraki liste olduğunu göreceklerdir.

Bu örnek, iki önemli noktayı aydınlatıyor. Bunlardan ilki, her ne kadar görelliliğin etkilerinin ışık hızına yakın hızlarda görünür olmaya başladığı fikrine alışmış olsak da, uzayda büyük uzaklıklar göz önüne alındığında, düşük hızlarda bile görellilik etkileri çok büyüyebilir. İkincisi, bu örnek uzay-zamanın (somunun) gerçekten bir varlık mı yoksa yalnızca soyut bir kavram, şimdi ile birlikte geçmişi ve geleceği de kapsayan uzayın soyut bir birliği mi olduğu konusunda fikir vermektedir.

Gördüğünüz gibi Chewie'nin gerçeklik kavramı, zihinsel donmuş-görüntüsü veya şimdi neyin var olduğu kavramı, onun için, bizim gerçeklik kavramımızın bizim için gerçek olduğu kadar gerçektir. Bu nedenle gerçekliği neyin oluşturduğu konusunu değerlendirirken, onun perspektifini de kapsamamamız, olağanüstü dar görüşlülük olurdu. Newton için böylesi eşitlikçi bir yaklaşım en küçük bir fark bile yaratmazdı, çünkü, uzayın ve zamanın mutlak olduğu bir evrende herkesin şimdi-dilimleri çakışırdı. Ama göreliliğin bir evrende, bizim evrenimizde, çok büyük bir fark yaratır. "Şimdi neyin varolduğu" yolundaki alışılmış kavram tek bir şimdi-dilimi olsa da -biz genellikle geçmişe "olup bitmiş", geleceğe de "henüz gelmemiş" gözüyle baktığımız için- bu görüntüye, Chewie'nin şimdi-dilimini, yukarıdaki tartışmanın gösterdiği gibi, bizimkinden çok farklı olabilecek olan bir şimdi-dilimini de eklemeliyiz. Dahası, Chewie'nin başlangıçtaki konu-

mu ve hareket hızı rasgele olduğu için, bütün olasılıklarla ilişkili olan şimdi-dilimlerini de eklemeliyiz. Bu şimdi-dilimleri, yukarıda tartışıldığı gibi, Chewie'nin -veya bir başka gerçek ya da hayali gözlemcinin- başlangıç konumunu merkez alır ve seçilen hızla bağlı olan bir açıyla dönerler. (Tek sınırlama, ışık tarafından konan hız sınırıdır ve yukarıda anlatıldığı gibi, bizim kullandığımız gralik gösterimde bu, saat yönünde veya saat yönünün tersine 45 derecelik bir dönme açısına karşılık gelir.) Şekil 5.5'te göreceğiniz gibi, bütün bu şimdi-dilimleri toplamı, uzay-zaman somununda oldukça büyük bir bölgeyi doldurur. Aslında, eğer uzay sonsuzsa -eğer şimdi-dilimleri sonsuza kadar uzanıyorsa- o zaman, dönmüş şimdi-dilimleri rasgele uzaklıktaki bir noktayı merkez alabilir ve bu nedenle de bunların birleşimleri, uzay-zaman somunundaki *her* noktayı süpürür. ""

Bu nedenle: *Eğer gerçekliğin sizin şu andaki zihinsel donmuş görüntünüzdeki şeylerden oluşmakta olduğu kavramını kabul ederseniz ve eğer sizin şimdinizin çok uzakta bulunan ve serbestçe hareket edebilen bir gözlemcinin şimdinden daha geçerli olmadığı konusunda hemfikirseniz, o zaman gerçeklik uzay-zamandaki tüm olayları kapsar.* Somunun bütünü vardır. Na-



Şekil 5.5 Dünya dan değişik uzaklıklarda bulunan ve değişik hızlarla hareket eden çeşitli gözlemciler için (gerçek ya da hayali) zaman dilimleri örneği

Somunda herhangi bir noktayı alın. Bu noktadan geçen ve bizim şu andaki şimdi-dilimimizi 45 dereceden daha küçük bir açıyla kesen bir dilim çizin. Bu dilim, Chewie gibi, başlangıçta bize uzak bir noktada hareketsiz olan, ama şimdi bize göre ışık hızından daha yavaş hareket eden bir gözlemcinin şimdi-dilimi *-gerçekliği-* olur. Tasarım nedeniyle bu dilim, almış olduğunuz somundaki (rasgele) noktayı kapsar.⁴

sil bütün uzaya *gerçekliğin* orada olduğu, *gerçekten* var olduğu gözüyle bakıyorsak, zamanın bütününe de *gerçekliğin* orada olduğu, *gerçekten* var olduğu gözüyle bakmalıyız. Geçmiş, günümüz ve gelecek elbette farklı varlıklarmış gibi görünürler. Ama bir zamanlar Einstein'ın söylediği gibi, "Biz ikna olmuş fizikçiler için geçmiş, günümüz ve gelecek arasındaki fark yalnızca ısrarlı bir yanılsamadan ibarettir."⁵ Gerçek olan tek şey, uzay-zamanın tamamıdır.

Yaşananlar ve Zamanın Akışı

Bu düşünüş biçimine göre, olaylar, herhangi bir perspektiften bakıldığında ne zaman olduklarından bağımsız olarak, öyledirler. Tamamı vardır. Uzay-zaman içindeki kendi belirli noktalarını sonsuza kadar doldururlar. Akış yoktur. Eğer 1999 yılbaşı geceyarısında çok eğleniyor idiyse, hâlâ öylesiniz. Çünkü bu uzay-zamanda değişmez bir konumdur. Dünyaya bakışımız kesin bir şekilde geçmiş, günümüz ve gelecek olarak ayrıldığı için bunu kabullenmek güçtür. Ama bu zamansal şemaya dikkatle bakar ve onu modern fiziğin katı, soğuk gerçekleriyle karşılaştırsak, bu, insan aklının sınırları içinde sığınacak son nokta gibi görünmektedir.

İnkâr edilemeyecek şekilde, bilinçli yaşantımız dilimleri süpürür gibi görünmektedir. Sanki aklımız, daha önce sözü edilen projektör ışığını sağlamaktadır, öyle ki, zaman anları bilinç gücüyle aydınlatıldıkça hayata gelirler. Bir andan diğerine akma hissi, düşüncelerimiz, hissettiklerimiz ve algıladıklarımızdaki değişikliklerin bilinçli bir şekilde tanınmasından, kabullenilmesinden kaynaklanır. Değişme dizisi sürekli bir hareket içindeymiş gibi, tutarlı bir öyküye açılıyormuş gibi görünür. Ama -psikolojik veya nörobiyolojik kesinlikte herhangi bir hile olmaksızın- gerçekten böyle bir şey olmayabileceği halde, böyle bir zaman akışını nasıl yaşamış olabileceğimizi göz önünde canlandırabiliriz. Ne demek istediğimi anlayabilmek için, rasgele bir ileri, bir geri atlamalar yapan bozuk bir DVD oynatıcıda *Rüzgâr Gibi Geçti* filmini izlediğinizi düşünün: Ekranda bir an görüntü-

lenen sabit bir film karesini filmin bambaşka bir yerinden bir sabit film karesi takip ediyor olsun. Bu karmakarışık filmi izlediğinizde ne olup bittiğini anlamanız çok zor olacaktır. Ama Scarlett ve Rhett'in bir sorunları yoktur. Her karede, o karede her zaman ne yapıyorlarsa gene aynı şeyleri yapmaktadırlar. Eğer belirli bir karede DVD'yi durdurup onlara düşüncelerini ve anılarını sorabilseydiniz, sorularınızı tıpkı düzgün çalışan bir DVD oynatıcıda olacağı şekilde yanıtlayacaklardı. Eğer onlara İç Savaşta oradan oraya sıçramanın akıl karıştırıcı olup olmadığını sormuş olsaydınız, size şaşkınlıkla bakacaklar ve içkiyi fazla kaçırmış olduğunuz izlenimini edineceklerdi. Belirli her karede, o karede her zaman sahip oldukları düşüncelere ve anılara sahip olacaklar, bu düşünce ve anılar da onlara, zamanın alışıldığı gibi, düzgün ve tutarlı bir biçimde akmakta olduğu hissini verecekti.

Benzer şekilde, uzay-zamandaki her an -her zaman dilimi- bir film şeridindeki her sabit film karesi gibidir. Bir ışık onu aydınlatsa da, aydınlatmasa da vardır. Size göre böyle bir anda bulunan Scarlett ve Rhett'e gelince, bu şimdidir, o anda yaşadığınız *andır*. Her zaman öyle olacaktır. Dahası, her bir dilimde düşünce ve anılarınız, zamanın o ana kadar sürekli bir şekilde aktığı duygusuna yol açacak derecede zengindir. Zamanın akmakta olduğu duygusu, daha önceki anların -önceki karelerin- "sırayla aydınlatılmalarını" gerektirmez.⁶

Ve bu konuda biraz düşünürseniz, bunun çok iyi bir şey olduğunu fark edersiniz, çünkü belirli anları sırayla aydınlatarak hayata getiren projektör ışığı kavramı, çok daha temel bir başka nedenden ötürü sorunludur. Eğer projektör ışığı işini düzgün bir biçimde yaparak belirli bir anı -diyelim 1999 yılbaşı geceyarısı anını- aydınlatırsa, bu an karanlığa gömüldüğünde ne anlamı olacaktır? Eğer bu an aydınlıksa, o zaman, aydınlatılmış olmak, o anın bir özelliği, o anda gerçekleşen başka her şey kadar ölümsüz ve değişmez bir özelliği olacaktır.

Aydınlatılmayı yaşamak -"hayatta olmak", var olmak, şimdi olmak- ve daha sonra karanlığı yaşamak -uykuda olmak, geçmiş olmak, *idi* olmak- değişimi yaşamaktır. *Ama değişim kavra-*

mi, zamanda tek bir ana göre bir şey ifade etmez. Değişim zaman içinde olmak zorundadır, değişim zamanın geçişini gösterir ama bu zaman kavramı ne olabilir? Tanım gereği, anlar zamanın -en azından bizim haberdar olduğumuz zamanın- geçişini içermezler, çünkü anlar öyledir, zamanın hammaddesidir, *değişmezler*. Nasıl belirli bir konum uzayda hareket edemezse, belirli bir an da zamanla değişmez: Eğer konum hareket ederse o artık uzayda başka bir konumdur; eğer zaman içinde bir an değişirse, artık farklı bir an olur. Her yeni şimdiyi hayata getiren projektör ışığının sezgisel görüntüsü, dikkatli bir sınavdan geçmemiştir. Her an aydınlatılır ve her an aydınlatılmış olarak kalır. Her an öyledir. Eğer dikkatli bakılırsa, akmakta olan zaman nehri, her anın içinde sonsuza kadar donmuş olarak yer aldığı dev bir buz bloğuna daha çok benzer.⁷

Bu zaman kavramı, çoğumuzun içselleştirebildiği kavramdan önemli ölçüde farklıdır. Kendi önsezilerinden doğmuş olsa da, Einstein, perspektifteki böylesi çok derin değişiklikleri tam olarak özümseyebilecek kadar katılaşmamıştı. Rudolf Carnap⁸, bu konuda Einstein ile yapmış olduğu harika bir konuşmadan şöyle söz ediyor: "Einstein, şimdi probleminin kendisini ciddi şekilde endişelendirdiğini söylüyordu. Şimdiyi yaşamanın bir insan için özel bir şey, geçmiş ve gelecekte temel olarak farklı bir şey olduğunu ama bu önemli farkın fizik içinde ortaya çıkmayacağını ve çıkamayacağını açıklıyordu. Bu deneyimin bilimle anlaşılamayacak olması, ona acılı ama kaçınılmaz bir vazgeçiş gibi görünmüştü."

Bu vazgeçiş, çok önemli bir soruyu yanıtsız bırakır: Acaba bilim, insan aklının, ciğerlerin havayı kucaklar gibi kucakladığı zamanın temel niteliğini kavrayamıyor mu, yoksa insan aklı zamana kendi yapısı olan bir şeyi, yapay ve bu yüzden de fizik yasalarında yer almayan bir şeyi mi dayatmaya çalışıyor? Bu soruyu bana bir iş gününde sormuş olsaydınız, ikinci perspektifi benimserdim ama gece olunca, kritik düşünce şekli hayatın sıradan, normal akışına dönüştüğünde, ilk bakış açısına tüm gücünüzle direnmeniz zordur. Zaman derin bir konudur ve onu

tam olarak anlamaktan çok uzağız. Öñsezili bir insanın günün birinde zamana yeni bir bakış getirmesi ve akan zamana gerçek bir temel ortaya çıkarması olasıdır. O zaman yine, mantık ve görelilik üzerinde temellenen yukarıdaki tartışmanın, öykünün tamamı olduğı ortaya çıkabilir. Elbette, zamanın aktığı duygusu yaşamımızda derinden kökleşmiştir ve hem düşünüşümüze, hem de dilimize her anlamda hakim olmaktadır. O kadar ki, zamanın akışına atıfta bulunan tanımlar konusunda dil hatalarına alışkanlık olarak düşmüşüzdür ve düşmeye de devam edeceğiz. Ama dili gerçeklikle karıştırmayın. İnsan dili derin fiziksel yasaları ifade etmekten çok insanın günlük yaşantılarını ifade etmeye çok daha yatkındır.

VI. Bölüm

Olasılık ve Ok

Zamanın Bir Yönü Var mı?

Zaman akıyor olsa bile, zamanın bir okunun olup olmadığı, olayların zaman *içinde* geliştiği ve fizik yasalarınca ayırt edilen bir yön bulunup bulunmadığı sorusu hâlâ anlamlıdır. Bu soru, olayların uzay-zaman içine nasıl serpiştirildiğine ilişkin esas bir yön olup olmadığı, olayların bir diziliş şekliyle ters diziliş şekli arasında temel bir bilimsel değişiklik olup olmadığı sorusudur. Herkesin bildiği gibi, elbette bu türden devasa bir fark var gibi görünüyor; yaşamı olası kılan ve yaşamayı dokunaklı yapan da budur. Yine de, birazdan göreceğiniz gibi, geçmiş ve gelecek arasındaki farkı ayırt etmek, sandığınızdan daha zordur. Bulacağımız sonuç, evrenin ortaya çıkışındaki koşullara sıkı sıkıya bağlıdır.

Bilmece

Deneyimlerimiz bize, günde belki bin defa, olayların zaman içinde bir yoldan veya tersinden oluşumları arasındaki farkı gös-

terir. Domino's Pizza'dan dumanı tüterken aldığınız pizza eve gelirken soğur, fırından çıkardığınız andan itibaren gittikçe ısınan bir pizza yoktur. Kahveye kattığınız süt açık kahverengi bir sıvı oluşturur, ters yönde karıştırıldığında koyu renkli kahve ve beyaz renkli sütü ayrıışan bir sütlü kahve göremezsiniz. Yumurtalar düşer, kırılır ve dağılır. Ama dağılmış bir yumurtanın tekrar kabuğunun içine toplanarak sağlam bir yumurta oluşturduğunu hiçbir zaman göremezsiniz. Kapağını açtığınızda Coca Cola şişenizin içindeki sıkıştırılmış karbon dioksit gazı sıvıdan kabarcıklar halinde çıkar, ama dağılmış karbon dioksit gazının toparlanıp kabarcıklar halinde sıvının içine girip eridiğini hiçbir zaman göremezsiniz. Oda sıcaklığındaki bir bardak suya atılan buz küpleri erirler ama oda sıcaklığındaki bir bardak suyun içinde birtakım küreciklerin bir araya gelerek buz oluşturduğunu hiçbir zaman göremezsiniz. Bu yaygın olaylar dizisi, sayısız başka olaylar gibi yalnızca tek bir zamansal sırada ortaya çıkar. Hiçbir zaman ters sırada olmaz, böylece de önce ve sonra kavramlarını oluşturur, bize tutarlı ve görünüşe bakılırsa evrensel geçmiş ve gelecek kavramları sağlarlar. Bu gözlemler bizi, eğer uzay-zamana (Şekil 5.1 de olduğu gibi) dışarıdan bakabilseydik, zaman eksenini boyunca önemli bir asimetri olduğunu göreceğimiz yolunda ikna eder. Dünyadaki tüm kırılmış yumurtalar, kırılmamışlara göre gelecek adını verdiğimiz yönde bulunacaklardır.

Belki hepsinin arasındaki en sivri örnek şudur: Zihnimiz geçmiş dediğimiz yöne ait pek çok olaya -anılarımız- ulaşabilir gibi görünüyorken, gelecek dediğimiz yöne ait hiçbir olayı hatırlayamamız yoktur. Bu nedenle geçmiş ve gelecek arasında büyük bir fark varmış gibi görüldüğü ortadadır. Olağanüstü çok sayıdaki çeşitli olayların zaman içindeki gelişimlerinin bir şekilde yönlenmediği açıktır. Hatırlayabileceğimiz şeylerle (geçmiş) hatırlayamayacağımız şeyler (gelecek) arasında bir yöneliş var gibidir. Zamanın bir yönelişi, yönü veya oku olduğunu söylerken anlatmak istediğimiz şey budur.¹

Fizik ve daha genel olarak bilim, düzenlilikler üzerine kuruludur. Bilim insanları doğayı inceler, bazı desenler keşfeder ve bu

desenleri çözerek doğa yasalarını ortaya çıkarırlar. Bu nedenle, zamanın görünür bir oku olduğunu algılamamıza neden olan çok büyük sayıdaki düzenliliklerin, temel bir doğa yasasının kanıtları olduğunu düşünebilirsiniz. Böyle bir yasayı formüle etmenin en saçma yolu, sütün döküleceği, asla geri toplanıp bardağa dolmayacağını bildiren Dökülen Süt Yasası'nı veya yumurtaların kırılacağı ve asla gerisin geriye bütünleşmeyeceğini bildiren Kırılan Yumurtalar Yasası'nı ortaya atmaktır. Böyle bir yasa bize hiçbir şey kazandırmaz: Yalnızca tanımsaldır ve ne olduğunun basitçe gözlenmesinin ötesinde pek bir açıklama önermez. Ama fiziğin derinliklerinde bir yerde pizzayı, sütü, yumurtaları, kahveyi, insanları ve yıldızları oluşturan parçacıkların -her şeyin temel bileşenlerinin- hareketlerini ve özelliklerini tanımlayan ve olayların neden hep aynı yönde geliştiğini ama hiçbir zaman bunun tersi olmadığını gösteren daha az saçma bir yasa bulunduğunu umuyoruz. Böyle bir yasa, gözlenen zaman okuna temel bir açıklama getirir.

Şaşırtıcı olan şu ki, hiç kimse böyle bir yasa keşfetmemiştir. Dahası, Newton, Maxwell ve Einstein tarafından eklemeler yapılan fizik yasaları, günümüze kadar *geçmişle gelecek arasında tam bir simetri** göstermektedir. Bu yasalardan hiçbirinin hiçbir yerinde zamanın bir yönüne uygulanıp diğerine uygulanamayacağı yolunda bir koşul bulamazsınız. Hiçbir yerde bu yasaların, zamanın bir yönüne ya da diğerine uygulandıklarında nasıl göründükleri veya nasıl davrandıkları anlamında bir fark yoktur. Yasalar, geçmiş ve gelecek adını verdiğimiz yönlerle eşit davranırlar. Deneyimlerimiz olayların zaman içinde nasıl geliştiğini gösteren bir ok olduğunu defalarca göstermiş olsa bile, bu ok fizik yasalarının içinde bir yerde yokmuş gibi durmaktadır.

*Bucümlenin bazı egzotik parçacık sınıflarına ilişkin bir istisnası vardır. Bu bölümde işlenen sorular söz konusu olduğunda bunun fazla bir önemi olmadığını düşünüyorum, bu nedenle de bu nitelendirmelerden daha fazla söz etmeyeceğim. Eğer ilgileniyorsanız, bu konu not 2'de kısaca tartışılmaktadır.

Geçmiş, Gelecek ve Fiziğin Temel Yasaları

Bu nasıl olabilir? Fizik yasaları geçmişî gelecekten ayıran hiçbir belirti sağlamıyor mu? Nasıl olur da olayların *bu* sırayla gelişeceğini, asla bunun tersi olmayacağını gösteren bir fizik yasası bulunmaz?

Durum görüldüğünden daha da çapraşıktır. Bilinen fizik yasaları aslında -bizim yaşam deneyimlerimizin tersine- sütlü kahve-deki sütün kahveden ayrılabilceğini; dağılmış yumurtanın toparlanıp yeniden yapışan kabuğunun içine dolarak hiç kırılmamış, düzgün bir yumurtaya dönüşebileceğini; oda sıcaklığındaki bir bardak suda erimiş olan buzların yeniden buz haline gelebileceğini; koladan çıkan gazın yeniden şişenin içindeki sıvıda eriyebileceğini göstermektedir. Saygı gösterdiğimiz bütün fizik yasaları *zaman-tercinme simetrisi* olarak bilinen durumu tümüyle desteklerler. Bu, eğer bir olaylar dizisi bir zaman sıralamasına göre oluyorsa (süt ve kahve karışır, yumurtalar kırılır, gaz dışarı kaçır) o zaman bu olaylar dizisi ters yönde de gelişebilir (süt ve kahve ayrışır, yumurta toplanarak yapışır, gaz yeniden şişeye dolar) demektir. Birazdan bu konuyu daha da açacağım ama eğer bir cümleyle özetlemek gerekirse, bilinen yasalar bazı olayların neden yalnızca belirli bir sırada geliştiğini açıklayamamakla kalmaz, kuramsal olarak bu olayların ters sırada gelişebileceğini de söyler.

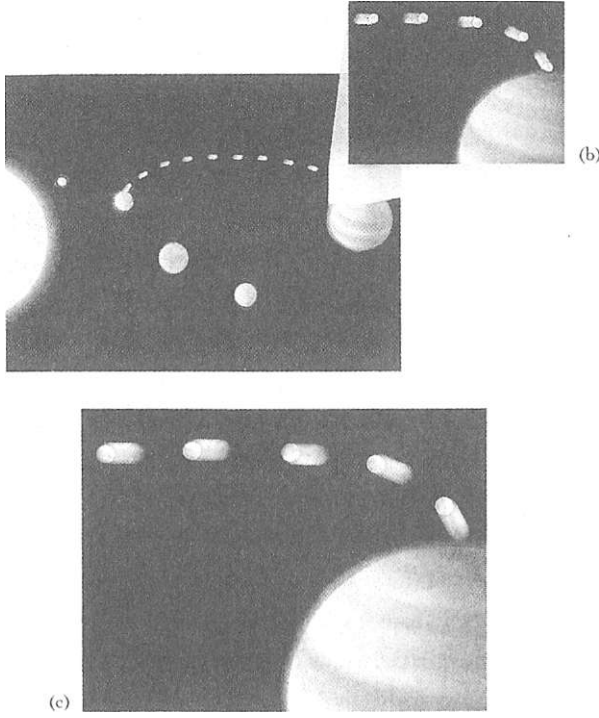
Buradaki kritik soru şudur: *Böyle olayları neden hiç görüyoruz?* Sanırım hiç kimsenin kırılıp dağılmış bir yumurtanın kendiliğinden tekrar toparlanıp yapıştığını görmediği büyük bir güvenle iddia edilebilir. Ama eğer fizik yasaları buna izin veriyorsa, üstelik bu yasalar yumurtanın dağılmasına ve toparlanmasına eşit davranıyorsa, o zaman neden bunlardan her zaman biri oluyor da diğeri hiçbir zaman olmuyor?

Dikkat edilirse, ters-zaman simetrisi zamanın kendisinin ters çevrilmesi veya ters yönde "akması" değildir. Ters-zaman simetrisi, olayların zaman içinde belirli bir sırayla olup olmadığı ve ters sırayla olup olmayacağı ile ilgilidir. Daha doğru bir tanımlama *olay tersinmesi* veya süreç tersinmesi veya *olay sıra tersinmesi* olabilirdi ama biz *zaman tersinmesi* terimini kullanacağız.

Zaman Tersinmesi Simetrisi

Bu bilmeceyi çözmeye doğru atılacak ilk adım olarak, bilinen fizik yasalarının zaman tersinmesi açısından simetrik olduklarının ne demek olduğunu daha sağlam bir şekilde anlamamız gerekir. Şimdi, yirmi birinci yüzyılda olduğunuzu ve yeni gezegenlerarası ligde rakibiniz olan Coolstroke Williams'la tenis oynadığınızı hayal edin. Venüs'ün düşük kütleçekimine alışık olmayan Coolstroke müthiş bir ters vuruşla (backhand) topu uzayın karanlık derinliklerine gönderir. Oradan geçmekte olan bir uzay mekiği, yanlarından geçmekte olan topu filme alır ve filmi yayınlanmak üzere CNN'e (Celestial News Network, Uzay Haberleri Ağı) gönderir. Şimdi soruyu soralım: Eğer CNN yayın teknisyenleri bir hata yapıp filmi ters oynatırlarsa bunu anlamanın bir yolu var mıdır? Elbette eğer film çekilirken kameranın yönü ve duruş şeklini biliyorsanız yayıncıların hatasını ortaya çıkarabilirsiniz. Ama acaba bu hatayı yalnızca filmi izleyerek, ek bir bilgi olmaksızın ortaya çıkarmak olası mıdır? Cevap hayırdır. Eğer doğru (ileri yönde) zaman yönünde top soldan sağa doğru gidiyorsa, ters zaman yönünde sağdan sola gider. Elbette klasik fizik yasaları tenis toplarının soldan sağa veya sağdan sola gitmelerine izin verir. Bu nedenle film ileri zaman yönünde veya geri zaman yönünde oynatılırken gördüğünüz hareket fizik yasalarıyla tam olarak uyumludur.

Şu ana kadar top üzerinde herhangi bir kuvvet olmadığını, onun için de topun sabit hızla hareket ettiğini varsaydık. Şimdi işin içine kuvvetleri de katarak daha genel durumu göz öntine alalım. Newton a göre kuvvetin etkisi, bir cismin hızını değiştirmektir: Kuvvet ivme yaratır. Şimdi de bir süre uzayda sabit hızla hareket ettikten sonra topun Jüpiter'in kütleçekimi alanı tarafından yakalandığını ve Şekil 6.1a ve 6.1b de olduğu gibi, topun gittikçe artan bir hızla sağa doğru bir eğri çizerek Jüpiter'in yüzeyine doğru düşmeye başladığını hayal edin. Eğer bu filmi geri oynatırsanız, tenis topu, Şekil 6.1 c'deki gibi, Jüpiter'in yüzeyinden sola ve yukarı doğru bir eğri üzerinde hareket ediyormuş gibi görünecektir. Yeni sorumuz şudur: Klasik fizik yasaları ge-



Şekil 6.1 (a) Venüs'ten Jüpiter'e uçan bir tenis topu (b) yakın bir görünüm (c) Jüpiter'e çarpmadan önce topun hızı ters çevrildiğinde yaptığı hareket.

ri oynatılan filmin gösterdiği harekete -gerçek filmin geri oynatılan hali- izin verir mi? Bu, gerçek dünyada olabilecek bir hareket midir? İlk bakışta cevap açık bir şekilde evetmiş gibi görünür: Tenis topları sağa ve aşağı doğru veya sola ve yukarı doğru eğriler üzerinde veya bu anlamda sayısız başka yörüngeler üzerinde de hareket edebilirler. O zaman buradaki zorluk nedir? Cevap her ne kadar evet olsa bile, bu mantık aceleci olup sorunun gerçek amacını gözden kaçırmaktadır.

Filmi geri oynattığınızda tenis topunun Jüpiter'in yüzeyinden fırladığını, yukarı ve sola doğru, gezegenin yüzeyine düşerken sahip olduğuyla aynı hızda (ama tam ters yönde) hareket ettiğini görürsünüz. Filmin bu ilk bölümü fizik yasalarıyla elbette uyumludur: Örneğin birisinin tenis topunu Jüpiter'in yüzeyinden tam bu hızla fırlattığını düşleyebiliriz. Temel soru, geri oynatılan fil-

min *kalan* bölümünün de fizik yasalarıyla uyumlu olup olmadığıdır. Bu ilk hızla fırlatılan -Jüpiter'in aşağıya çeken kütleçekiminin etkisi altındaki- top gerçekten geri oynatılan filmin gösterdiği yörüngede mi hareket eder? Aşağıya doğru olan özgün yörüngesini ters yönde mi izler?

Bu çok daha rafine sorunun cevabı evettir. Herhangi bir kafa karışıklığından kaçınmak için yeniden üzerinden gidelim. Şekil 6.1 a'da Jüpiter'in kütleçekiminin henüz belirgin bir etkisi yokken, top sağa doğru gidiyordu. Sonra, Şekil 6.1 b de Jüpiter'in büyük kütleçekimi kuvveti topu yakalayarak gezegenin merkezine doğru çekmeye başladı; bu çekimin yönü, şekilde görüleceği gibi, genelde aşağıya doğru olmakla birlikte, kısmen sağa doğrudur da. Bu da, top Jüpiter'in yüzeyine yaklaştıkça sağa doğru olan hızının bir miktar arttığı, ama aşağıya doğru olan hızının çok daha fazla arttığı anlamına gelir. Bu nedenle, geri oynatılan filmde topun Jüpiter yüzeyinden fırlatılma yönü, Şekil 6.1 c'de görüldüğü gibi, kısmen *sola* doğru olmakla birlikte asıl *yukarı* doğrudur. Bu başlangıç hızıyla Jüpiter'in kütleçekimi, topun sola doğru olan hızını biraz yavaşlatmakla birlikte, asıl etkisini, topun yukarı doğru olan hızını gittikçe daha çok yavaşlatarak gösterir. Yukarı doğru olan hız gittikçe yavaşlarken, topun hareketi sola doğru olan hızdan gittikçe daha fazla etkilenerek topun sola ve yukarıya doğru eğri bir yörünge üzerinde hareket etmesine neden olur. Bu eğrinin sonuna doğru kütleçekimi yukarıya doğru olan hareketi ve Jüpiter'in kütleçekiminin top aşağıya giderken topa verdiği sağa doğru ek hızı tamamen durdurarak, topun başlangıçtaki yaklaşıırken sahip olduğu hızıyla, tümüyle sola doğru gitmesine neden olur.

Tüm bu çözümleme sayılara dökülebilir ama dikkat edilmesi gereken nokta, bu yörüngenin topun özgün hareketinin tam tersi olmasıdır. Topun hızını Şekil 6.1 c'deki gibi basit bir biçimde tersine çevirerek -aynı hızla ama ters yönde harekete başlama-sını sağlayarak- topun özgün yörüngesini aynen ama ters yönde izlemesi sağlanabilir. Filmi tekrar tartışmaya açarsak, sola ve yukarı doğru kıvrılan bu yörünge -Newton'un hareket yasala-

rı üzerine temellendirilen mantık sonucu şekillendirdiğimiz yörünge- filmi geri oynattığımızda göreceğimizin aynısı olur. Dolayısıyla, geriye doğru oynatılan bir filmin gösterdiği gibi, topun zaman-tersinme hareketi, zamanın ileri doğru aktığı bir hareket kadar fizik yasalarına uyar. Filmi geri oynattığımızda gördüğümüz hareket gerçek dünyada *gerçekten* olabilir.

Her ne kadar, sondaki notlarda sözünü ettiğim bazı karışıklıklar varsa da, bu sonuç geneldir.² Harekete ilişkin bilinen ve kabul edilmiş olan bütün yasalar, Newton'un biraz önce tartıştığımız mekaniğinden Maxwell'in elektromanyetik kuramına, Einstein'ın özel ve genel görelilik kuramına kadar (kuantum mekaniğini gelecek bölüme kadar bir yana koyduğumuzu hatırlayın) zaman-tersinmesi simetrisini somutlaştırır: Normalde olduğu gibi ileriye doğru akan zamanda olan hareket, ters yöne akan zamanda da olabilir. Terminoloji biraz kafa karıştırıcı olabileceği için, zamanı tersine çevirmediğimizi bir kere daha vurgulamak isterim. Zaman her zaman yaptığını yapıyor. Burada bulduğumuz sonuçşa şudur: *Bir cismin hızını yörüngesinin herhangi bir noktasında tersine çevirerek o cismin yörüngesini tersine izlemesini sağlayabiliriz.* Eşdeğer olarak, aynı süreç -bir cismin hızını yörüngesinin herhangi bir noktasında tersine çevirmek- bu cismin geri oynatılan bir filmde görülen hareketi yapmasını sağlar.

Tenis Topları ve Dağılan Yumurtalar

Bir tenis topunun Venüs'le Jüpiter arasında -her iki yönde gitmesini izlemenin özel olarak ilginç bir yanı yoktur. Ama ulaştığımız sonuç geniş bir biçimde uygulanabilir olduğundan, şimdi daha heyecan verici bir yere gideceğiz: Mutfağa. Mutfak tezgâhının üzerine bir yumurta koyun, kenara doğru yuvarlayın ve bırakın yere düşüp kırılsın. Elbette bu olay dizisinde pek çok hareket vardır. Yumurta düşer. Kabuk kırılır. Yumurta akı ve sarısı oraya buraya saçılır. Yer döşemesi titrer. Çevredeki hava içinde hava akımları oluşur. Sürtünme ısı üretir, bu dayumurtadaki, havadaki ve yerdeki moleküllerin daha hızlı hareket etme-

lerine neden olur. Ama bir tenis topunun yörüngesini ters yönde izlemesi için ne yapmamız gerektiğini söyleyen fizik yasaları, aynı zamanda her yumurta kabuğu parçasının, yumurta akı ve sarısının her damlasının, döşemenin her bölümünün ve her hava paketçisinin tam ters yörüngeyi izlemesi için ne yapmamız gerektiğini de bildirir. "Bütün" yapmamız gereken, dağılan madde- nin her bileşeninin hızını ters yöne çevirmektir. Daha kesin konuşmak gerekirse, tenis topunda kullanılan mantık, varsayımsal olarak, yumurtanın dağılmasıyla doğrudan ya da dolaylı olarak ilişkili olan *bütün* atom ve moleküllerin hızlarını ters çevirmenin mümkün olması durumunda, bütün kırılıp dağılma sürecinin tersine döneceğini ima eder.

Yine, tenis topunda olduğu gibi, eğer bütün bu hızları tersine çevirmeyi başarabilseydik, geri oynatılan filme benzeyen bir şey görürdük. Ama tenis topunun aksine, kırılan yumurtanın tersine hareketi olağanüstü etkileyici olurdu. Birbirini itekleyen hava moleküllerinden oluşan bir dalga ve minik yer titreşimleri mutlağın her yerinden yumurtanın yere çarptığı noktaya üşüşerek her kabuk parçasının ve her yumurta akı damlasının kırılma noktasına doğru gitmesini sağlar. Her bileşen, özgün kırılma olayındaki ile aynı hızda ama tam ters yönde hareket eder. Her yumurta damlası küresel bir oluşuma katılmak üzere uçarken her kabuk parçası da bu kürenin etrafını saran düzgün bir kabuk oluşturmak üzere ilerler. Hava ve yer titreşimleri, birleşen yumurta damlaları kabuk parçalarıyla birlikte çalışarak yeni oluşan yumurtanın yerden fırlayarak mutfak tezgâhının kenarına yavaşça konmasını ve birkaç santimetre yuvarlanarak durmasını sağlarlar. Eğer tüm bileşenlerin her parçasının hızlarının tam olarak tersine dönmesini sağlayabilseydik, olup bitenler bunlar *olurdu*.³

Bu nedenle olay ister bir tenis topunun bir eğri üzerinde hareketi kadar basit, isterse kırılan bir yumurta kadar karmaşık olsun, fizik yasaları zamanın bir yönünde olan bir şeyin, en azından ilke olarak, zamanın diğer yönünde de olabileceğini gösterir.

İlke ve Pratik

Tenis topunun ve yumurtanın öyküleri doğa yasalarındaki zaman-tersinmesi simetrisinin gösterilmesinin ötesinde de işler yaparlar. Bunlar aynı zamanda, gerçek yaşam dünyasında neden birçok şeyin her zaman aynı yönde olduğunu gördüğümüzü, neden hiçbir zaman ters yönde olduğunu görmediğimizi de açıklar. Tennis topunun yörüngede tersine hareket etmesini sağlamak zor değildir. Topu tutar ve ters yönde aynı hızla fırlatırız. Bu kadar. Ama kırılan yumurtanın son derece karmaşık (kaotik) hareketlerini tersine çevirmek olağanüstü zordur. Her parçayı tutup, eşanlı olarak ters yönde ve aynı hızla fırlatmamız gerekir. Bunun, bizim (ve kralın bütün atlarıyla bütün adamlarının) gerçekten yapabileceğimizin ötesinde olduğu ortadadır.

Aradığımız cevabı bulduk mu? Fizik yasaları her iki harekete de izin verdiği halde, yumurtaların kırılmalarının ama bütünleşmemelerinin nedeni yalnızca neyin pratik olup neyin olmadığı sorunu mu? Cevap, yumurtanın tezgâhtan düşüp kırılmasının kolay ama bütünleşmesinin olağanüstü zor olmasında mı?

Eğer cevabı bu olsaydı, bana inanın, bunu bu kadar sürdürmezdim. Kolaylık ve zorluk konusu cevabın temel bir parçasıdır ama olayın içine oturduğu öykünün tamamı daha karışık ve dahil şaşırtıcıdır. Konu üzerinde derinleşirken buna da değineceğiz ama öncelikle bu bölümdeki tartışmayı biraz daha kesinleştirelim. Bu tartışma bizi sonunda entropi kavramına götürür.

Entropi

Vienna'da Beethoven, Brahms, Schubert ve Strauss'un mezarlarının bulunduğu Zentralfriedhof'taki bir mezar taşına, *entropi* olarak bilinen güçlü bir kavramı ifade eden, $S=k \log W$ yazan tek bir denklem yazılmıştır. Bu mezarda yatan kişi, geçen yüzyılın başlarında yaşayan ve gelmiş geçmiş en önsezili fizikçiler arasında yar alan Ludwig Boltzmann'dır. 1906 yılında karısı ve kızıyla İtalya'da tatil yaparken sağlığı bozulan ve depresyona giren Boltzmann intihar etmiştir. İronik bir şekilde, yalnızca birkaç ay sonra deneyler, Boltzmann'ın yaşam bo-

yu kararlılıkla savunduğu fikirlerin doğru olduğunu göstermeye başlamıştır.

Entropi kavramı ilk olarak endüstri devrimi sırasında, termodinamik alanının gelişmesine yardımcı olan fırınların ve buhar makinelerinin çalışmasıyla ilgilenen bilim insanları tarafından geliştirilmiştir. Uzun yıllar alan araştırmalar, temel fikirlerin kesin bir şekilde rafine edilmesiyle sonuçlanmış ve Boltzmann'ın yaklaşımında zirveye ulaşmıştır. Onun, kendi mezarında kısaca bir denklemle gösterilen yaklaşımı, istatistiksel bir mantık yoluyla, bir fiziksel sistemi oluşturan devasa sayıdaki bileşenlerle, sistemin sahip olduğu toplam özellikler arasında bir ilişki kurmaktadır.⁴

Boltzmann'ın yaklaşımı konusunda bir fikir sahibi olabilmek için çift taraflı 693 yaprağı olan *Savaş ve Barış* romanının tüm yapraklarını tek tek ayırdıktan sonra hepsini birden havaya savurup sonra da bu yaprakları rasgele toplayıp üst üste koyarak yeniden istif ettiğinizi hayal edin.⁵ İstif edilmiş olan yaprakların sayfa numaralarına baktığınız zaman, sayfa sıralarının karışmış olma olasılığı karışmamış olma olasılığından çok daha yüksektir. Bunun nedeni açıktır. Sayfa sıralarının karışık olmasının çok yolu varken, düzgün sıralı olmasının yalnızca tek bir yolu vardır. Elbette sıralı olması için, sayfalar 1,2; 3,4; 5,6 vb., 1385, 1386 şeklinde gitmelidir. Başka türlü her sıralama sırasız olur. Basit ama temel bir gözlem, başka bütün koşullar eşit ise, herhangi bir şeyin olması için ne kadar fazla yol varsa, o şeyin olma olasılığının da o kadar yüksek olduğudur. Eğer yere düşen yaprakların yanlış sayfa sırasında olması gibi, bir şeyin olabilmesinin *devasa* sayıda çok yolu varsa, bunun olma olasılığı da *devasa* büyüklükte olur. Bütün bunları önsezilerimizle biliriz. Eğer bir piyango bileti alırsanız, kazanmanızın tek bir yolu vardır. Eğer numaraları birbirinden farklı bir milyon tane piyango bileti alırsanız kazanmanızın bir milyon yolu olur, böylece zengin olma şansınız bir milyon kat fazla olur.

Entropi, verilen herhangi bir fiziksel durumun gerçekleşmesinin fizik yasalarıyla uyumlu yollarını sayarak bu fikri kesinleştiri-

ren bir kavramdır. *Yüksek entropi birçok yol olduğunu; düşük entropi ise az yol olduğunu anlatır.* Eğer Savaş ve Barış'ın yapıları doğru sayla sırasında ise, bu düşük entropili bir düzendir, çünkü bu ölçütü karşılayan bir ve yalnızca bir düzen vardır. Eğer sayfa sırası karışık, bu yüksek entropili bir düzendir çünkü kısa bir hesaplama ile, 124552198453778343366002935370498829163361101246389045136887691264686895591852984504377394069294743950794189338751876527656714059286627151367074739129571382353800016108126465301823420562057147320617202938290291250213170227821191347358265588154107136014311932215753415973385542846729869139815159925119085867260993481056143034134383056377136715110570478694133391293419244096105142887984779085360950895401401259328506329060341095131494663898390526767610427804166730154945522818861025024633866260360150888664701014297085458481514159839254687623129529334782951868123707745965224321488873516792844834030007871706366846238435362424516736228610919853939181503076046890466491297894062503326518685837322713637024739040189109406498813983802654511148768648958164914034264441108719118441642809027571377380906725870843021579501589911623204581301295083438653790819182377773852143753631225316415985892681059765281448013877486970265254626439371893927305921796747169166978155198569769269249467383642278227334577671807331624043363695277118367410428449347223477922340272256307211938539124728809290720342716923779362076501904571097887744535443586803319160959249877443194986997700333249463073243755353229067448176579539562184032951681442710422276081242890487164286648724030703648649348325099966728973446425310349300626622014604312051101093282396249251196897828330619215082827081439365998732684904799416683965774789021245627961956001870608057687789478700986106922659448726934100008726998763399003025591685820639734851035629676461160022515920011972274127331807482

la büyük olasılıkla pek ilgilenmezsiniz. Eğer bir tane yanlış sayfa sıralaması gördüyseniz, hepsini görmüş sayılırsınız. Eğer bilinmeyen, garip bir nedenle hangi yaprağın istifte nerede olduğunun ayrıntılarına boğulduysanız, başka birisinin, size başlangıçta verilmiş olan yığını tekrar karıştırıp karıştırmadığına dikkat bile etmezsiniz. Başlangıçtaki istif sırasız görünürken sonradan yeniden karıştırılan istif de sırasız görünür. Dolayısıyla istatistiksel mantık, sadece yürütme açısından kolaylık sağlamakla kalmaz, ortaya çıkardığı cevap da -sıralı mı yoksa sırasız mı- bizim amacımızla daha çok ilgilidir.

Böylesi bir genel bakış, entropi mantığının istatistiksel temeli için merkezi öneme sahiptir. Nasıl bir piyango biletinin büyük ikramiyeyi kazanma olasılığı, bir başka biletinki ile aynıysa, *Savaş ve Barış* ın yapraklarının her havaya savrulduğunda belirli bir sırada yere düşmesi olasılığı, başka bir sırada düşme olasılığıyla aynıdır. İstatistiksel mantığı uçuran şey, yalnızca iki tane *ilginç* sayfa düzeni *sınıfı* olduğunu biliyor olmamızdır: Sıralı ve sırasız. İlk sınıfın bir üyesi varken (düzgün sayfa sırası 1, 2; 3, 4; vb.) ikinci sınıfın üye sayısı çok büyüktür (tüm olası yanlış sayfa sıraları). Bu iki sınıf, kullanılabilecek anlamlı bir takım oluştururlar, çünkü yukarıda olduğu gibi, bu sınıflar verilen herhangi bir sayfa düzenini şöyle bir karıştırarak yapacağınız genel değerlendirmeyi yansıtır.

Bu durumda bile, bu iki sınıf arasında yalnızca birkaç sayfanın sırasız olduğu bir düzen, yalnızca ilk bölümün sayfalarının sırasız olduğu bir düzen vb. gibi daha ince ayrımlar önerebilirsiniz. Aslında bazı durumlarda bu ara sınıfları göz önüne almak yararlı olabilir. Bununla birlikte, bu alt sınıfların her birindeki olası sayfa düzenlerinin sayısı, sayfaları tam anlamıyla düzensiz olan sınıftaki sayıyla karşılaştırıldığında, hâlâ son derece küçüktür. Örneğin, *Savaş ve Barış*'ın sadece ilk bölümünün sayfalarını kapsayan sırasız düzenlerin sayısı, romanın bütün sayfalarını kapsayan sırasız düzen sayısının 10^{178} de biridir. O nedenle her ne kadar kitap yapraklarının havaya ilk fırlatılışlarında ortaya çıkan sayfa düzenleri, büyük olasılıkla, bütünüyle düzensiz sı-

nıfa değil, bu ara sınıflardan birine ait olacaksa da, bu fırlatılma işinin üst üste defalarca tekrarlanması sonrasında bu sayfa düzeninin belirli bir desen sergilemeyeceği hemen hemen kesindir. Sayfa düzeni bütünüyle düzensiz sınıfa doğru evrilir çünkü bu sınıfa giren çok sayıda sayfa düzeni vardır.

Savaş ve Barış örneği entropinin iki temel özelliğini aydınlatır. Birincisi, *entropi fiziksel bir sistemdeki düzensizliğin bir ölçüsüdür*. Yüksek entropi, sistemi oluşturan bileşenlerin birçok yeniden düzenlenmesinin gözden kaçacağı anlamına gelir ki buradan da sonuçta sistemin yüksek ölçüde düzensiz olduğu anlamı çıkar (*Savaş ve Barış* ın yaprakları bütünüyle karıştıktan sonra daha fazla karıştırma, sayfaları karışık düzende bırakmaya devam edeceği için pek dikkat çekmez), ikincisi, çok bileşenli fiziksel sistemlerde (örneğin havaya fırlatılan çok sayfalı kitapların yaprakları) düzensizlik, düzenliliğe göre çok daha fazla sayıda ortaya çıkacağından, daha büyük düzensizliğe doğru doğal bir evrim vardır. Entropi sözlüğünde bu, *fiziksel sistemler daha yüksek entropili durumlara doğru evrilme eğilimindedirler* anlamına gelir.

Elbette entropi kavramını daha kesin ve evrensel hale getirirken fizikteki tanım, şu veya bu kitabın, görünüşünü aynı bırakan sayfa düzenlerinin sayılmasını içermez. Bunun yerine fizikteki tanım temel bileşenlerin -atomlar, atomaltı parçacıklar, vb.- verilen fiziksel sistemin toplam, "genel" özelliklerini değiştirmeyen yeniden düzenlenme durumlarını sayar. *Savaş ve Barış* örneğinde olduğu gibi, yüksek entropi çok sayıda yeniden düzenlemenin dikkatten kaçacağı, bu da sistemin büyük ölçüde düzensiz olduğu anlamına gelirken", düşük entropi az sayıda yeniden düzenlemenin dikkatten kaçacağı anlamına gelir çünkü sistem zaten yüksek ölçüde düzenlidir*

Yakında kullanışlı olduğu da iyi anlaşılacak olan bir fizik örneği olarak, daha önce baş vurduğumuz kola örneğini düşünelim. Başlangıçta şişenin içinde bulunan karbondioksit gibi bir

* Entropi, terminolojinin fikirleri karmaşık hale getirdiği bir başka örnektir. Eğer kendinize sürekli olarak *düşük* entropinin *yüksek* düzenlilik, *yüksek* entropinin ise *düşük* düzenlilik (ya da düzensizlik) olduğunu hatırlatmak zorunda kalıyorsanız, endişelenmeyin. Bunu ben de sık sık yapmak zorunda kalıyorum.

gaz, odaya düzgün şekilde dağıldığında, bu moleküllerin fark edilebilir bir etki yapmadığı çok *sayıda* yeni düzen vardır. Örneğin, eğer kollarınızı sallarsanız, karbon dioksit molekülleri konum ve hızlarını değiştirerek ileri-geri hareket ederler. Ama toplamda, düzenlerinde nitel bir değişiklik olmaz. Siz kollarınızı sallamadan önce moleküller düzenli bir biçimde dağılmışlardır, siz kollarınızı salladıktan sonra da öyledirler. Düzgün dağılmış gaz düzeni, moleküler bileşenlerinin devasa sayıdaki yenisinden düzenlenme durumlarına karşı duyarsızdır, bu nedenle de yüksek entropili bir durumdur. Tersine, eğer gaz, şişe gibi daha küçük bir hacim içine dağılmış durumdaysa veya bir engelle odanın bir köşesine sıkışmış durumdaysa, entropisi oldukça düşüktür. Bunun nedeni açıktır. Daha ince kitapların daha az sayıda sayfa düzeni olması gibi, daha küçük hacimlerde de moleküllerin bulunabileceği daha az sayıda yer olacağı için, yenisinden düzenlenme sayısı da daha azdır.

Ama şişenin kapağını açtığınızda veya engeli kaldırdığınızda gaz moleküllerine yeni bir evren açıyorsunuz demektir, onlar da itişip kakışarak bu yeni evreni keşfetmek üzere dağılırlar. Neden? Bu, *Savaş ve Barış* ın sayılarıyla aynı istatistiksel mantığa dayanır. Hiç kuşkusuz bazı molekül itişmeleri, bazı gaz moleküllerini tümüyle başlangıçtaki hacim içine doğru hareket etmeye zorlar. Ama yeni hacim, gazın başlangıçtaki hacminden büyük olduğu için, molekülleryeni hacmin içine dağıldıklarındaki yenisinden düzenlenme sayısı, özgün hacimde kaldıkları zamanki yenisinden düzenlenme sayısından *daha fazla* olur. O zaman, ortalama olarak gaz molekülleri başlangıçtaki hacimlerinden dışarı sızarak yavaş yavaş bütün odaya yayılma durumuna yaklaşacaklardır. Böylece, gazın küçük bir hacme sıkışmış olduğu düşük entropili başlangıç durumu, doğal bir biçimde, gazın daha büyük bir hacme yayıldığı daha yüksek entropili bir duruma doğru evrilir. Böyle bir duruma bir kere ulaştığında gaz, bu yüksek entropili durumunu koruma eğilimindedir: İtilme-kakılma hâlâ moleküllerin oraya-buraya gitmelerine, bir düzenden diğerine geçmelerine neden olur ama bu düzenlerin olağanüstü çoğunluğu

gazın genel görünüşünü değiştirmez. Yüksek entropiye sahip olmasının anlamı budur.⁹

İlke olarak, *Savaş ve Barış* romanının sayfalarında olduğu gibi, her karbondioksit molekülünün verilen bir anda kesinlikle nerede olduğunu klasik fizik yasalarını kullanarak belirleyebiliriz. Ama CO₂ moleküllerinin devasa sayısı nedeniyle -bir şişe kolada yaklaşık 10²⁴ tane vardır- böylesi hesapları yapmak aslında pratik olarak olanaksızdır. Bir şekilde yapılabilse bile, milyon kere milyar kere milyar tane parçacığın konumu ve hızı, bize moleküllerin nasıl dağılmış olduğu konusunda pek de bir fikir vermez. Genel yapının istatistiksel özelliklerine odaklanmak -gaz dağılmış durumda mı yoksa sıkışık mı, yani entropisi yüksek mi yoksa düşük mü- çok daha aydınlatıcıdır.

Entropi, İkinci Yasa ve Zaman Oku

Fiziksel sistemlerin yüksek entropili durumlara doğru evrilme eğilimi *termodinamiğin ikinci yasası* olarak bilinir. (İlk yasa, bildiğimiz enerjinin korunumudur.) Yukarıda olduğu gibi bu yasanın da temeli istatistiksel mantıktır: Bir sistemin daha yüksek entropi sahibi olması için çok daha fazla yol vardır ve "daha fazla yol", sistemin bu yüksek entropili durumlardan birine doğru evrilme olasılığının daha yüksek olduğu anlamına gelir. Ama dikkat edilirse bu, çılışmış anlamda bir yasa değildir, çünkü her ne kadar böyle durumlar ender olup gerçekleşme olasılığı düşükse de, bir şey yüksek entropili bir durumdan düşük entropili bir duruma *gidebilir*. Karışık bir kitap yaprağı yığınının önce havaya savurup ve sonra da düzgünce istiflediğiniz zaman, sayfa sırasının düzgün olma olasılığı da *bulunabilir*. Bu olasılık üzerinde yüksek bir iddiaya girmek istemeyebilirsiniz ama bu *olasıdır*. Moleküller arası itme-kakma durumları da dağılmış bulunan karbondioksit moleküllerinin derlenip toplanarak yeniden açık şişeye dolmalarıyla sonuçlanabilir. Bu sonucun ortaya çıkmasını nefesinizi tutarak beklemeyin ama bu *olabilir*.

Savaş ve Barış'taki sayfa sayısının çokluğu ve odadaki gaz moleküllerinin sayısının çokluğu, hem düzenli ve düzensiz du-

rumlar arasındaki entropi farkının bu kadar büyük olmasına ve hem de düşük-entropili sonuçların ortaya çıkma olasılığının bu kadar küçük olmasına neden olur. Eğer çift taraflı iki kitap yaprağını defalarca havaya atarsanız, yere yüzde 12,5 oranında doğru sırada düşmüş olduklarını görürsünüz. Üç kitap yaprağında bu yüzde 2'ye, dört yaprakta yüzde 0,3'e, beş yaprakta yüzde 0,03'e, altı yaprakta yaklaşık yüzde 0,002 ye, on yaprakta 0,000000027ye düşer. 693 yaprakta bunların doğru sırayla yere düşmüş olma olasılığı o kadar küçüktür ki -noktadan sonra o kadar çok sıfır vardır- yayıncım beni bu sayıyı yeniden yazarak bir sayfa daha harcamamam konusunda uyardı. Benzer biçimde, boş bir kola şişesinin içine yalnızca yan yana iki gaz molekülü koyarsanız, oda sıcaklığında moleküllerin rasgele hareketlerinin, bunları her birkaç saniyede bir, bir araya (birbirlerinin birkaç milimetre yakınına) getirdiğini bulursunuz. Ama üç moleküllük bir grup için günlerce, dört molekül için yıllarca beklemeniz gerekir. Milyon kere milyar kere milyar molekülden oluşan bir başlangıç durumunda, bu moleküllerin rasgele hareketlerinin bunları küçük ve düzenli bir grup haline getirmeleri için geçmesi gereken zaman, evrenin şimdiki yaşından daha uzundur. Çok bileşenli sistemlerin düzensizliğe doğru evrileceklerine ölümün ve vergilerin varlığından daha büyük bir kesinlikle güvenebiliriz.

Her ne kadar anında fark edilmese de, artık önemli bir noktaya geldik. Termodinamiğin ikinci yasası bizim, zamanın okunu, yani *fiziksel sistemler çok sayıda bileşenden oluştuğunda ortaya çıkan oku* bulmamızı sağlamış gibi görünüyor. Küçük bir kutuya konmuş (ve her birinin hareketlerinin izlenmesini sağlayan bir madde eklenmiş) birkaç karbondioksit molekülünün hareketlerini gösteren bir film izlemiş olsaydınız, filmin ileri mi yoksa geri mi oynatıldığını anlayamazdınız. İki molekül şuraya buraya giderek, bazen bir araya gelir, bazense ayrılırlar ama zamanda ileri yönü geri yönden ayırmaya yarayacak önemli bir davranış sergilemezler. Ama bir kutuya (diyelim küçük ve yoğun bir molekül topağı olarak) konmuş 10^{24} molekülün filmini izlemiş

olsanız, filmin ileri mi yoksa geri mi oynatıldığını kolayca anlarsınız: İleri zaman yönü, çok yüksek bir olasılıkla, gaz moleküllerinin gittikçe daha fazla düzgün dağılarak ve dolayısıyla *gittikçe daha yüksek entropiye ulaştığı yöndür*. Bunun yerine, eğer film bir örnek olarak dağılmış gaz moleküllerinin bir araya gelerek sıkı bir grup oluşturduğunu gösteriyorsa, filmin geri oynatıldığını hemen anlarsınız.

Aynı mantık temel olarak gündelik hayatta sık sık karşılaştığımız her şeye, yani büyük sayıda bileşenden oluşan her şeye uygulanır: Zamanın ileri oku entropinin artma yönünü gösterir. Eğer masanın üzerine konmuş bir bardak buzlu suyu gösteren bir film izlerseniz, buzun erimesini izleyerek hangi yönün zamanda ileri yön olduğunu anlayabilirsiniz, H_2O molekülleri bardakta dağılarak entropiyi artırır. Eğer kırılan bir yumurtayı gösteren bir film izlerseniz, yumurtanın bileşenlerinin gittikçe daha düzensiz olmasını izleyerek hangi yönün zamanda ileri yön olduğunu bulabilirsiniz, dağılan yumurta parçacıktan entropiyi artırır.

Gördüğünüz gibi entropi kavramı, daha önce bulduğumuz "kolay mı yoksa zor mu?" sonucunun kesin bir yorumunu sunar. *Savaş ve Barış*'ın yapraklarının tümüyle sırasız olarak düşmesi çok kolaydır çünkü sırasız düzenlerin sayısı çok *fazladır*. Yaprakların tam sıralı olarak düşmesi çok zordur çünkü yüzlerce sayfanın Tolstoy'un düşündüğü doğru sırayla düşmesi gerekir. Yumurtanın kırılması kolaydır çünkü kırılmanın pek çok yolu vardır. Kırılmış yumurtanın yeniden toplanması zordur çünkü devasa sayıdaki yumurta bileşenlerinin doğru sırayla bir araya gelip masanın üzerinde durmakta olan yepyeni, düzgün bir yumurta oluşturmaları zordur. Çok sayıda bileşenden oluşan şeylerde düşükten yüksek entropiye -düzenden düzensizliğe- gidiş kolaydır, o nedenle her zaman olur. Yüksekten düşük entropiye -düzensizlikten düzene- gidişse zordur, o nedenle en iyi olasılıkla ender olarak ortaya çıkar.

Ama bu entropi okunun da tam anlamıyla katı olmadığına dikkat edin; zamanın yönünün yüzde 100 yanılmaz olduğu yolun-

da bir iddia yoktur. Yaklaşım, bu ve diğer süreçlerin ters yönde ortaya çıkmalarına izin verecek kadar da esnektir, ikinci yasa entropi artışının doğanın ihlal edilemez bir gerçeği değil, yalnızca istatistiksel bir olasılık olduğunu söylediği için, kitap yapılarının yere tam sıralı olarak düşmeleri, gaz moleküllerinin yeniden şişeye dolmaları veya kırılmış yumurtaların yeniden bütünleşmeleri gibi ender olasılıklara da izin verir, ikinci yasa, entropinin matematiğini kullanarak, kesin bir biçimde bu olayların olasılığının ne kadar düşük olduğunu (daha önce verilen devasa sayıyı hatırlayın) ifade eder ama bunların olabileceğini de kabul eder.

Bu, pek inandırıcı bir öyküymüş gibi durmuyor. İstatistiksel ve olasılıkçı mantık bize termodinamiğin ikinci yasasını sağlamıştır. Karşılık olarak ikinci yasa da bize geçmiş dediğimiz şeyle gelecek dediğimiz şey arasındaki sezgisel farkı ortaya koymuştur. Bu yasa, gündelik hayattaki şeylerin, tipik olarak devasa sayıda çok bileşenden oluşan şeylerin neden *böyle* başlayıp şöyle bittiğinin, bunların neden hiçbir zaman şöyle başlayıp *böyle* bittiğini görmediğimiz pratik bir açıklamasını yapmıştır. Ama yıllar geçtikçe -Lord Kelvin, Josel Loschmidt, Henri Poincare, S. H. Burbury, Ernest Zermelo ve Willard Gibbs gibi fizikçilerin önemli katkıları sayesinde- Ludwig Boltzmann zamanın okunun ne kadar şaşırtıcı olduğunu takdir etmiştir. Boltzmann, her ne kadar entropi bilmeden önemli yönlerini aydınlatmış olsa da, geçmiş ve geleceğin neden bu kadar farklı görüldüğü sorusunun cevaplanmadığını fark etmiştir. Entropi, soruyu önemli bir yolla, beklenmedik sonuçlara yol açan bir yolla, yeniden tanımlamıştır.

Entropi: Geçmiş ve Gelecek

Daha önce, geçmişle gelecek arasındaki ikilemi gündelik gözlemlerimizi Newton'un klasik fizik yasalarıyla karşılaştırarak ortaya koymuştuk. Sürekli olarak olayların zamanda gelişme yönüne ilişkin olarak açık bir yönün varlığını yaşadığımızı ama yasaların kendilerinin zamanda geçmiş ve gelecek dediğimiz şeyle-

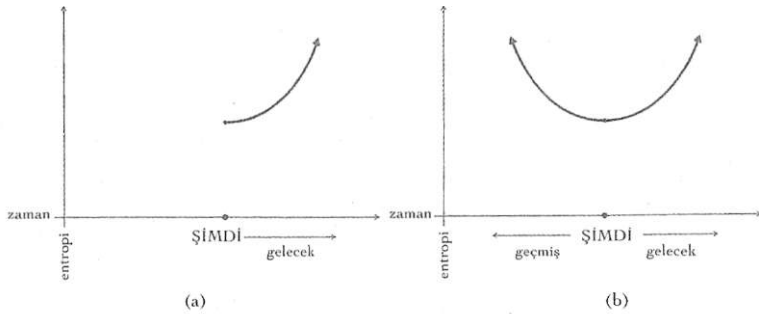
re tam olarak eşit uzaklıkta durduğunu vurgulamıştık. Fizik yasalarının içinde zamanın yönünü belirten bir ok, "Bu yasaları zamanın bu yönünde kullanın, ters yönde değil" diyen bir yön gösterici olmadığı için şunu sormak durumunda kalmıştık: Eğer bu yasalar her iki zaman yönüne de simetrik olarak yaklaşıyorsa, neden yaşananların kendileri hep aynı yönde oluyor da tersinde değil? Zamanın gözlenen ve yaşanan yönselliği nereden geliyor?

Geçtiğimiz alt bölümde, geleceği entropinin arttığı yön olarak ayırt eden termodinamiğin ikinci yasası aracılığıyla bir ilerleme kaydetmişiz gibi görünüyor. Ama biraz daha düşünülürse, o kadar da basit değil. Dikkat ederseniz, entropiyi ve ikinci yasayı tartışırken klasik fiziğin yasalarını herhangi bir şekilde değiştirmedik. Bütün yaptığımız, bu yasaları istatistiksel "genel" yapıda kullanmaktır: ince ayrıntıları gözardı ettik (*Savaş ve Barış* romanının dağılmış yapraklarının kesin sırası, kırılan yumurtanın bileşenlerinin kesin konum ve hızları, kola şişesindeki CO₂ moleküllerinin kesin konum ve hızları) ve bunun yerine dikkatimizi toplam, genel özellikler üzerinde yoğunlaştırdık (kitap yaprakları sıralı mı sırasız mı, yumurta kırık mı değil mi, gaz molekülleri yayılmış mı yayılmamış mı). Fiziksel sistemlerin yeterince karmaşık olduğu durumlarda (çok yapraklı kitaplar, kırılıp parçalanabilen kırılğan cisimler, çok molekülden oluşan gazlar), bunların düzenli ve düzensiz durumları arasında devasa bir entropi farkı vardır. Bu da, bu sistemlerin düşük entropiden yüksek entropiye doğru evrilme olasılıklarının devasa boyutta olduğu anlamına gelir ki, termodinamiğin ikinci yasasının kabiice tanımını zaten budur. Ama dikkat edilmesi gereken kilit nokta, ikinci yasanın *türev* olduğudur: Bu yasa yalnızca olasılık mantığının Newton'un hareket yasalarına uygulanmasının bir sonucudur.

Bu bizi basit ama hayret verici bir noktaya götürür: *Newton yasalarında yapısal bir zaman yönü olmadığı için, sistemlerin geleceğe doğru düşük entropiden yüksek entropiye evrilecekleri yolundaki düşüncümüzün tamamı, geçmişe doğru uygulandığında da aynı doğrulukla işler.* Yine, fiziğin temel yasaları zaman tersinmesi açısından simetrik olduğu için, bu yasalar açısın-

dan bizim geçmiş ve gelecek dediğimiz şeyleri ayırt etmenin bile bir yolu yoktur. Nasıl uzayın derinliklerinde yukarıyı ve aşağıyı gösteren oklar yoksa, klasik fiziğin yasalarında da bu yönün gelecek, şu yönünse geçmiş olduğunu belirleyen hiçbir şey yoktur. Yasalar zamansal bir yönelme önermez; bu, yasaların tümüyle duyarsız olduğu bir ayrımdır. Hareket yasaları cisimlerin nasıl değiştiğinden sorumlu oldukları için -hem geçmiş dediğimiz yöne hem de gelecek dediğimiz yöne doğru- ikinci yasanın arkasındaki istatistiksel/olasılıkçı düşünüş biçimi, her iki zaman yönüne de aynı şekilde uygulanır. Bu nedenle, *fiziksel bir sistemin yalnızca gelecekteki entropisinin yüksek olması konusunda eziği büyüklükte bir olasılık olmakla kalmaz, geçmişteki entropisinin yüksek olduğu konusunda da aynı eziği büyüklükte bir olasılık vardır.* Bunu Şekil 6.2'de gösterdik.

Bu, aşağıdakilerin tümü için kilit nokta olmakla birlikte aldatıcı bir şekilde karışık gibi durmaktadır. Termodinamiğin ikinci yasasına göre, eğer entropi geleceğe doğru artıyorsa, o zaman geçmişe doğru zorunlu olarak *azalacağı* inancı yaygın bir hattadır. Karışıklığın başladığı yer de burasıdır. İkinci yasa aslında şunu söyler: Eğer verilen bir anda bir fiziksel sistem olası en yüksek entropiye sahip değilse, o zaman olağanüstü büyük bir olasılıkla gelecekte daha yüksek bir entropiye sahip olacaktır ve



Şekil 6.2(a) Genelde tanımlandığı gibi, termodinamiğin ikinci yasası entropinin verilen bir andan geleceğe doğru artacağını ima eder. (b) Bilinen doğa yasaları geçmiş ve geleceğe eşit davrandığı için, ikinci yasa, aslında entropinin verilen bir noktadan hem geçmişe, hem de geleceğe doğru artacağını ima eder.

geçmişteki entropisi de daha yüksektir. Şekil 6.2b'nin içeriği budur. Geçmiş ve gelecek ayrımı olmayan yasalarla böylesi bir simetri kaçınılmazdır.

Temel ders budur. Bu temel ders bize zamanın entropi okunun *iki-başlı* olduğunu söyler. Entropi artış oku belirlenmiş bir andan geleceği ve geçmişi gösterir. Bu dayatılan zamanın *tebliğ* oluşunun açıklaması olarak entropi okunun gösterilmesini kesin bir biçimde zora koşar.

İki başlı entropi okunun ne ima ettiği konusunda somut terimlerle bir düşünün. Eğer sıcak bir güne ve bir bardak suyun içinde kısmen erimiş buz parçaları görüyorsanız, o zaman büyük bir güvenle, yarım saat sonra buzların daha da erimiş bir durumda olacağını söyleyebilirsiniz çünkü ne kadar fazla erirlerse, entropileri de o kadar yüksek olur.¹¹ Ama *aynı* güvenle yarım saat önce de daha erimiş bir şekilde olduklarını söyleyebilirsiniz, çünkü *aynı* istatistiksel mantık, entropinin geçmişe doğru da artması gerektiğini ima eder. Aynı sonuç, her gün karşılaştığımız sayısız başka örneğe de uygulanabilir. Entropinin geleceğe doğru artacağı yolundaki inancınız -kısmen yayılmış gaz moleküllerinden daha fazla yayılmış gaz moleküllerine, kısmen karışmış sayıla numaralarından daha da karışmış sayfa numaralarına- entropinin geçmişte de daha yüksek olduğu inancıyla *tam olarak* örtüşmelidir.

Sorun, bu sonuçların yarısının düpedüz yanlış gibi görünmekte olmasıdır. Entropi mantığı zamanın bir yönüne, gelecek adını verdiğimiz yöne uygulandığında doğru ve anlamlı sonuçlar verirken, zamanın diğer yönüne, geçmiş adını verdiğimiz yöne uygulandığında yanlış ve görünüşe bakılırsa gülünç sonuçlar vermektedir. içinde kısmen erimiş buz bulunan bir bardak su kendiliğinden, içinde hiç buz olmayan bir bardak su olarak başlayıp, yeniden eriyip suya dönüşmek üzere, su moleküllerinin birbirine yapışıp buza dönüşmesiyle ortaya çıkmaz. *Savaş ve Barış* ın dağılmış yaprakları, tam olarak sırasız olarak başlayıp havaya fırlatıldıkça, giderek daha sıralı hale girip sonra yeniden git gide daha karışık hale gelmez. Mutfağa geri dönersek, yumurtalar kı-

rılmış olarak başlayıp önce yapışarak bütün yumurta oluşturup sonra yeniden dağılmazlar.

Yoksa öyle mi?

Matematiği İzlemek

Yüzyıllar süren bilimsel araştırmalar, matematiğin bize evrenin çözümlenmesi için güçlü ve keskin bir dil sağladığını göstermiştir. Aslında modern bilimin tarihi, matematiğin hem önsezilere hem de deneyimlere aykırı gibi görünen öngörülerinin (evrendeki kara deliklerin varlığı, evrende karşı-maddenin varlığı, birbirinden uzak parçacıkların bağlantılı olabilecekleri vb.) sonuçta gözlem ve deneylerce doğrulandığı örneklerle doludur. Böylesi gelişmeler, kuramsal fizik kültürü üzerine damgalarını son derece derin bir şekilde vurmuşlardır. Fizikçiler, yeterince dikkatli kullanıldığında matematiğin, gerçekliğe giden, emin bir yol olduğunun farkına varmışlardır.

Bu nedenle, doğa yasalarının matematiksel çözümlemesi, verilen bir andan geçmişe *ve* geleceğe doğru entropinin artması gerektiğini gösterdiği zaman, fizikçiler bu sonucu göz ardı etmezler. Bunun yerine fizikçilerin Hipokrat yeminine benzeyen bir yemin, araştırmacıları insan deneyimlerinin görünürdeki gerçekleri konusunda derin ve sağlıklı bir kuşkuculuğu sürdürmeye ve aynı kuşkucu tavra eşlik eden özenli bir çalışmayla matematiği izleyip ne sonuca vardığını görmeye yönlendirir. Ancak o zaman fiziksel bir yasa ile sağduyu arasında kalan herhangi bir uyumsuzluğu gereği gibi değerlendirebilir ve yorumlayabiliriz.

Bu sonuca ulaşmak için, saatin gece 22:30 olduğunu, son yarım saattir bardaktaki buzlu suya baktığınızı (barda sakın bir gece) ve buz küplerinin yavaş yavaş eriyerek küçük, şekilsiz yapılara dönüştüğünü gözlediğinizi varsayın. Barmenin yarım saat önce tam küp şeklindeki buzları bardağa doldurduğundan hiç kuşkunuz yok; kuşkunuz yok çünkü belleğinize güveniyorsunuz. Ama eğer bir şekilde, son yarım saat içinde ne olup bittiğine ilişkin güveniniz sarsılacak olursa, o zaman barda karşınız-

daki taburede oturan ve buzların erimesini izleyen arkadaşını-
za sorabilir (barda gerçekten sakın geçen bir gece) veya barda-
ki güvenlik kamerasının çektiği filme bakabilirsiniz ki her iki-
si de belleğinizdeki doğru olduğunu onaylayacaktır. Bu du-
rumda, eğer kendinize önünüzdeki yarım saat içinde ne olma-
sını beklediğiniz sorusunu sorarsanız, büyük olasılıkla erimeye
devam edecekleri sonucuna varırsınız. Eğer artık entropi kav-
ramı size yeterince tanıdık geliyorsa, bu öngörünüzü, şu anda,
22:30'da gördüğünüz durumdan geleceğe doğru entropinin ar-
tacağı yolundaki ezici büyüklükteki olasılığa başvurarak açık-
larsınız. Bunların tümü önsezilerimiz ve deneyimlerimiz açısın-
dan anlamlıdır.

Ama gördüğümüz gibi, böyle entropi mantığı -basit bir biçim-
de şeylerin git gide düzensiz hale geleceğini çünkü düzensiz ol-
manın pek çok yolu olduğunu söyleyen ve olayların zamanla, ge-
leceğe doğru nasıl gelişeceğini açıklamakta başarılı olan mantık

entropinin geçmişte de daha yüksek olma olasılığının büyük ol-
duğunu öne sürer. Bu da, 22:30'da kısmen erimiş olduğunu gör-
düğünüz buz küplerinin; daha önceki zamanlarda aslında *daha*
fazla erimiş olduğu; bu buzların gece saat 22:00'da hiç erimemiş
buz küpleri olarak başlamadığı, oda sıcaklığındaki sudan yavaş
yavaş buza dönüştükleri ve yavaş yavaş erimeye devam ederek
saat gece 23:00'da yeniden oda sıcaklığında bir bardak suya dö-
nüşecekleri anlamına gelecektir.

Hiç kuşkusuz, kulağa çok acayip geliyor, belki de delilik di-
yebilirsiniz. Gerçeği söylemek gerekirse, yalnızca oda sıcaklığın-
daki bir bardak sudaki H_2O molekülleri bir araya gelerek ken-
diliklerinden buza dönüşmezler, güvenlik kamerasındaki sayı-
sal görüntüler, beyninizdeki ve karşı taburede oturan arkadaşın-
ızın beynindeki nöronlar, hepsi de kendilerini, böyle bir şey as-
la olmamış olsa da, 22:30'da tam oluşmuş buz küplerinin eridiği-
ne tanık olmak üzere ayarlamak zorundadır. Kulağa acayip ge-
len bu sonuç, entropi mantığının sadık bir uygulamasının -sa-
at 22:30'da kısmen erimiş olduğunu gördüğünüz buzların neden
23:00'a doğru erimeye devam ettiğini açıklamak üzere başvur-

duğunuz mantık- fizik yasalarınca emredildiği gibi zamansal bir simetri uygulandığında vardığı yerdir, içinde yapısal bir geçmiş ve gelecek ayrımı olmayan temel hareket yasalarına, matematiğin verilen bir anın öncesine ve sonrasına doğru aynı şekilde davrandığı yasalara sahip olmanın güçlüğü buradadır.¹²

Kısa bir süre içinde, eşitlikçi entropi mantığının bizi getirdiği bu acayip yerden bir çıkış noktası bulacağımıza emin olabilirsiniz; sizi belleğinizin ve kayıtların hiç olmamış geçmişe ait olduğuna ikna etmeye çalışacak değilim (*Matrix* filminin hayranlarından özür dilerim). Ama önsezi ve matematik yasaları arasındaki parçalanmışlığın yerini kesin olarak belirlemenin çok yararlı olduğunu göreceğiz. O zaman, bu yolu izlemeyi sürdürelim.

Zor Bir Durum

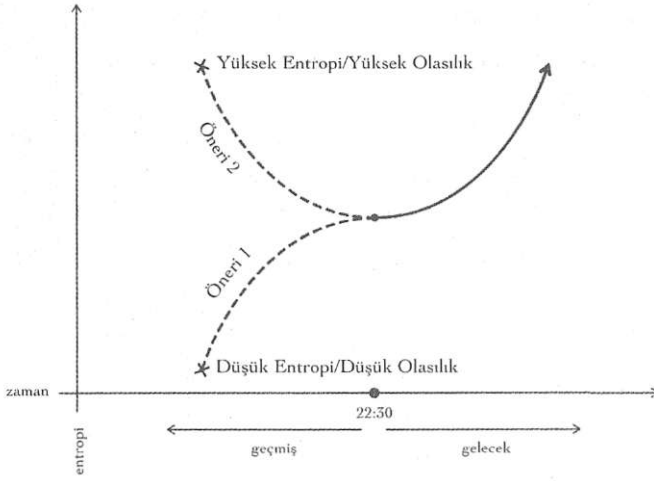
Önsezileriniz daha yüksek entropili bir geçmiş karşısında duraklar çünkü olayların zamanın normal, ileri yönünde gelişmesine bakıldığında, düzenlilikte kendiliğinden bir artış olmasını gerektirir: Su molekülleri kendiliklerinden 0 derece Celsius'a kadar soğuyarak buza dönüşürler, beyinler kendiliklerinden geçmişte yaşanmamış anılara sahip olurlar, video kameralar kendiliklerinden hiç olmamış olayların görüntülerini üretirler vb. Tüm de son derece olağan dışı görünen ve geçmişi açıklamak üzere ortaya atılan bu önerilerle Oliver Stone bile dalga geçer. Bu noktada fiziksel yasalarla entropinin matematiği, önsezilerinizle tamamıyla uyuşur. Zamanın ileri yönünde gece saat 22:00'dan 22:30'a kadar bakıldığında, böyle bir olaylar dizisi termodinamiğin ikinci yasası tarafından pek hoş karşılanmaz -entropide bir düşmeyle sonuçlanır- ve bu nedenle de olanaksız olmasa bile, olasılığı çok düşüktür.

Tersine, önsezileriniz ve yaşam deneyimleriniz size, çok daha yüksek olasılıklı olan bir olaylar dizisinin, gece saat 22:00'da tam oluşmuş olan buz küplerinin, şu anda, 22:30 da bardağınızda gördüğünüz kısmen erimiş buzlara dönüşmesi olduğunu söyler. Ama bu noktada fiziksel yasalarla entropinin matematiği, bek-

lentilerinizle yalnızca kısmen örtüşür. *Eğer* saat 22:00'da gerçekten tam oluşmuş buz küpleri olsaydı, o zaman en olası olaylar dizisi 22:30 da bunların kısmen erimiş buzlara dönüşmesi olurdu ve bu, önsezilerle matematiğin tam anlamıyla uyuşması anlamına gelirdi: Sonuçta entropideki artış hem termodinamiğin ikinci yasasıyla, hem de yaşam deneyimleriyle uyumludur. Ama matematikle önsezilerin ayrıldığı yer, *şu anda, 22:30 da hiç kuşkusuz, güvenilir bir şekilde kısmen erimiş buz küpleri görüyor olmanıza ilişkin bir gözlem verildiğinde*, önsezilerimizin, matematiğin aksine saat 22:00'da gerçekten tam oluşmuş buz küpleri olma veya olmama olasılığını dikkate almamasıdır.

Bu, kilit öneme sahip bir nokta olduğu için biraz açıklayayım. Termodinamiğin ikinci yasasından çıkarılacak temel ders, fiziksel sistemlerin, yüksek entropili durumlara sahip olmasının çok yolu olduğu için, böyle durumlarda bulunmaya olağanüstü yüksek bir eğilimleri olduğudur. Bir kere böylesi yüksek entropili bir duruma geldiğinde, fiziksel sistemlerin bu durumu sürdürme eğilimleri de olağanüstü yüksektir. Yüksek entropi, varlığın doğal durumudur. Bir fiziksel sistemin yüksek entropili bir durumda olması sizi askı şaşırtmamalı veya bu durumu açıklama gereği duymamalısınız. Böyle durumlar normaldir. Tam tersine, açıklanma gereği olan durumlar, verilen bir fiziksel sistemin neden düzenli, düşük entropili bir durumda olduğudur. Bu durumlar normal değildir. Elbette gerçekleşebilirler. Ama entropi açısından, böylesi düzenli durumlar ender görülen ve açıklanması gereken sapmalardır. Dolayısıyla, incelediğimiz bölümde tartışmasız doğru olarak kabul ettiğimiz olgunun -gece saat 22:30'daki düşük-entropili, kısmen erimiş buz küpleri gözleminiz- aslında açıklanmaya ihtiyacı vardır.

Ve olasılık bakış açısından bu düşük-entropili durumu *daha düşük-entropili* bir durumla, gece saat 22:00'da çok *daha düzenli, daha tam* buz küplerinin varlığının *daha* eski, daha düzenli bir ortamda gözlenmesi gibi çok *daha düşük olasılıklı* bir durumla açıklamak saçmadır. Bunun yerine, olayların tam anlamıyla normal, yüksek entropili bir durumda ve şaşırtıcı olmayan



Şekil 6.3 Şimdi, 22:30'da kısmen erimiş halde olan buz küplerinin bu hale nasıl geldiğine ilişkin iki senaryo önerisinin karşılaştırılması. 1. öneri eriyen buz belleğinize paralel olarak ama saat 22:00'da görelî olarak düşük entropili bir başlangıç gerektiriyor. 2. öneri, 22:30'da görmekte olduğunuz kısmen erimiş buzun bir bardak sudan, saat 22:00'da yüksek-entropili, yüksek olasılıklı, düzensiz bir durumdan başlayarak oluştuğunu söyleyerek belleğinize meydan okuyor. Gece 22:30'a doğru giden yolun her adımında 2. önerinin içerdiği durumlar 1. önerinin içerdiği durumlara oranla çok daha olasıdır -çünkü grafikte de gördüğünüz gibi, bu durumların entropisi daha yüksektir- ve bu nedenle de 2. öneri istatistiksel olarak favoridir.

bir biçimde başlamış olması, çok daha olasıdır: İçinde kesinlikle buz bulunmayan bir bardak sıvı halinde su. Daha sonra son derece düşük olasılıklı olmakla birlikte ara sıra gerçekleşen istatistiksel bir dalgalanma sonucunda termodinamiğin ikinci yasasına ters düşecek şekilde, kısmen oluşmuş buz küplerinin ortaya çıktığı, daha düşük entropili bir duruma doğru evrilmiştir. Her ne kadar ender görülen ve bize pek tanıdık gelmeyen bir süreci gerektiriyorsa da, bu evrim, çok daha düşük-entropili, olasılığı çok daha düşük ve hatta çok daha ender görülen bir durum olan *tam* oluşmuş buz küplerinin olması durumundan tümüyle uzak durmaktadır. Şekil 6.3'de göreceğiniz gibi gece 22:00 ve 22:30 arasında her an, kulağa garip gelen bu evrim, normal buzun erimesi senaryosundan *daha yüksek* entropiye sahiptir ve bu nedenle de 22:30'daki kabul edilen gözlemi, tam oluşmuş buz küplerinin

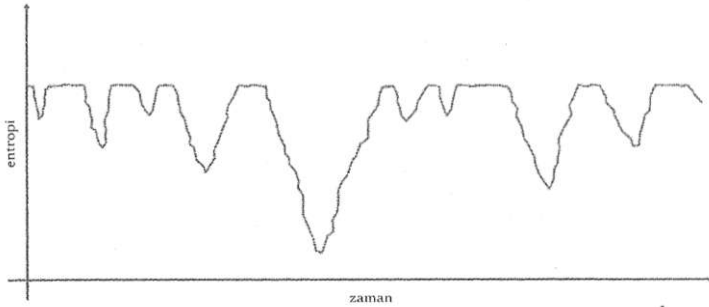
bulunduğu senaryodan *daha olası* -çok daha olası- bir senaryoya la gerçekleştirir.¹³ işte bu, konunun düğüm noktasıdır.*

Bütün evrenin aynı çözümlemeye tabi olduğunu fark etmek Boltzmann için küçük bir adımdı. Evrende şu an çevrenize bakarsanız, gördükleriniz büyük ölçüde biyolojik bir örgütlenmeyi, kimyasal bir yapıyı ve fiziksel düzeni yansıtır. Her ne kadar evren, tümüyle düzensiz bir karmaşa olabilirdi ise de öyle değildir. Neden böyle? Düzen nereden geliyor? Buz küplerinde olduğu gibi, olasılık açısından gördüğümüz evrenin geçmişteki çok daha düzenli -ve daha da az olası- bir durumdan yavaş yavaş günümüzdeki durumuna evrilmiş olma olasılığı son derece düşüktür. Evren çok sayıda bileşenden oluştuğu için, düzenli ve düzensiz ölçekleri çok büyümüştür. Dolayısıyla barda doğru olan şey bütün evren için de alabildiğine doğrudur: Şimdi görmekte olduğumuz evrenin normal, şaşırtıcı olmayan, yüksek entropili, tümüyle düzensiz bir yapıdan istatistiksel olarak ender görülen bir dalgalanma sonucunda doğmuş olması çok *daha* -nefes kesici ölçüde çok daha- olasıdır.

Şöyle düşünün: Eğer bir avuç bozuk parayı defalarca havaya atarsanız, er veya geç hepsi yere tura olarak düşecektir. Eğer *Savaş ve Barışın* dağılmış yapraklarını defalarca havaya alacak kadar, sonsuza yakın sabrınız varsa, yapraklar er ya da

* Hatırlarsanız, 190. ve 191. sayfalarda yalnızca çift taraflı 693 kitap yaprağının sıralı (düzenli) ve sırasız (düzensiz) durumları arasındaki devasa farkı göstermiştik. Şimdi ise kabaca 10^{24} H₂O molekülünün davranışını tartışıyoruz, bu yüzden düzenli ve düzensiz durumların sayısı arasındaki fark nefes kesici miktarda büyüktür. Dahası aynı mantıksal düşünüş biçimi sizi oluşturan ve çevrenizdeki bütün atomlar (beyinler, güvenlik kameraları, hava molekülleri vb.) için de geçerlidir. Yani, belleğinize güveneceğiniz standart açıklamada yalnızca kısmen erimiş buz küpleri, saat 22:00'da daha düzenli -daha az olası bir durumdan başlamakla kalmaz, her şey öyle başlar: bir video kamera, bir olaylar dizisini kaydettiği zaman, entropide net bir artış olur (kayıt sürecinde salınan ısı ve gürültü nedeniyle); benzer biçimde, beyin bir anıyı kaydettiği zaman, her ne kadar mikroskopik ayrıntıları tam anlayamıyor olsak da, yine entropide net bir artış olur (beyin düzene giriyor olabilir ama bütün düzen yaratan süreçlerde olduğu gibi, üretilen ısıyı hesaba katacak olursak, entropide net bir artış olur). Eğer saat 22:00 ile 22:30 arasında bardaki entropiyi iki senaryo ile karşılaştırsak -bunlardan biri belleğinize güvendiğiniz durumdur, diğeri ise şeylerin kendilerini, düzensiz bir başlangıç durumundan, kendiliğinden, şimdi, 22:30'da gördüklerinizle uyumlu olmayaya arladıkları durum- aralarında devasa bir entropi farkı vardır. İkinci senaryo, yoldaki her adım, ilk senaryodan daha yüksek entropilidir ve bu yüzden, olasılık bakış açısına göre olasılığı çok daha yüksektir.

geç yere doğru sayfa sırasıyla düşecektir. Eğer açılmış ve gazı kaçmış bir kola şişesiyle yeterince beklerseniz, itişen karbondioksit molekülleri kendilerini yeniden şişenin içine hapsedecektir. Boltzmann'ın itirazı şuydu ki, eğer evren yeterince uzun süre beklerse -belki de neredeyse sonsuza yakın bir süre- normal, yüksek-entropili, yüksek olasılıklı, tümüyle düzensiz durumu, çarpışarak, itişip kakışarak, parçacıkların ve ısınımın rasgele akımıyla, er ya da geç hepimizin şimdi görmekte olduğu düzeni ortaya çıkaracaktır. Her ne kadar yansıtıyor göründükleri geçmiş gerçekten hiç olmamış olsa bile, bedenlerimiz ve beyinlerimiz bu kaostan tam oluşmuş olarak -belleklerle, bilgiyle ve becerilerle donanmış olarak- çıkar. Bildiğimiz her şey, değer verdiğimiz her şey, ender ama ara sıra beklenen ve sonsuzmuş gibi görünen düzensizliği bölen istatistiksel bir dalgalanmadan başka bir şey değildir. Bu, şematik olarak Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Evrenin toplam entropisinin zamanla değişiminin şematik gösterimi. Grafik, evrenin zamanının çoğunu tümden düzensiz -biryüksek entropi durumu- bir durumda geçirdiğini ve ara sıra çeşitli derecelerde düzenlilik durumları, değişik düşük entropili durumlar yaşadığını gösteriyor. Entropi derinliği ne kadar fazlaysa, dalgalanma olasılığı da o kadar düşüktür. Evrende günümüzdeki düzen türünden entropideki önemli derinlikler son derece düşük olasılıklıdır ve ender olarak ortaya çıkarlar.

Geriye Bir adım Atmak

Yıllar önce bu fikirle ilk karşılaştığımda, bir şok geçirmiştım. O noktaya kadar entropi kavramını iyi anladığımı düşünürdüm ama anlaşılan oydu ki, okuduğum ders kitaplarından entropi-

nin yalnızca geleceğe ilişkin öngörülerini göz önüne almıştım. Biraz önce gördüğümüz gibi, entropi geleceğe doğru uygulandığında sağduyumuzu ve yaşadıklarımızı doğrulayan sonuçlar verirken, geçmişe doğru uygulandığında sağduyumuzla ve yaşadıklarımızla çelişen sonuçlar ortaya koyuyor. Uzun zamandır tanıdığınız bir arkadaşınızın size ihanet ettiğini öğrenmeniz kadar kötü değil ama benim için buna yakın bir şeydi.

Bununla birlikte bazen çok çabuk karar vermek pek iyi değildir, entropinin beklentileri karşılamakta görünürdeki başarısızlığı böyle bir duruma iyi bir örnektir. Büyük olasılıkla sizin de düşündüğünüz gibi birdenbire yoktan var olma fikrine alışkın olmamız, kolay yutulur bir lokma değildir. Evrenin bu açıklamasının gerçek ve önemli kabul ettiğimiz her şeyin doğruluğuna meydan okuması "sırf" bu yüzden olamaz. Aynı zamanda kritik soruları cevapsız bırakır. Örneğin, günümüzde evren ne kadar düzenli ise -Şekil 6.4'teki derinlik ne kadar fazla ise- onu var etmek için gerekli olan istatistiksel sapmanın olasılığı da o kadar düşüktür. Bu yüzden eğer evren çevremizde gördüğümüz şeyleri az çok bu duruma getirmek için gerçek düzen miktarından yana cimrilik etmiş olması gerekiyor idiyse, olasılık düşüncesi evrenin bunu yapmış olduğu sonucuna varır. Ama evreni incelediğimiz zaman bazı fırsatların kaçmış olduğunu görüyoruz çünkü etrafta, olmaları gerekenden daha düzenli olan pek çok şey var. Eğer Michael Jackson *Thriller*'i hiç kaydetmemiş olsaydı ve bu albümün dünyanın her yanına dağıtılan milyonlarca kopyası, düşük entropiye doğru olan sapkın bir dalgalanmanın bir parçası olsaydı, yalnızca bir milyon veya yarım milyon veya birkaç kopya ortaya çıktığında sapma çok daha az olurdu. Eğer evrim hiç olmamış olsaydı ve biz insanlar daha düşük entropiye doğru sapkın bir sıçramanın sonucu olarak ortaya çıkmış olsaydık, o zaman böylesi tutarlı ve düzenli fosil kayıtlarının olmaması durumunda sapma çok daha az olurdu. Eğer Büyük Patlama hiç gerçekleşmemiş ve gördüğümüz 100 milyar galaksi, düşük entropiye doğru böylesi sapkın bir sıçrama sonucu ortaya çıkmış olsaydı, o zaman 100 milyar yerine 50 milyar, veya 5000

veya sadece birkaç tane veya yalnızca bir galaksinin olması durumunda bu sapma daha az olurdu. Dolayısıyla, eğer evrenimizin istatistiksel bir dalgalanma -mutlu bir raslantı- olduğu düşünçesinin herhangi bir geçerliliği varsa, o zaman neden ve nasıl evrenin *bu kadar* düşük entropiye sahip olduğunun da açıklanması gerekir.

Daha da baskılayıcı olarak, eğer gerçekten belleğinize ve kayıtlara güvenemiyorsanız, o zaman fizik yasalarına da güvenemezsiniz. Fizik yasalarının geçerliliği, olumlu sonuçları aynı bellek ve kayıtlarla doğrulanan çok sayıda deneye dayanır. O nedenle, kabul edilmiş fizik yasalarının zaman tersinmesi simetrisi üzerinde temellenen bütün mantıksal düşüncüler tümünden sorgulanmaya açılır ki bu da şu andaki tartışmamızın temelini ve entropi anlayışımızı baltalar. Bildiğimiz evrenin tümünden düzensiz bir durumdan ender ama ara sıra beklenebilen bir istatistiksel dalgalanma olduğu sonucunu kabul edersek, süratle bataklığa saplanırız ve her şeyden önce böylesi tuhaf bir açıklamaya yol açan mantık zincirimiz de dahil olmak üzere bütün kavrayışımızı kaybederiz.*

Bu yüzden, inançsızlığı askıya alıp entropinin fizik ve matematik yasalarını -verilen bir andan geçmişe *ve* geleceğe doğru düzensizliğin artma olasılığının ezici bir büyüklükte olduğunu anlatan kavramlar- çalışkan bir tutumla izlemekle kendimizi boğazımıza kadar bataklığın içinde bulmuştuk. Kulağa hoş gelmesede, iki nedenden ötürü bu iyi bir şeydir. Birincisi, belleğimize ve kayıtlara güvensizliğin -sezgisel olarak alay ettiğimiz bir şey- kesinlikle anlamlı olmadığını gösterir. İkincisi, çözümsel yapımızın çökmenin eşiğinde olduğu bir noktaya ulaşarak, mantıksal düşüncümüzden geriye yaşamsal bir şey bırakmamız *gerektiğini* etkileyici bir şekilde fark ederiz.

Yakından ilişkili bir nokta şudur ki, kendimizi şu an görmekte olduğumuz dünyanın, tümüyle düzensizlikten ortaya çıktığına inandırırsak aynı mantıksal düşünüş -sonraki herhangi bir zaman - şu andaki inancımızdan vazgeçerek düzenli dünyayı çok daha yakın zamanlı bir dalgalanmaya atfetmemiz gerekir. Bu yüzden, bu düşünüş biçimiyle gelecekteki her an, geçmişteki her an sahip olunan inançları geçersizleştirir ki bu da evreni açıklamanın inandırıcı olmayan bir yoldur.

Bu nedenle, açıklayıcı boşluktan kaçınmak için, kendimize sorarız: Belleğimize ve kayıtlara -oda sıcaklığındaki buzların erimesi, yeniden donmaması, yumurtanın kırılması, yeniden yapışmaması, süt ve kahvenin karışması, yeniden ayrışmaması- güvenmeye geri dönmek için entropinin ve doğa yasalarının zaman simetrisinin ötesinde hangi yeni fikre ya da kavrama ihtiyacımız var? Kısaca, uzay-zamandaki olayların asimetrik gelişimini geleceğimizde entropinin daha yüksek ama geçmişimizde entropinin *daha düşük* olmasıyla açıklamaya çalışırsak nereye varırız? Bu mümkün mü?

Mümkün. Ama yalnızca eğer ilk dönemlerdeki olaylar özelse.¹⁴

Yumurta, Tavuk ve Büyük Patlama

Bunun ne anlama geldiğini görmek için, eski zamana ait, düşük-entropili, tam oluşmuş bir yumurta örneğini ele alalım. Bu düşük-entropili sistem nasıl varlığa kavuştu? Eğer belleklerimiz ve kayıtlara yeniden güvenmeye başlayacak olursak, hepimiz cevabı biliyoruz. Yumurta tavuktan çıktı. O tavuk da yumurtadan çıktı, o yumurta da tavuktan çıktı vb. Ama en etkili şekliyle İngiliz matematikçi Roger Penrose¹⁵ tarafından vurgulandığı gibi, bu yumurta-tavuk öyküsü aslında derin bir şeyler öğretir ve belirli bir noktaya çıkar.

Bir tavuk veya bu anlamda herhangi bir canlı hayret verici yükseklikte düzenli bir fiziksel sistemdir. Bu düzenlilik nereden gelir ve nasıl sürdürülür? Bir tavuk, yiyerek ve nefes alarak, en azından yeni yumurtalar yumurtlayacak kadar uzun süre yaşamını sürdürür. Besin ve oksijen, canlı varlıkların ihtiyaç duydukları enerjiyi ürettikleri hammaddeyi sağlarlar. Ama eğer ne olup bittiğini gerçekten anlamak istiyorsak, bu enerjinin vurgulanması gereken kritik özelliğini bilmemiz gerekir. Sağlıklı bir tavuk, hayatı boyunca besinlerden aldığı kadar enerjiyi, çoğunlukla ısı ve metabolizma süreçleri ve günlük etkinlikler sonucunda üretilen diğer atıklar şeklinde çevreye geri verir. Eğer giren enerjiyle çıkan enerji arasında böyle bir denge yoksa, tavuk giderek kilo alır.

Ama asıl nokta şudur ki, bütün enerji biçimleri eşit değildir. Tavuğun çevreye ısı şeklinde verdiği enerji yüksek oranda düzensizdir- hava moleküllerinin normalden biraz daha hızlı hareket edip birbirleriyle çarpışmalarına neden olur. Böyle enerjinin entropisi yüksektir -dağınıktır ve çevreyle karışır- ve bu nedenle kolaylıkla yararlı bir amaç için kullanılamaz. Tersine, tavuğun yediği şeylerden aldığı enerji düşük entropilidir ve hayatı sürdüren önemli etkinlikler için kullanılır hale getirilmiştir. Bu nedenle tavuk ve aslında her yaşam türü, düşük entropili enerji alıp yüksek entropili enerji veren bir boruya benzer.

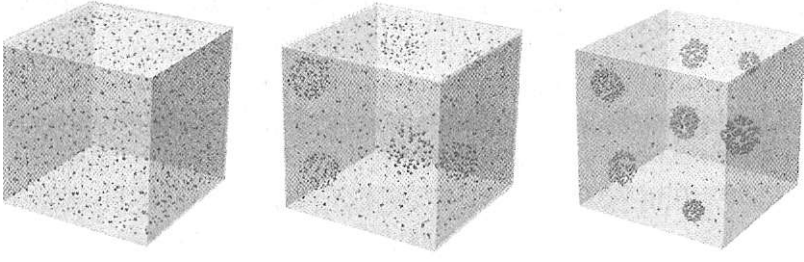
Bu kavrayış, bir yumurtanın düşük entropisinin nereden kaynaklandığı sorusunu bir adım daha geriye atar. Nasıl oluyor da tavuğun enerji kaynağı, besini böylesine düşük entropiye sahip olabiliyor? Bu sapkın düzen kaynağını nasıl açıklarız? Eğer besin hayvansal kaynaklı ise, başlangıçtaki, hayvanların nasıl bu kadar düşük entropiye sahip olduğu sorusuna geri döneriz. Ama eğer besin zincirini izlersek, sonuçta (benim gibi) yalnızca bitki yiyen hayvanlara ulaşırız. Nasıl oluyor da bitkiler ve onların ürünü olan sebze ve meyvalar düşük entropiyi sürdürebiliyorlar? Fotosentez yoluyla bitkiler, güneş ışığını kullanarak çevrede bulunan karbondioksiti oksijene dönüştürür ve çevreye geri verirler, karbon ise bitkilerin büyüüp gelişmesinde kullanılır. Böylece düşük entropili, hayvansal kaynaklı olmayan enerji kaynaklarını güneşe kadar izleyebiliriz.

Bu, düşük entropiyi açıklama sorusunu bir adım daha geriye atar: Yüksek ölçüde düzenli olan Güneş'imiz nereden geldi? Güneş, tüm bileşenlerinin karşılıklı kütleçekimi altında dönmeye ve kümelenmeye başlayan, başlangıçta dağınık olan bir gaz bulutundan, 5 milyar yıl önce şekillendi. Gaz bulutu yoğunlaştıkça, bir bölümün diğeri üzerindeki kütleçekimsel etkisi güçlendi, bu da bulutun giderek kendi üzerine çökmesine yol açtı. Kütleçekimi bulutu sıkıştırdıkça, sıcaklığı arttı. Sonunda, dışarıya doğru akan ışıınımı üreten nükleer (çekirdeksel) süreçleri başlatacak kadar ısındı. Işıınım ise gaz bulutunun daha fazla çökmesini önledi. Böylece sıcak, dengeli, parlayarak yanan bir yıldız doğdu.

Peki, bu dağınık gaz bulutu nereden geldi? Büyük olasılıkla hayatının sonuna ulaşmış ve süpernova olarak patlamış ve kalıntılarını çevreye saçmış olan daha yaşlı yıldızların kalıntılarından oluşmuştu. Bu ilk yıldızların oluştuğu dağınık gaz nereden geldi? Bu gazın Büyük Patlama sonrasında oluştuğuna inanıyoruz. Evrenin kaynağına ilişkin en rafine kuramlarımız -en rafine *kozmo*loji kuramlarımız- bize, Büyük Patlama'dan yalnızca birkaç dakika sonra evrenin, kabaca yüzde 75 hidrojen, yüzde 23 helyum ve küçük miktarlarda döteryum ve lityumdan oluşan *hemen hemen bir örnek sıcak gazla* dolu olduğunu söylüyor. Temel nokta, evreni dolduran bu gazın olağanüstü *düşük* bir entropiye sahip olmasıdır. Büyük Patlama evreni düşük entropili olarak başlattı. Bu durum, şimdi gördüğümüz düzenliliğin kaynağıymış gibi görünmektedir. Bir başka deyişle şimdiki *düzenlilik, kozmolojik bir kalıntıdır*. Bu önemli kavrayışı biraz daha ayrıntılı olarak inceleyelim.

Entropi ve Kütleçekimi

Kuram ve gözlem, Büyük Patlama'dan sonra birkaç dakika içinde, ilkel gazın genç evrenin içinde tek biçimli olarak dağıldığını gösterdiği için, daha önce tartıştığımız kola şişesi ve onun karbondioksit molekülleri örneğine bakarak, ilkel gazın yüksek entropili, düzensiz bir durumda olduğunu düşünebilirsiniz. Ama bu doğru olmaz. Daha önce entropiyi tartışırken, kütleçekimini tümüyle göz ardı etmiştik. Kola şişesinden kaçan az miktardaki gazın üzerinde kütleçekimi hemen hemen hiç rol oynamadığı için böyle yapmak anlamlıydı. Bu varsayımla, bir örnek olarak dağılmış olan gazın entropisinin yüksek olduğunu bulmuştuk. Ama işin içine kütleçekimi girdiğinde öykümüz bambaşka bir hale bürünür. Kütleçekimi, evrensel olarak çekici bir kuvvettir; bu nedenle eğer yeterince büyük kütleli bir gaz varsa, bu gazın her bölümü, diğer bütün bölümlerini çekeceği için gaz, tıpkı yağlı kâğıdın üzerinde damlacıklara ayrılan su gibi kümeleneip parçalanacaktır. Kütleçekimi önemli ise, ki evrenin yüksek yoğunluklu ilk dönemlerinde öyleydi, kümелilik -birörneklik ya



Şekil 6.5 Büyük gaz hacimleri için, kütleçekimi için içine girdiğinde, atom ve moleküller düzgün dağılmış bir durumdan daha büyük ve daha yoğun kümeler içeren bir duruma doğru evrilirler.

da düzgünlük değil- normaldi; Şekil 6.5'te gösterildiği gibi bu durum, gazın ona doğru evrilme eğilimi gösterdiği durumdur.

Kümeler başlangıçtaki dağınık gazdan daha düzenli gibi görünüyorlarsa da -tıpkı oyuncakların gruplanarak birtakım kutulara konduğu oyun odalarının, bütün oyuncakların ortalığa dağılmış olduğu oyun odalarından daha düzenli görüldüğü gibi- entropiyi hesaparken *bütün* kaynaklardan gelen katkıları almanız gerekir. Oyun odasında, yerlere saçılmış, darmadağınık oyuncaklardan, gruplar halinde ayrı ayrı kutulara doldurulmuş oyuncaklara geçerken azalan entropi miktarı, odayı saatlerce temizleyip toplayan ve oyuncakları kutulara dolduran anne-babanın yaydığı yağ ve çevreye yaydıkları ısı ile yerine konur. Benzer şekilde, başlangıçtaki dağınık gaz bulutu için, gazın sıkışarak kümelenmesiyle azalan entropinin, gazın sıkışmasıyla üretilen ısı tarafından ve en sonunda dil nükleer süreçler başladığında salınan olağanüstü miktarda ısı ve ışık ile fazlasıyla yerine konduğuna bulursunuz.

Bu, bazen gözden kaçırdığımız önemli bir noktadır. Düzensizliğe doğru ezici gidiş, yıldızlar ve gezegenler gibi düzenli yapıların, veya bitkiler ve hayvanlar gibi düzenli yaşam biçimlerinin oluşamayacağı anlamına gelmez. Oluşabilirler. Açıkça görüldüğü gibi, oluşmaktadırlar da. Termodinamiğin ikinci yasasının gerektirdiği şey, düzenliliğin oluşmasında genellikle gerektiğinden fazla dengeleyici düzensizlik üretimi olmasıdır. Bazı bi-

leşenler daha çok düzene girmiş olsalar bile entropi dengesinde hâlâ düzensizdik ağır basmaktadır. Doğadaki temel kuvvetler arasında entropi çetelesinin bu özelliğinden sonuna kadar yararlanan, kütleçekimidir. Kütleçekimi devasa uzaklıklarda etkili olduğundan ve evrensel olarak çekici bir kuvvet olduğundan, gökyüzünün açık olduğu gecelerde ışıklarını gördüğümüz düzenli gaz kümelerinin -yıldızların- oluşmasına önyak olarak entropi artışının net bir biçimde dengeli olmasını sağlar.

Bir gaz kümesi ne kadar sıkışık, yoğun ve büyük kütleli ise, genel entropisi o kadar büyüktür. Kütleçekimsel kümelenmenin ve sıkıştırmanın en uç şekli olan kara delikler bunu sınıra götürürler. Bir kara deliğin kütleçekimi o kadar kuvvetlidir ki hiçbir şey, hatta ışık bile bu kütleçekiminden kurtulamaz ki bu da kara deliklerin neden kara olduğunu açıklar. Bu yüzden, sıradan yıldızların aksine, kara delikler ürettikleri entropinin tamamını son derece inatçı bir şekilde tutarlar: Hiçbir bölümü kara deliğin güçlü kütleçekiminden kaçamaz.¹⁶ Gerçekten. Bölüm 16'da inceleyeceğimiz gibi, evrendeki hiçbir şey, bir kara delikten daha fazla düzensizlik -daha fazla entropi- barındıramaz. Bu da sezgisel olarak anlamlıdır: Yüksek entropi, bileşenlerin birçok yerinden düzenlenmesinin dikkatten kaçacağı anlamına gelir. Kara deliğin içini göremeyeceğimiz için, bileşenlerinin -bu bileşenler ne olursa olsun- *herhangi bir* yenden düzenlenmiş halini saptamamız olası değildir ve bu yüzden kara deliklerin entropisi en büyüktür. Kütleçekimi kaslarını sınıra kadar uzattığı zaman evrendeki bilinen en etkili entropi üreticisi haline gelir.

Şimdi, artık sorumluluğun aslında kimin olduğunun belirleneceği noktaya geldik. *En son düzenlilik ve düşük entropi üretim kaynağı, Büyük Patlama'nın kendisi olmalı.* İlk dönemlerinde olasılıkçı düşüncelerden beklediğimiz üzere, kara delikler gibi dev entropi kaynaklarıyla dolu olmak yerine, bir nedenle, doğmakta olan evren sıcak, birörnek ve gaz yapılı hidrojen

Yani belirli büyüklükteki bir kara delik, aynı büyüklükteki *herhangi bir şeyden* daha fazla entropi içerir.

ve helyum karışımıyla doluydu. Her ne kadar, yoğunlukların kütleçekimini ihmal edebileceğimiz kadar düşük olduğu bir durum olduğundan yüksek entropiye sahip ise de, o zaman, kütleçekiminin ihmal edilemeyeceği durumlarda böylesi bir örnek bir gazın entropisi düşük olur. Kara deliklerle karşılaştırıldığında dağınık, hemen hemen bir örnek olan gaz, olağandışı düşük-entropili bir durumdaydı. O zamandan bu yana, termodinamiğin ikinci yasasıyla uyumlu olarak, evrenin toplam entropisi, yani toplam, net düzensizlik miktarı yavaş yavaş artmaktadır. Yaklaşık bir milyar yıl ya da daha uzun bir zaman sonra kütleçekimi ilkel gazın kümelenmesine neden olmuş, kümeler sonuça yıldızları, galaksileri oluşturmuş, bazı daha hafif kümelerse gezegenlere dönüşmüştür. Bu gezegenlerden en az birinin çevresinde ona düşük-entropili enerji sağlayan bir yıldız vardır. Bu enerji düşük-entropili yaşam biçimlerinin evrilmesini sağlamış, böyle yaşam biçimlerinin arasında bulunan bir tavuk, mutfak tezgâhınızın üzerindeki yumurtayı yumurtlamış, bu yumurta da sizi üzecek şekilde tezgâhtan yere düşerek kırılmış ve daha yüksek-entropili bir düzene geçmiştir. Yumurta kırılır takat yeniden toparlanıp yapışmaz çünkü evrenin yaratıldığı olağandışı düşük-entropili durumun başlattığı yüksek entropiye gidişi sürdürmektedir. Her şeyi başlatan, başlangıçtaki inanılmaz düzendir ve o zamandan beri daha yüksek düzensizliğe doğru yavaş yavaş gelişen bir evrende yaşıyoruz.

Bu, bütün bu bölümde karşılaştığımız en afallatıcı bağlantıdır. Kırılan biryumurta bize Büyük Patlama hakkında derin bir şeyler anlatır. Bize, Büyük Patlama'nın olağandışı düzenli bir evren doğurduğunu anlatır.

Aynı fikir, diğer bütün örneklerle de uygulanır. Yaprakları birbirinden yeni ayrılmış *Savaş ve Barışın* yapraklarının havaya fırlatılışının yüksek entropili bir düzenle sonuçlanmasının nedeni, son derece düzenli, düşük entropili bir düzenle *başlama*sıdır. Sayfaların başlangıçtaki düzenliliği, onları entropi artışına hazırlamıştır. Tersine, eğer sayfalar başlangıçta karmakarışık olsaydı, havaya fırlatılmaları, entropi açısından pek bir fark ya-

ratmazdı. Bu yüzden, soru, bir kez daha soralım, şudur: Bu sayfalar nasıl böyle düzenli olmuşlardır? Tolstoy onları bu sayfa sırasında sunulmaları için yazmış, matbaacı ve ciltçi de onun talimatlarına uymuşlardır. Tolstoy'un ve kitap üreticilerinin, böylesi yüksek düzenliliğe sahip bir kitabı yaratmalarını sağlayan yüksek düzenliliğe sahip olan bedenleri ve akılları, yumurtadan Büyük Patlamaya giden düşünce zinciri ile açıklanabilir. Gece 22:30'da görmüş olduğunuz, kısmen erimiş buz küplerinden ne haber? Şimdi belleklere ve kayıtlara güvendiğimiz için, saat 22:00'dan hemen önce barmenin bardağınıza tam oluşmuş buz küpleri koyduğunu hatırlıyorsunuz. Barmen bu buzları, kendileri de yüksek düzenliliğe sahip yaşam biçimleri olan ve bu nedenle de böylesi yüksek düzenliliğe sahip şeyler üretebilen zeki bir mühendisin tasarladığı ve yetenekli bir mekanik teknisyenin ürettiği bir buz makinesinden almıştı. Burada da bu düzenlilikleri, birbiri ardısıra, evrenin düzenli kaynağına kadar izleyebiliriz.

Kritik Bir Girdi

Vardığımız nokta, eğer Büyük Patlama -evreni varlığa kavuşturan olay veya süreç- evreni olağandışı denebilecek ölçüde özel, düşük entropili yüksek ölçüde düzenli bir durumda başlatmışsa, ancak o zaman yüksek değil düşük entropili bir geçmişe ait belleğimize güvенеbileceğimizi gösteriyor. Bu kritik girdi olmaksızın, entropinin belirli bir andan hem geçmişe ve hem de geleceğe doğru artması gerektiği yolundaki eski düşüncemiz bizim, gördüğümüz tüm düzenin, yüksek entropiye sahip, sıradan bir durumdan rasgele bir dalgalanmayla ortaya çıktığı sonucuna varmamıza yol açar ki, bu sonuç da, görmüş olduğumuz gibi, üzerine temellendiği mantığa ters düşer. Ama çözümlememize evrenin olası olmayan, düşük entropili başlangıcını kattığımızda görüyoruz ki, doğru sonuç, olasılıkçı mantık, o yönde serbestçe, herhangi bir kısıtlama olmaksızın işlediği için, entropinin geleceğe doğru arttığı; olasılığın *böyle* kullanımı, evrenin yüksek değil, düşük entropiyle başladığı yolundaki yeni hük-

mümüze ters düşeceği için geçmişe doğru artmadığı şeklinde-
dir.¹⁷ Bu nedenle evrenin başlangıcındaki koşullar, zaman oku-
nun yönlenmesinde önemlidir. *Gelecek gerçekte entropinin art-
tığı yöndür. Zamanın oku -olayların böyle başlayıp şöyle bittiği,
hiçbir zaman şöyle başlayıp böyle bitmediği gerçeği-yolculuğu-
na evrenin başlangıçtaki yüksek düzenli, düşük-entropili halin-
de başlamıştır.*¹⁸

Kalan Billemece

Genç evrenin zaman okunun yönünü belirlediği yolundaki so-
nuç mükemmel ve tatmin edici bir sonuçtur ama, işimiz henüz
bitmedi. Geriye dev bir billemece kalıyor. Nasıl oldu da evren, her
şeyin milyarlarca yıl boyunca yavaş yavaş gittikçe daha az dü-
zenli, daha yüksek entropili durumlara doğru evrildiği, çok dü-
zenli bir durum ile başladı? Bunun ne kadar olağanüstü olduğu-
nu gözden kaçırmayın. Vurguladığımız gibi, olasılıkçı bakış açı-
sından, saat 10:30'da kısmen erimiş olarak gördüğünüz buz küp-
lerinin bir bardak sudan istatistiksel bir rastlantıyla ortaya çıkmış
olmaları, tam oluşmuş buz küplerinin erimesiyle ortaya çıkmış
olmalarından çok daha olasıdır. Buz küpleri için doğru olan şey,
evren için de doğrudur. Olasılık açısından konuşursak, evrende
şimdi görmekte olduğumuz her şeyin tam bir düzensizlikten en-
der ama ara sıra beklenen istatistiksel bir sapmayla ortaya çık-
mış olma olasılığı, Büyük Patlama'nın gerektirdiği, olasılığı son
derece düşük, son derece düzenli ve olağanüstü düşük-entropili
başlama noktasından yavaş yavaş evrilmiş olması olasılığından
akıllara durgunluk verecek kadar daha yüksektir.¹⁹

Ama şansa inanır ve her şeyin istatistiksel bir raslantıyla varlı-
ğa kavuştuğunu düşlersek, kendimizi bir bataklıkta buluruz: Bu
yol, sorunun içine fizik yasalarını katar. Böylece zaman okunun
açıklaması olarak düşük entropili Büyük Patlamayı ileri süre-
riz. O zaman billemece evrenin böylesi düşük olasılıklı, yüksek öl-
çüde düzenli bir durumdan nasıl başladığının açıklanmasına dö-
nüşür. Zaman okunun gösterdiği soru *budur*. Her şey kozmolo-
jiye dayanır.²⁰

Kozmolojiyi ayrıntılı olarak 8. ve 11. Bölümler arasında işleyeceğiz ama önce bu incelememizde ciddi bir eksiklik olduğuna dikkat edin: Söylediğimiz her şey yalnızca klasik fizik yasaları üzerinde temelleniyor. Şimdi de zaman anlayışımızı ve zamanın okunu izleyişimizi kuantum mekaniğinin nasıl etkilediğini görelim.

VII. Bölüm

Zaman ve Kuantum

Kuantum Dünyasından
Zamanın Doğasını Çıkarsamak

Zaman gibi, içinde olduğumuz, gündelik varlığımızla tamamen bütünleşmiş olan, ortak dilimizden -bir an için bile olsa- çıkarılıp atılamayacak kadar yaygın olan bir kavram hakkında düşünürken mantığımız, deneyimlerimizin ve yaşantımızın baskısıyla şekillenir. Bu gündelik deneyimler, klasik deneyimlerdir; büyük bir doğruluk derecesiyle üç yüzyıldan daha uzun bir süre önce Newton tarafından temelleri atılan fizik yasalarına uyarlar. Ama son yüz yılda fizikteki keşifler içinde, klasik fiziğe ilişkin bütün kavramsal şemamızı alt-üst ettiği için, kuantum mekaniği uzak ara en şaşırtıcı olanıdır.

O nedenle klasik deneyimlerimizi, kuantum süreçlerinin zamanında nasıl geliştiğine ilişkin, hayret verici özelliklerini göz önüne alarak genişletmek son derece yararlı olacaktır. Bu genişletilmiş bağlamda, geçen bölümdeki tartışmamıza devam ederek, zamanın kuantum mekaniğine özgü tanımında zamansal bir ok

bulunup bulunmadığını soracağız. Fizikçiler arasında bile tartışmalı olan bir cevaba ulaşacağız. Bu bizi bir kere daha evrenin oluşumuna geri götürecektir.

Kuantuma Göre Geçmiş

Olasılık geçen bölümde önemli bir rol oynuyordu ama orada da birkaç kere vurguladığım gibi, bunun nedeni pratik yararı ve sağladığı bilginin kullanışlı olmasıydı. Bir bardak suyun içinde bulunan 10^{24} H₂O molekülünün tam hareketlerini izlemek, hesaplama kapasitemizin çok çok ötesindedir; bunu yapabilirsek bile sonuçta ortaya çıkan dağ gibi verilerle ne yaparız? 10^{24} konum ve hız değerini kullanarak, bardağın içinde buz olup olmadığını belirlemek çok zor bir iştir. O nedenle hesapları izlenebilir olan, üstelik genellikle bizim ilgilendiğimiz makroskopik özelliklerle -düzenlilik-düzensizlik, (örneğin buz-su)- uğraşan olasılıkçı mantığa geçtik. Ama unutmamak gerekir ki, olasılık kavramı hiçbir şekilde klasik fiziğin dokusuna işlenmiş değildir. İlke olarak, bazı şeylerin şimdi nasıl olduğunu kesin bir şekilde biliyor olsaydık -evreni oluşturan her parçacığın konumunu ve hızını biliyor olsaydık- klasik fizik, bu bilginin, bunların gelecekte belirli bir anda nasıl olacağını ve ya geçmişte belirli bir anda nasıl olduğunu hesaplayabileceğimizi söyler. Evrenin gerçekten an be an gelişmesini izliyor olun ya da olmayın, klasik fiziğe göre, ilke olarak, geçmiş ve gelecek konusunda, günümüzdeki gözlemlerinizin doğruluğu ve ayrıntılarıyla belirlenen bir güvenle konuşabilirsiniz.¹

Olasılık bu bölümde de kilit bir rol oynayacaktır. Ama olasılık, kuantum mekaniğinin kaçınılmaz bir ögesi *olduğu* için, geçmiş ve geleceği kavramsallaştırma yöntemimizi kökten değiştirir. Kuantum belirsizliğinin kesin konumlar ve kesin hızlar hakkında eşanlı olarak bilgi sahibi olmamızı engellediğini zaten görmüştük. Benzer biçimde kuantum fiziğinin yalnızca geleceklerden biri ya da diğerinin gerçekleşme olasılığını hesapladığını da görmüştük. Bu olasılıklara elbette güveniriz ama bunlar olasılık olduğu için, konu geleceği tahmin etmeye geldiğinde *kaçınılmaz* bir şans faktörü de vardır.

Konu geçmişin tanımlanması olduğunda da klasik fizikle kuantum fiziği arasında kritik bir fark vardır. Zamanın tüm anlarına eşit davranan klasik fizikte gözlediğimiz bir şeye yol açan olaylar, gözlemin kendisini tanımlamakta kullandığımız dille, aynı atıflar kullanılarak tanımlanır. Eğer geceleyin gökyüzünde büyük bir meteor (akanyıldız) görmüşsek, konumundan ve hızından konuşuruz; eğer oraya nasıl geldiğini düşünürsek, göktaşının Dünyaya yaklaşırken sahip olduğu bir dizi konum ve hızdan da söz ederiz. Ama kuantum fiziğinde, bir kere bir şeyi gözlediğimizde, her şeyi yüzde 100 kesinlikle bildiğimiz, (aletlerin duyarlılığı ve benzeri konuları gözardı ederek) yoğunluğu azaltılmış bir alana gireriz. Ama geçmiş-ki burada, özel olarak "gözlenmemiş" geçmiş, bizden önceki bir zaman, birisi veya herhangi bir şeyin belirli bir gözlemi yapmış olduğu zaman kastediliyor- olasılıkların kuantum belirsizliğinin alanında kalır. Eğer bir elektronun konumunu burada ve hemen şimdi ölçsek bile, bir an önce elektronun sahip olduğu söylenebilecek şeyler; yalnızca elektronun burada, orada veya ötede olma olasılıklarıdır.

Ve görmüş olduğumuz gibi konu, elektronun (veya bu anlamda herhangi bir parçacığın) bu olası konumlardan yalnızca birinde bulunduğu ama bunun hangisi olduğunu bizim bilemiyor olmamız değildir." Daha çok, bu olasılıklardan her biri -olası geçmişlerden her biri- şimdi gözlediğimiz şeye katkıda bulunduğundan, elektronun bu konumların hepsinde birden bulunduğu gibi bir duygu vardır. Hatırlarsanız, Bölüm 4'te tanımlanan ve elektronların iki ince yarıktan geçmeye zorlandıkları deneyde bunun kanıtını görmüştük. Olayların tek, sıradan geçmişlerinin olduğuna ilişkin yaygın inanca dayanan klasik fizik, ekrana ulaşan herhangi bir elektronun *ya* sağdaki *ya da* soldaki yarıktan geçtiğini söyler. Ama geçmişe böyle bakmak bizi yanlış yöne götürür: Bu bakışla, Şekil 4.3a da gösterilen sonuçların alınacağı tahmin edilir ama bu, gerçekleşen ve Şekil 4.3b'de gösterilen sonuçla uyuşmaz. Gözlenen girişim deseni yalnızca yarıkların *ikisinden birden* geçen bir şeyin üst üste binmesiyle açıklanabilir.

Kuantum fiziği böyle bir açıklama sağlar ama böyle yaparken de geçmişe ilişkin öykülerimizi -gözlediğimiz şeylerin nasıl ortaya çıktığı- köklü bir şekilde değiştirir. Kuantum mekaniğine göre, her elektronun olasılık dalgası iki delikten *birden* geçer ve her yarıktan geçen dalganın bölümleri birbirine karıştığı için, ortaya çıkan olasılık profili ve dolayısıyla elektronların ekrana çarpma noktaları da girişim deseni sergiler.

Gündelik deneyimlerle karşılaştırılırsa, elektronun geçmişini birbirine çapraz geçen olasılık dalgalarıyla tanımlamak bize çok yabancıdır. Ama ihtiyatı bir kenara bırakarak, kuantum mekaniğine özgü bu tanımı bir adım öteye götürebilir ve kulağa çok daha acayip gelen bir olasılığa yol açacak bir öneride bulunabilirsiniz. Belki de her elektron, ekrana doğru giderken gerçekten her iki delikten birden geçiyordur ve veriler de bu iki geçmiş sınıfı arasındaki girişimden kaynaklanıyordur. Yani, iki yarıktan çıkan dalganın tek bir elektronun iki olası geçmişini -soldaki yarıktan geçen veya sağdaki yarıktan geçen- temsil ettiğini düşünmek çok çekicidir ve ekranda gözlediğimiz şeye her iki dalga da katkıda bulunduğundan, belki de kuantum mekaniği bize elektronun her iki potansiyel geçmişinin katkıda bulunduğunu da söylüyor olabilir.

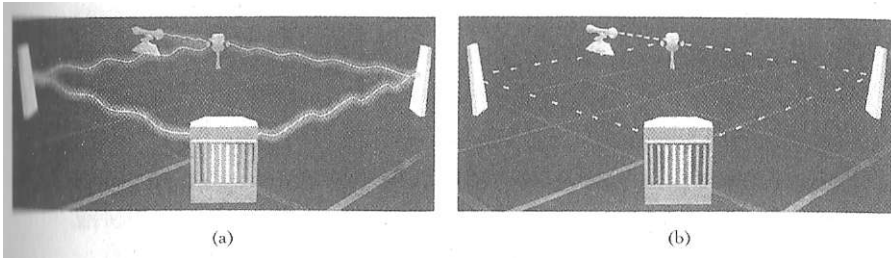
Yirminci yüzyılın en yaratıcı fizikçilerinden olan Nobel ödüllü Richard Feynman'ın fikir babalığını yaptığı bu şaşırtıcı fikir kuantum mekaniği hakkında mükemmel bir şekile uygulanabilir bir düşünüş şekli sağlıyor. Feynman'a göre, belirli bir sonuca ulaşılabilecek yol seçenekleri varsa -örneğin bir elektronun ekranda bir noktaya soldaki yarıktan geçerek vurması veya aynı noktaya sağdaki yarıktan geçerek vurması- o zaman, seçenek geçmişlerin hepsinin gerçekleşeceği ve eşanlı olarak gerçekleşeceği kanısı vardır. Feynman, böylesi her geçmişin, ortak sonuçların gerçekleşmesi olasılığına katkıda bulunacağını ve eğer bu katkılar doğru bir şekilde toplanırsa, sonucun kuantum mekaniği tarafından hesaplanan toplam olasılıkla uyuşacağını gösterdi.

Feynman, buna kuantum mekaniğine *geçmişler üzerinden toplama* yaklaşımı adını verdi. Bu yaklaşım, olasılık dalgasının,

verilen bir gözlemin öncesinde yaşanmış olabilecek bütün olasılıklar geçmişleri somutlaştırdığını gösterir ve klasik fiziğin çöktüğü yerde başarılı olabilmek için kuantum mekaniğinin geçmiş yapısını genişletmesi gerektiğini çok iyi açıklar.³

Oz'a

Çift yarık deneyinin, ekrana giden iki yol birbirinden daha iyi ayrıldığı için, geçmiş seçenekleri arasındaki girişimin çok daha açık olduğu bir çeşitlemesi daha vardır. Deneyi fotonları kullanarak anlatmak elektronları kullanarak anlatmaktan biraz daha kolay olduğundan, işe bir foton kaynağıyla -bir lazerle- başlıyoruz ve bu lazer demetini, bir *demet bölücüye* doğru tutuyoruz. Bu alet, gözetli-odalarında kullanılanlar gibi, yarı-geçirgen bir aynadan yapılmış olup, üzerine gelen ışığın yarısını geçirir, yarısını ise yansıtır. Böylece başlangıçtaki tek ışık demeti tıpkı çift yarık deneyindeki iki yarığa düştüğündeki gibi, soldaki demet ve sağdaki demet olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 7.1 de görüldüğü gibi, akıllıca yerleştirilmiş tam-yansıtıcı aynalar kullanarak detektörün konumunda bu iki demet tekrar bir araya getirilir. Maxwell'in tanımında olduğu gibi, ışığı bir dalga olarak ele alırsak, ekranda bir girişim deseni görmeyi bekleriz ve gerçekten de görürüz. Soldaki ve sağdaki demetlerin ekrana kadar kat ettikleri yollar birbirinden çok az da olsa farklı olduğu için soldaki demet ekranda belirli bir noktaya tam tepe noktasında ulaşırken sağdaki demet aynı noktaya tepe, çukur veya arada herhangi bir



noktada ulaşıyor olabilir. Detektör iki dalganın toplam yüksekliğini ve bu yolla da karakteristik bir girişim deseni kaydeder.

Lazerin şiddetini diyelim birkaç saniyede bir tek foton göndererek şekilde azalttığımız zaman klasik / kuantum ayrımı belirgin hale gelir. Tek bir foton demet bölücüye çarptığı zaman, klasik önsezi bu fotonun ya iletileceğini ya da yansıtılacağını öngörür. Klasik mantık, herhangi bir tür girişimin ipuçlarına bile yer vermez, çünkü ortada girişecek şeyler yoktur: Elimizde bulunan, kaynaktan detektöre doğru, kimi soldan, kimi sağdan tek tek giden fotonlardır. Ama deney yapıldığında, Şekil 4.4'teki gibi zamana göre kaydedilen tek tek fotonlar, Şekil 7.1'de görüldüğü gibi bir girişim deseni oluştururlar. Kuantum mekaniğine göre bunun nedeni, ölçülen her fotonun detektöre soldaki yoldan veya sağdaki yoldan ulaşmış *olabileceğidir*. Bu nedenle, fotonun belirlenen bir noktaya veya diğerine çarpma olasılığını belirlemek için, bu iki olası geçmişini birleştirmek zorunda kalıyoruz. Her foton için soldaki ve sağdaki olasılık dalgası bu yolla birleştirildiğinde, dalga girişiminin dalgalanan olasılık desenini verir. Bu nedenle, Oz'a doğru gideceği yolu gösteren tabelanın iki yönü birden göstermesi karşısında şaşırان Dorothy'den farklı olarak, veriler, her fotonun detektöre doğru giderken hem soldaki hem de sağdaki yolları kullandığının varsayılmasıyla mükemmel bir biçimde açıklanabilir.

Seçim Yapma

Her ne kadar olası geçmişlerin birleştirilmesini birkaç özel örnek bağlamında tanımlamış olsak da, kuantum mekaniği hakkında bu düşünce şekli geneldir. Klasik fizik şimdiki zamanı tek bir geçmişe sahip olarak tanımlarken, kuantum mekaniğinin olasılık dalgalan geçmiş arenasını genişletiyor: Feynman'ın formüllemesine göre, gözlenen şimdiki zaman, gördüğümüzle bağdaşacak bütün olası geçmişlerin bir karışım, özel bir çeşit *ortalamasıdır*.

Çift-yarık ve demet-bölücü deneylerinde fotonun veya elektronun kaynaktan ekrana kadar gidebileceği iki yol -soldan gi~

diş veya sağdan gidiş- vardır ve yalnızca olası geçmişleri birleştirerek gördüklerimizi açıklayabiliriz. Eğer engelde üç yarık ol- saydı, üç çeşit geçmiş i göz önüne almak zorunda kalırdık; 300 yarıkla, ortaya çıkan bütün olası geçmişlerin katkılarını hesa- ba katmak zorunda kalırdık. Bunu sınıra götürürsek -eğer en- gelin ortadan kalkacağı kadar çok yarık açtığımızı düşünürsek- kuantum fiziği her elektronun, ekranda belirli bir noktaya var- mak için olası *her* yoldan geçeceğini ve ortaya çıkan verileri an- cak böylesi geçmişlerle ilgili olasılıkları birleştirerek açıklayabi- leceğimizi söyler. Bu, kulağa garip gelebilir. (Zaten garip.) Ama geçmiş zamanlara böyle garip yaklaşımlar Şekil 4.4'teki, Şekil 7.1 'deki verileri ve mikro dünya ile ilgili öbür deneyleri açıkla- maktadır.

Geçmiş üzerinden toplam tanımını ne ölçüde doğru olarak al- manız gerektiği merak ediyor olabilirsiniz. Detektör ekranına çarpan bir elektron, oraya *gerçekten* olası bütün yolları izleye- rek mi gider, yoksa Feynman'ın reçetesi yalnızca doğru cevabı bulmak için zekice ortaya atılmış matematiksel bir icat mıdır? Bu, kuantum gerçekliğinin gerçek doğasını değerlendirmek için gereken kilit sorular arasındadır, bunun için keşke size kesin bir cevap verebilseydim. Ama veremem. Fizikçiler çoğu zaman geç- mişlerin birleştirildiği bakış açısını son derece yararlı bulurlar; bu kavramı kendi araştırmamda o kadar sık kullanıyorum ki, bana neredeyse geçmiş gibi geliyor. Ama bu, onun gerçek ol- duğunu söylemekle aynı anlama *gelmez*. Önemli nokta şudur ki kuantum hesaplamaları bize, elektronun ekranda belirli bir nok- taya veya bir başkasına çarpma olasılığını hiç kuşkuya yer kal- mayacak şekilde söyler ve bu hesaplamalar da verilerle tam bir isabetle uyuşur. Kuramın kanıtlanması ve hesaplamadaki yarar- lılığı açısından bakıldığında, elektronun ekrandaki bir noktaya nasıl ulaştığı konusunda anlattığımız öykünün fazla bir önemi yoktur.

Ama elbette eğer üstelerseniz, deney düzeneğini değiştirerek, gözlenen şimdiki zamana birleşen, bulanık olası geçmişler karı- şımını izleyebilmemiz durumunda gerçekten ne olacağı konusu-

nu kararlaştırabiliriz. İyi bir öneri, ama şimdiden bunun için bir engel olması gerektiğini biliyoruz. Bölüm 4'te olasılık dalgalarının doğrudan gözlenemediğini öğrenmiştik; Feynman'ın birleşen geçmişleri olasılık dalgaları konusunda düşünmenin özel bir yolundan başka bir şey olmadığı için, onlar da doğrudan gözlenemiyor olmalılar. Öyledirler de. Gözlemler bireysel geçmişleri ayıramazlar; gözlemler, tüm olası geçmişlerin *ortalamalarını* yansıtırılar. Dolayısıyla elektronları yoldayken gözlemek üzere deney düzeneğini değiştirerseniz, her elektronun şu veya bu konumayereleştirdiğiniz ek detektörden geçtiğini göreceksiniz; hiçbir zaman bulanık geçmişler toplamını görmeyeceksiniz. *Neden* elektronu şu veya bu konumda gördüğünüzü açıklamak üzere kuantum mekaniğini kullandığınız zaman, cevap, bu ara gözleme yol açmış olabilecek bütün olası geçmişlerin ortalamasını içerecektir. Ama gözlemin kendisi, yalnızca o ana kadar birleşmiş geçmişlere ulaşabilir. Hareket halindeki elektrona bakarak geçmişle kastettiğiniz kavramı yalnızca geriye itmiş oldunuz. Kuantum mekaniği katı bir biçimde verimlidir: Gördüğünüzü açıklar ama açıklamayı görmenize izin vermez.

Daha fazlasını da sorabilirsiniz: O zaman hareketi tek geçmişler ve yörüngelerle açıklayan klasik fizik -sağduyu fiziği- evreni nasıl açıklayabiliyor? Neden beyzbol toplarından gezegenlere ve kuyrukluyıldızlara kadar her şeyin hareketini açıklarken ve hesaplarken bu kadar iyi işliyor? Nasıl oluyor da gündelik hayatta acayip bir yolla, geçmişin şimdiki zamana doğru görünüşte geleştiğine ilişkin bir kanıt bulunmuyor? Bunların nedeni, Bölüm 4'te kısaca açıklandığı ve yakında daha büyük bir kesinlikle inceleneceği gibi, beyzbol toplarının, gezegenlerin ve kuyrukluyıldızların, büyük olmaları, en azından elektron gibi parçacıklarla karşılaştırıldıklarında büyük olmalarıdır. Kuantum mekaniğinde bir şey ne kadar büyükse, ortalama alma işlemi o kadar çarpık olur: Uçmakta olan bir beyzbol topunun hareketine bütün olası yörüngeler katkıda *bulunur* ama normal yol -Newton yasalarıyla hesaplanan tek yol- tüm diğer yolların toplamından *daha fazla* katkıda bulunur. Büyük cisimler için klasik yolların, or-

talama alma sürecindeki en baskın katkıda bulunan, bu nedenle de bize tanıdık gelen yollar olduğu ortaya çıkıyor. Ama cisimler elektronlar, kuarklar ve fotonlar gibi küçük olduğu zaman, çok sayıda farklı geçmiş, yaklaşık olarak aynı düzeyde katkıda bulunurlar, bu yüzden de hepsi ortalama alma sürecinde önemli roller oynarlar. Son olarak şöyle sorabilirsiniz: Gözlem ya da ölçüm eylemlerinin ne özelliği var da bütün olası geçmişleri birleştirerek tek bir sonuç vermeye zorluyor? Gözlem eylemimiz parçacığa şimdi artık geçmişlerin bir listesini yapıp onları birleştirme, ortalamalarını alma ve kesin bir sonuç verme zamanının geldiğini nasıl iletiyor? Neden biz insanların ve bizim yaptığımız aletlerin böyle özel bir gücü var? Bu özel bir şey mi? Ya da insanın gözlem eylemi, daha yaygın çevresel etki yapısı kapsamına giriyor ve böylece, kuantum mekaniğine özgü olarak konuşursak, bizim hiç de özel olmadığımızı gösteriyor olabilir mi? Yalnızca kuantum gerçekliğinin doğası konusunda merkezi öneme sahip oldukları için değil, kuantum mekaniği ve zamanın oku konularında bir düşünce yapısı da oluşturdukları için bu şaşırtıcı ve ihtilaflı konuları bu bölümün ikinci yarısında ele alacağız.

Kuantum mekaniğine özgü ortalamaların hesaplanması önemli bir teknik eğitim gerektirir. Ortalama listelerinin ne zaman, nasıl ve nerede tutulacağını tam olarak anlamak, fizikçilerin hâlâ formülleştirmeye çalıştıkları kavramdır gerektirir. Ama temel bir ders, basit bir biçimde şöyle ifade edilebilir: Kuantum mekaniği son seçim yapma arenasıdır; bir şeyin buradan oraya giderken yapabileceği her olası "seçim", bir olası sonuç veya değeriyle ilişkili olan kuantum mekaniğine özgü bir olasılıkta kapsanır.

Klasik fizik ve kuantum fiziği geçmişe çok farklı şekillerde davranırlar.

Geçmişî Budamak

Bölünemez bir nesnenin -bir elektron veya bir fotonun- eşanlı olarak birden fazla yolda hareket ettiğini düşünmek, klasik yetiştirme tarzımıza tamamen ters düşer. Kendini en iyi kontrol ede-

bilenlerimiz bile gizlice bir göz atma eğilimine çok zor karşı koyar: Elektron ya da foton iki yarıklı ekrandan veya demet bölücünden geçerken, *gerçekten* hangi yolu izlediğini görmek için neden çabucak bir göz atmıyoruz? Çift yarık deneyinde neden her iki yarığın önüne de küçük birer detektör koyarak elektronun (ekrandaki ana detektöre doğru yoluna devam ederken) bu yarıkların birinden mi, diğerinden mi yoksa her ikisinden birden mi geçtiğini anlamaya çalışmıyoruz? Demet bölücü deneyinde neden demet bölücünden çıkan her iki yolun üzerine küçük detektörler koyarak fotonun (gene ekrandaki ana detektöre doğru yoluna devam ederken) soldaki yoldan mı, sağdaki yoldan mı yoksa her ikisinden birden mi geçtiğini belirlemiyoruz?

Cevap, bu ek detektörleri *yerleştirebileceğimiz* şeklindedir ama bunu yaparsanız iki şey bulursunuz. Birincisi, her elektron ve her fotonun daima bu detektörlerden birinden ve yalnızca birinden geçtiği bulunacaktır; yani elektron veya fotonun hangi yoldan geçtiğini belirleyebilirsiniz ve bulacağınız şey, bunların detektörlerin ya birinden ya da diğerinden geçtiği, hiçbir zaman ikisinden birden geçmediği şeklinde olacaktır, ikincisi, ana detektörlerin kaydettiği sonuç verilerinin de değişmiş olduğunu bulacaksınız. Şekil 4.3b ve Şekil 7.1b'deki girişim desenlerini elde etmek yerine, Şekil 4.3a'da görüldüğü gibi, klasik fizikten beklenecek sonuçları alacaksınız. Yeni öğeler -yeni detektörler ekleyerek deneyi istemeden de olsa değiştirmiş oldunuz. Değişiklik, ortaya çıkarmak istediğiniz çelişkiyi -şimdi artık parçacığın hangi yoldan geçtiğini biliyorsunuz, o zaman parçacığın geçmediği kanıtlanan diğer yolla bir girişim nasıl olabilir?- ortadan kaldırmış olur. Bunun nedeni son alt-bölümde bulunabilir. Yeni gözleminiz, kendisinin ortaya çıkardığı şey her ne ise, ondan önce gelen geçmişlerden birini seçip ayırır. Fotonun hangi yoldan gittiğini belirleyen şey bu gözlem olduğu için, *yalnızca bu yoldan geçen geçmişleri göz önüne alırız ki, bu da girişim olasılığını ortadan kaldırır.*

Niels Bohr böyle şeyleri kendisinin ortaya koyduğu *tamamlayıcılık ilkesini* kullanarak özetlemekten hoşlanırdı. Her elektron,

her foton ve aslına bakılırsa *her şey* hem dalga, hem de parçacık özelliklerine sahiptir. Bunlar birbirlerini tamamlayıcı özelliklerdir. Parçacıkların tek yörüngede hareket ettiği parçacık yapısıyla düşünmek eksik kalır çünkü bu bakış açısı girişim desenlerinin gösterdiği dalga özelliklerini açıklayamaz.*

Yalnızca dalga yapısıyla düşünmek de eksik kalır çünkü bu bakış açısı konumları belli parçacıklar, örneğin ekranda tek bir nokta olarak kaydedilen parçacıklar bulan ölçümlerin gösterdiği parçacık özelliklerini açıklayamaz (Şekil 4.4'e bakınız). Tam bir bakış açısı, birbirlerini tamamlayan her iki yanın da hesaba katılmasını gerektirir. Verilen herhangi bir durumda, onunla nasıl etkileşmeyi seçtiğinize bağlı olarak bu özelliklerden birinin daha baskın olmasını sağlayabilirsiniz. Eğer elektronların kaynaktan ekrana kadar gözlenmeden gitmelerine izin vererseniz, elektronların dalga özellikleri ön plana çıkar, bu da girişimle sonuçlanır. Ama elektronları yoldayken gözlerseniz, hangi yoldan gittiklerini bilirsiniz ama o zaman da girişimi açıklamakta zorluklarınız olur. Burada gerçeklik imdada yetişir. Yaptığınız gözlem kuantum geçmişinin dallarını budar. Gözleminiz elektronu parçacık olarak davranmaya zorlar; parçacıklar da şu *veya* bu yoldan gittikleri için, girişim deseni oluşmaz, o zaman da zaten açıklayacak bir şey yoktur.

Doğa acayip şeyler yapar. Sınırdan yaşar. Ama mantıksal çelişkinin öldürücü yumruğundan kaçınmak için son derece dikkatlidir.

Geçmişin Beklenmedik Halleri

Bu deneyler önemlidir. Onlar, dünyamızın Newton, Maxwell ve Einstein'ın klasik yasalarıyla -şimdi yeterince büyük ölçeklerdeki olayları tanımlamakta kullanılan güçlü ve önsezi dolu yakla-

* Feynman'ın geçmişler üzerinden toplama yaklaşımı parçacık özelliklerini öne çıkar-maktaymış gibi görünüyorsa da, aslında bu yaklaşım, yalnızca olasılık dalgalarının özel bir gösterimidir (bu yaklaşım, tek bir parçacık için, her biri kendi olasılık katkısını yapan bir çok geçmiş kapsadığı için) ve bu yüzden, tamamlayıcılığın dalgayarıyla toplanabilir. Bir şeyin parçacık olarak davrandığını söylediğimizde, her zaman bir ve yalnızca bir yörüngede hareket eden sıradan bir parçacığı kastediyoruz demektir.

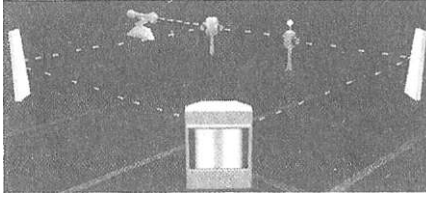
şımlar olarak bildiğimiz yasalar- değil, yirminci yüzyılda yaşayan fizikçilerin bulduğu kuantum yasalarıyla yönetildiğinin basit ama güçlü bir kanıtını oluştururlar. Zaten kuantum yasalarının, geçmişte ne olduğu yolundaki bildiğimiz kavramlara -şimdi gördüklerimizden sorumlu olan geçmişteki olaylar- meydan okuduğunu görmüştük. Bu deneylerin bazı basit çeşitlemeleri bu meydan okumayı, olayların zamanda daha yüksek, hatta daha şaşırtıcı bir düzeye doğru nasıl geliştiği konusuna kadar taşırlar.

Gecikmiş-seçim deneyi adını alan ilk çeşitleme 1980 yılında ünlü fizikçi John Wheeler tarafından ortaya atıldı. Deney, kulağa ürpertici derecede garip gelen bir soruya dokunuyor: Geçmiş geleceğe bağlı mıdır? Ama dikkat ederseniz bu, geriye gidip geçmişe değiştirip değiştiremeyeceğimizle aynı soru değil (Bölüm 15'te inceleyeceğimiz konu). Yapılmış ve oldukça ayrıntılı olarak çözümlenmiş olan Wheeler'in deneyi, geçmişte, hatta uzak geçmişte yer almış olduğunu varsaydığımız olaylarla şimdi olduğunu gördüğümüz olaylar arasındaki kışkırtıcı ilişkiyi açığa çıkarır.

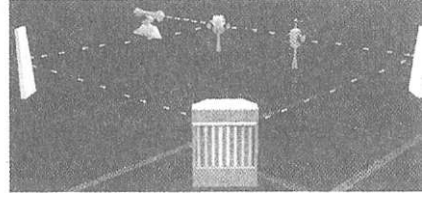
Konunun fizikiğini anlamak için, sanat koleksiyoncusu olduğunuzu varsayın ve yeni Springfield Sanat ve Güzelleştirme Derneği nin başkanı olan Bay Smithers da sizin satışa çıkardığınız çeşitli parçaları görmek üzere geliyor olsun. Aslında onun gerçekten ilgi duyduğu şeyin, koleksiyonunuza hiç uymadığını düşündüğünüz ama size çok sevdiğiniz büyük amcanız Monty Burns'den kaldığı için satıp satmamak konusunda büyük bir duygusal çatışma yaşadığınız *The Full Monty* olduğunu biliyorsunuz. Bay Smithers geldiğinde koleksiyonunuzdan, son müzayedelerden, Metropolitan'daki son gösteriden söz ediyorsunuz; sonra, şaşırtıcı bir şekilde, yıllar önce Bay Smithers in büyük amcanızın baş yardımcısı olduğunu öğreniyorsunuz. Konuşmanın sonunda *Full Monty* ile vedalaşmaya istekli olduğunuza karar veriyorsunuz: İsteddiğiniz çok sayıda başka eser var ve eğer kendinize baskı uygulamazsanız, koleksiyonunuzun odaklandığı bir tema olmayacak. Kendinize her zaman söylediğiniz gibi sanat koleksiyonculuğu dünyasında bazen fazla, azdır. Bu karar üzeri-

ne düşünürken geçmişe baktığınızda zaten Bay Smithers gelmeden önce satmaya karar vermişsiniz gibi görünüyor. Her ne kadar *Full Monty*'ye öteden beri belli bir sevginiz varsa da, epeydir birbiriyle uyumsuz eserleri "yığma" konusunda ihtiyatlısınız, zaten yirminci yüzyıl sonunun erotik-nükleer gerçekliği de, yerince olgun olmayan koleksiyoncular için korkutucu bir alandır. Her ne kadar ziyaretçiniz gelmeden önce ne yapacağınızı bilmediğinizi düşündüğünüzü hatırlıyorsanız da, şimdi, o gelmeden önce sanki ne yapacağınızı biliyormuşsunuz gibi görünüyor. Bu, tam olarak geleceğin geçmişi etkilemesi değil ama Bay Smithersla hoşunuza giden konuşmanız ve sonrasında satmaya istekli olduğunuzu bildirmeniz, geçmişi bir anlamda o zaman henüz karar verilmemiş gibi gözükken özel şeyleri kesinleştirme yolunda aydınlatmış gibi duruyor. Sanki Bay Smithers'le konuşmanız ve satma kararını açıklamanız, çoktan verilmiş bir kararı, açıklanması gün ışığını bekleyen bir kararı kabul etmenize yardımcı olmuştur. Gelecek, geçmişte sürmekte olan bir şeyin daha lam bir öyküsünü anlatmanıza yardım etmiştir.

Elbette bu örnekte gelecekteki olaylar yalnızca sizin geçmiş algınızı ya da yorumunuzu etkilemektedir, o nedenle şaşırtıcı ya da kafa karıştırıcı değildir. Ama Wheeler'in gecikmiş seçim deneyi gelecekle geçmiş arasındaki bu psikolojik oyunu kuantum dünyasına taşır ki, bu deney orada daha kesin ve daha şaşırtıcı bir hal alır. Şekil 7. la da gösterilen deneyi biraz değiştirerek işe başlayalım öyle ki, şiddeti iyice azaltılan lazer, fotonları Şekil 7.1b'deki gibi tek tek göndermeye başlasın. Aynı zamanda demet bölücünün yanına bir foton detektörü daha koyalım. Eğer yeni detektör kapatılırsa (Şekil 7.2b'ye bakınız), o zaman özgün deney düzeneğine geri dönmüş oluruz ve fotonlar ekrandaki fotoğrafplağında girişim desenleri oluştururlar. Ama eğer yeni detektör açılırsa (Şekil 7.2a), bize fotonun hangi yoldan gittiğini söyler: Eğer fotonu saptamışsa, foton o yoldan gitmiş demektir; saptayamamışsa, diğer yoldan gitmiş demektir. Böyle bir "hangiyoldan" bilgisi, fotonu bir parçacık olarak davranmaya zorlar, o zaman da dalga karakterli girişim deseni artık üretilmez.



(a)



(b)

Şekil 7.2 (a) "Hangi-yoldan" detektörlerini açmakla girişim desenini bozarız, (b) Yeni detektörler kapatıldığında Şekil 7.1 'deki özgün deneye geri döneriz ve girişim deseni ortaya çıkar.

Şimdi de düzeneği Wheeler metoduyla, yeni foton detektörünü fotonun izleyeceği yollardan birinin üzerinde ekrana doğru kaydırarak değiştirelim. İlke olarak fotonların yolları istediğiniz kadar uzun olabilir, dolayısıyla yeni detektör demet bölücünden epeyce uzakta olabilir. Gene, eğer bu yeni foton detektörü kapatılırsa, fotonlar ekranda bir girişim deseni oluştururlar. Eğer detektör açılırsa, "hangi-yoldan" bilgisi verir ve bu nedenle girişim desenine engel olur.

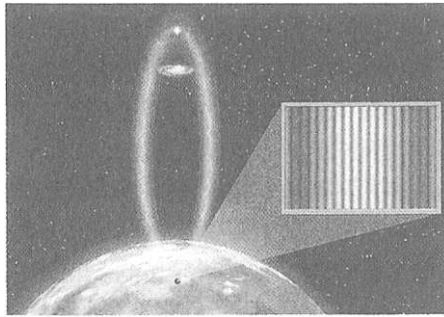
Yeni tuhaflık "hangi-yoldan" ölçümünün, fotonun demet bölücünde her iki yoldan birden gidip dalga gibi davranmak veya yollardan birini seçip parçacık gibi davranmak "kararını" verdiği yerden çok *sonra* yer alıyor olmasıdır. Foton demet bölücünden geçerken detektörün açık mı kapalı mı olduğunu "bilemez", aslına bakılırsa detektörün açık-kapalı anahtarı foton demet bölücünden geçtikten sonra açılıp kapatılacak şekilde de ayarlanabilir. Detektörün kapalı olma olasılığına karşı hazırlıklı olmak için fotonun olasılık dalgası ikiye ayrılıp iki detektörden birden geçmek durumundadır, böylece ikisinin karışımı ekranda gözlenen girişim desenini yaratır. Ama eğer yeni detektör açık durumdaysa -veya foton demet bölücünden geçtikten sonra açılırsa- o zaman foton bir kimlik bunalımıyla karşı karşıya kalacak gibi görünüyor: Demet bölücünden geçerken, iki yoldan birden giderek dalga karakterini ortaya koymuştu, ama şimdi, seçimini yaptıktan bir süre sonra, parçacık olmanın gerektirdiği gibi, bu yollardan yalnızca birinden geçmiş olması gerektiğini "anlamaktadır".

Bütün bunlara rağmen, bir şekilde fotonlar hep doğru tercihleri yaparlar. Ne zaman detektör açık olsa -gene, detektör fotonun demet bölücünden geçmesinden sonra açılmış olsa bile- foton tam bir parçacık gibi davranır. Ekrana yalnızca tek bir yoldan gittiği bulunur (eğer her iki yola da foton detektörleri yerleştirirsek, lazerin göndereceği her foton, detektörlerin yalnızca birinde ya da diğerinde saptanır, hiçbir zaman her ikisinde birden değil); sonuçtaki veriler girişim deseni sergilemez. Yeni detektör kapalı olduğunda -gene, eğer bu karar foton demet bölücünden geçtikten sonra verilmiş olsa bile- fotonlar tam olarak dalga gibi davranır ve her iki yoldan birden gittiklerini gösteren ünlü girişim desenini sergilerler. Sanki fotonlar geçmişteki davranışlarını gelecekte yapılacak olan yeni detektörün açılıp açılmama kararına bağlı olarak ayarlıyorlarmış gibi duruyor; sanki fotonlar sonradan karşılaşacakları deneysel bir durumun uyarısını önceden alıyor ve ona göre davranıyorlar gibi. Sanki tutarlı ve kesin bir geçmiş, yalnızca onun yol açacağı gelecekteki olaylar tamamlandıktan sonra apaçık hale geliyor.⁴

Sizin *The Full Monty*'yi satma kararınızda da bir benzerlik var. Bay Smithers'la karşılaşmadan önce, resmi satıp satmama konusunda kuşkulu, kararsız, bulanık, karışık bir hem istekli olma hem de olmama durumundaydınız. Ama Bay Smithers'la sanat dünyası hakkında konuşup onun büyük amcanıza duyduğu sevgiyi öğrenmeniz, satma fikrine daha sıcak yaklaşmanızı sağladı. Konuşma, kesin bir karara yol açtı, bu da kararın geçmişinin önceki belirsizlikten sıyrılıp berraklaşmasını sağladı. Geçmişe baktığınızda sanki kararın o zaman verilmiş olduğunu hissedersiniz. Ama eğer Bay Smithers'tan hoşlanmamış olsaydınız, eğer size *The Full Monty*'mn güvenilir ellerde olacağı duygusunu vermemiş olsaydı, satmama kararı da verebilirdiniz.. Bu durumda kolaylıkla geçmişe ait olduğunu söyleyebileceğiniz bir öykü, aslında çok önceden *satmama* kararı almış olduğunuza dair, resmi satmak ne kadar mantıklı olsa da, içinizde derinlerde bir yerde resmi satmanıza izin vermeyecek kadar güçlü, duygusal bir bağ bulunduğu yolundaki itirazınızı da içe-

rebilirdi. Elbette gerçek geçmiş en ufak bir biçimde değişmemiştir. Ama şimdi farklı yaşananlar, farklı bir geçmiş betimlemeni-ze yol açmaktadır.

Psikolojik alanda geçmişini yeniden yazmak veya yeniden yorumlamak yaygındır; geçmiş öykümüz genellikle şimdiki zamanda yaşadıklarımızca haberdar edilir. Ama fizik alanında -normal olarak nesnel ve kesin olması gerektiğini düşündüğümüz bir alanda- geçmişin geleceğe bağlı olma olasılığı insanın başını döndürür. Bu dönmeyi daha da arttıracak şekilde, Wheeler gecikmiş seçim deneyinin, ışık kaynağının bir laboratuvar lazeri olmayıp uzayın derinliklerindeki güçlü bir kuasar olduğu seçeneğini tartışmaya açıyor. Burada demet bölücü de bir laboratuvar aleti değil, Şekil 7.3'te görüldüğü gibi, kütleçekimi geçen fotonları odaklayıp onları dünyaya yönlendiren bir mercecek gibi davranan, aradaki bir galaksidir. Her ne kadar bu deneyi şimdiye kadar hiç kimse yapmamış olsa da, ilke olarak, eğer kuasardan yeteri kadar (oton gelirse, bu fotonların tıpkı laboratuvar deneyinde olduğu gibi, uzun bir poz süresi sonunda fotoğraf plağında bir girişim deseni yaratmaları gerekir. Ama bu yollardan birinin ya da diğerinin sonuna bir foton sayacı yerleştirebilseydik, fotonların "hangi-yoldan" bilgisini sağlayarak, girişim desenini yok etmesi gerekirdi. Deneyin bu biçiminin çarpıcı yönü, fotonların bizim



Şekil 7.3 Uzak bir kuasardan gelen ışık, aradaki bir galaksi tarafından bölünüp odaklanarak, ilke olarak, bir girişim deseni oluşturacaktır. Eğer her fotonun hangi yoldan gittiğinin belirlenmesini sağlayan bir detektör çalıştırılırsa, fotonlar artık girişim deseni oluşturmazlar.

perspektifimizden milyarlarca yıldır yol alıyor olmalarıdır. Parçacık gibi galaksinin bir yanından ya da öbür yanından dolaşma veya dalga gibi her iki yanından birden dolaşma kararı, detektörün, herhangi birimizin ve hatta Dünya'nın var oluşundan çok çok öncesinden verilmiş gibi görünecektir. Milyarlarca yıl sonra detektör yapıp fotonların Dünya ya ulaşacağı yollardan birinin üzerine yerleştirilir ve çalışır hale getirilir. Son dönemde yapılan bu çalışmalar bir şekilde fotonların parçacık olarak davranmalarını sağlar. Dünya ya doğru olan uzun yolculuklarında sanki kesinlikle galaksinin bir tarafından ya da öbür tarafından geçiyormuş gibi davranırlar. Ama, eğer birkaç dakika sonra detektörü kapatırsak, fotoğraf plağına daha sonra ulaşan fotonlar girişim deseni sergilemeye başlarlar ki bu da milyarlarca yıl boyunca fotonların, hayaletimsi arkadaşlarının ardından galaksinin öbür yanından dolaştıklarını gösterir.

Yirmi birinci yüzyılda detektörü kapatmamızın fotonların milyarlarca yıl önceki hareketleri üzerinde bir etkisi olabilir mi? Elbette hayır. Kuantum mekaniği geçmişin olup bittiğini, tam anlamıyla olup bittiğini inkar etmez. Gerginlik, kuantuma göre *geçmiş* kavramının klasik anlayışa göre olan *geçmiş* kavramından farklı olmasından kaynaklanıyor. Klasik yetiştirilme tarzımız belirli bir fotonun *şöyle yaptığını* veya *böyle yaptığını* söylememizi ister. Ama kuantum dünyasında, yani bizim dünyamızda bu mantık, fotona çok sınırlayıcı bir gerçeklik atfeder. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, kuantum mekaniğinde normal olan, pek çok koldan oluşan, belirsiz, bulanık ve hibrid bir yapısı olan ve ancak uygun bir gözlem yapıldığında daha tanıdık, daha kesin bir berraklığa kavuşan bir gerçekliktir. Milyarlarca yıl önce galaksinin bir yanından ya da öbür yanından veya her iki yanından birden dolaşma kararını veren foton değildir. Foton, milyarlarca yıldır kuantum normalinde, olasılıkların bir karışımı olarak varlığını sürdürmektedir.

Gözlem işlemi bize pek tanıdık olmayan kuantum gerçekliğini gündelik klasik deneyimlere bağlar. Bugün yaptığımız gözlemler geçmişini yeniden değerlendirirken kuantum geçmişinin

bir kolunun belirgin hale gelmesine neden olur. O zaman, bu anlamda her ne kadar geçmişten günümüze kadar olan kuantum evrimi şimdi yaptığımız herhangi bir şeyden etkilenmiyorsa da, anlattığımız geçmiş öyküsü bugün yaptıklarımızın izlerini taşıyabilir. Eğer ışığın ekrana ulaşacağı iki yola foton detektörleri koyarsak, o zaman geçmişe ilişkin öykümüz, fotonun hangi yoldan gittiği tanımlamasını kapsayacaktır; foton detektörlerini koymakla "hangi yoldan" bilgisinin öykümüzün kesin ve temel bir ayrıntısı olmasını garantileriz. Ama eğer foton detektörlerini koymazsak, geçmiş öykümüz zorunlu olarak farklı olacaktır. Foton detektörleri olmaksızın fotonların hangi yoldan geçtiklerine ilişkin herhangi bir şey öğrenemeyiz; foton detektörleri yoksa, hangi-yoldan ayrıntıları da yoktur. Her iki öykü de geçerlidir. Her iki öykü de ilginçtir. Yalnızca farklı durumları tanımlarlar.

Bugün yapılan bir gözlem, bu nedenle, dün, önceki gün veya milyarlarca yıl önce başlayan bir sürecin öyküsünü tamamlamamıza yardım eder. Bugün yaptığımız bir gözlem, bugün geçmiş anlatırken verebileceğimiz ve vermek zorunda olduğumuz ayrıntıları tanımlar.

Geçmiş Silmek

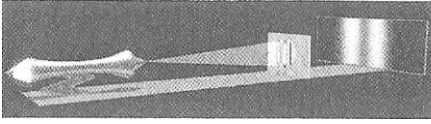
Bu deneylerde geçmişin herhangi bir şekilde günümüzde yapılanlar tarafından değiştirilmediğini, bu deneylerin zekice de hazırlanmış olsa hiçbir türünün bu kaypak amacı gerçekleştiremeyeceğini görmek önemlidir. Bu durumda ortaya şöyle bir soru çıkar: Peki, eğer olmuş bir şeyi değiştiremiyorsanız, o zaman yapılabilecek ikinci en iyi şeyi yaparak geçmişin günümüz üzerindeki etkisini silebilir misiniz? Bu fantezi, bir dereceye kadar gerçekleştirilebilir. Bir kaleci yediği kolay bir goldeki hatasını, çok zor bir topu çıkararak telafi edebilir. Elbette böyle bir örnek hiçbir şekilde gizemli değildir. Yalnızca geçmişteki bir olay, gelecekteki bir olayın olmasını kesinlikle engelliyor gibi görüldüğü zaman (yenen kolay golün kesinlikle mükemmel bir oyun ortaya konmasını engellemesi gibi), eğer bize sonradan, engellenen

olayın aslında gerçekleştiği söylendiyse bir şeylerin ters gittiğini düşünürüz. İlk olarak 1982'de Marlan Scully ve Kai Drühl tarafından ortaya atılan *kuantum silicisi* bunu kuantum mekaniğindeki bir tür tuhaflığın ipucu olarak yorumlamaktadır.

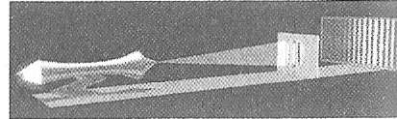
Kuantum silicisi deneyinin en basit versiyonunda, aşağıdaki şekilde değiştirilmiş bir çift yarık düzeneğini kullanılır. Her yarığın önüne bir etiketleme aygıtı konur; bu aygıt, daha sonra incelenecek olan fotonların hangi yarıktan geçmiş olduğunu işaretler. Fotonların nasıl işaretleneceği -yani soldaki yarıktan geçene L, sağdakinden geçene R koymaya eşdeğer işlemin nasıl yapılacağı- sorusu iyi bir soru olmakla birlikte ayrıntıların özel olarak fazlaca bir önemi yoktur. Süreç kabaca fotonların bir yarıktan serbestçe geçmesine izin veren ama spin eksenini belli bir yönde durmaya zorlayan bir aygıtı dayanır. Eğer soldaki ve sağdaki yarıkların önünde duran aygıtlar foton spinlerini kendine özgü ama farklı yollarla etkilerlerse, o zaman, yalnızca fotonların çarpma noktalarını göstermekle kalmayan ama aynı zamanda fotonun spin yönünü de kaydeden, daha gelişmiş bir detektör ekranı, belirli bir fotonun detektöre giderken hangi yarıktan geçtiğini de ortaya çıkaracaktır.

Bu etiketlemeli çift-yarık deneyi yapıldığında fotonlar, Şekil 7.4a'da görüldüğü gibi, herhangi bir girişim deseni göstermediler. Açıklamayı şimdiden biliyoruz: Yeni etiketleme aygıtları "hangi-yoldan" bilgisinin elde edilmesini sağlar ve "hangi-yoldan" bilgisi de şu veya bu geçmişi öne çıkarır ve veriler belirli bir fotonun soldaki veya sağdaki yarıktan geçmiş olduğunu gösterir. Soldaki-yarık ve sağdaki-yarık yörüngelerinin birleşimi olmadan girişen olasılık dalgaları olmayacağı için de girişim desenleri üretilmez.

Şimdi, Scully ve Drühl'ün akıllarına gelen soru şuydu: Eğer foton, detektör ekranına çarpmadan hemen önce etiketleme aygıtının koyduğu işaret silinerek fotonun hangi yoldan geçtiğinin belirlenmesi olasılığı ortadan kaldırılsa ne olur? İlke olarak bile, saptanan fotonun hangi-yoldan geçtiği bilgisini veren bir araç olmadan her iki sınıf geçmiş de işin içine girerek girişim desen-



(a)



(b)

Şekil 7.4 Kuantum silici deneyinde iki yarığın önüne yerleştirilen aygıtlar her fotonu, sonraki bir incelemede hangi yarıktan geçtiği belli olacak şekilde işaretler, (a)'da böylesi bir "hangi-yoldan" bilgisinin girişim desenini yok ettiğini görüyoruz, (b)'de detektör ekranının hemen önüne fotonlardaki işaretleri silen bir aygıt yerleştirilmiştir. "Hangi-yoldan" bilgisi ortadan kalktığı için, girişim deseni yeniden ortaya çıkar.

lerinin yeniden ortaya çıkmasına neden olur mu? Dikkat ederken bu tür bir "geriye alış", kalecinin mutlak golü kurtarmasından çok daha fazla "şok edici" bir kategoriye girer. Etiketleme aygıtları açıkken, fotonun soldaki yarıktan *veya* sağdaki yarıktan geçerek, uysalca, bir parçacık olarak davrandığını varsayıyoruz. Eğer foton ekrana ulaşmadan hemen önce, bir şekilde, taşımakta olduğu "hangi-yoldan" bilgisini silersek, girişim desenlerinin yeniden oluşmasına izin vermek için çok geç kalınmış gibi görünüyor. Girişim için fotonun dalga gibi davranması gerekir. İki yarıktan birden geçmelidir ki detektöre giderken kendisiyle etkileşebilsin. Ama fotonu başlangıçtaki etiketlememiz onun bir parçacık gibi davranmasını garantiliyor ve ekrana doğru giderken soldaki veya sağdaki yarıktan geçeceği için girişimin oluşmasına izin vermiyor gibi görünüyor.

Raymond Chiao, Paul Kwiat ve Aephraim Steinberg tarafından yapılan bir deneyde, ekrandan hemen önce yeni bir silici aygıtın kullanıldığı ve şematik olarak Şekil 7.4'te görülen deney düzeneği kullanıldı. Burada da, ayrıntılar önemli olmamakla birlikte, özet olarak, silici, fotonun soldaki veya sağdaki yarıktan geçtiğine bağlı olmaksızın, spininin hep aynı yöne doğru olmasını garantilemeye çalışır. Fotonun spini sonradan incelenerek hangi yarıktan geçtiği bulunamaz, dolayısıyla "hangi-yoldan" işareti silinmiş olur. Şurası önemli ki, bu silinmeden sonra ekranda saptanan fotonlar, girişim deseni *oluştururlar*. Silici, ekranın hemen önüne yerleştirildiği zaman, fotonların yarıklara yak-

laştığında yapılan işaretlemeleri geri alır yani siler. Gecikmiş seçim deneyinde olduğu gibi, ilke olarak böyle bir silme işlemi, engellediği etkiden milyarlarca yıl sonra olabilir, böylece de geçmiş-işi hatta çok eski geçmişi geri alabilir.

Buna nasıl bir anlam verebiliriz? Unutmayın ki veriler, kuantum mekaniğinin kuramsal hesaplarıyla tam olarak uyuyor. Yaptıkları kuantum mekaniğine özgü hesaplamalar sonucunda bunun işe yarayacağı konusunda ikna oldukları için Scully ve Drühl bu deneyi önerdiler. İşe yaradı da. Bu yüzden, kuantum mekaniğinde her zaman olduğu gibi, bu bilmece kuramın deneyle boy ölçüşmesini sağlamaz. Deneyle desteklenen kuramın bizim sezgisel zaman ve gerçeklik duyularımızla boy ölçüşmesini sağlar. Gerginliği azaltmaya çalışalım: Dikkat ederseniz, heryarığın önüne bir foton *detektörü* koymuş olsanız bile, detektörde fotonun soldaki yarıktan mı yoksa sağdaki yarıktan mı geçtiği kesin olarak belirlenir ve böylesi kesin bir bilgiyi silmenin, girişim desenini yeniden oluşturmanın hiçbir yolu yoktur. Ama etiketleme aygıtları farklıdır çünkü yalnızca "hangi-yoldan" bilgisinin belirlenme olanağını sağlarlar ve olanaklar da silinebilir şeylerdir. Bir etiketleme aygıtı, kabaca konuşursak, geçen bir fotonu o şekilde değiştirir ki, foton hâlâ iki yolda birden hareket eder ama fotonun olasılık dalgasının soldaki kısmı sağdaki kısmına göre daha bulanık olur veya fotonun olasılık dalgasının sağdaki kısmı soldaki kısmına göre daha bulanık olur. Sonra da, normalde her yarıktan çıkması gereken sıralı tepeler ve çukurlar dizisi de Şekil 4.2b de olduğu gibi- bulanıklaşır, sonuçta detektör ekranında girişim deseni oluşmaz. Buradaki önemli kavrayış, hem soldaki hem de sağdaki dalgaların hâlâ var olduğudur. Silici her iki dalgayı da yeniden odakladığı için işe yarar. Bir gözlük gibi bulanıklığı giderir, her iki dalgayı da net bir şekilde odaklar ve bunların yeniden birbirleriyle etkileşerek bir girişim deseni oluşturmalarına izin verir. Sanki etiketleme aygıtlarının işlerini yapmasından sonra girişim deseni ortadan kaybolmuş ama sabırla bir şeyin veya birisinin onu geri döndürüp yeniden oluşturmasını bekliyor gibidir.

Bu açıklama, kuantum silicisini daha az gizemli hale getiriyor olabilir ama, sırada alışageldiğimiz uzay ve zaman kavramlarına daha da çok meydan okuyan, kuantum silici deneyinin çarpıcı bir çeşitlemesi daha var.

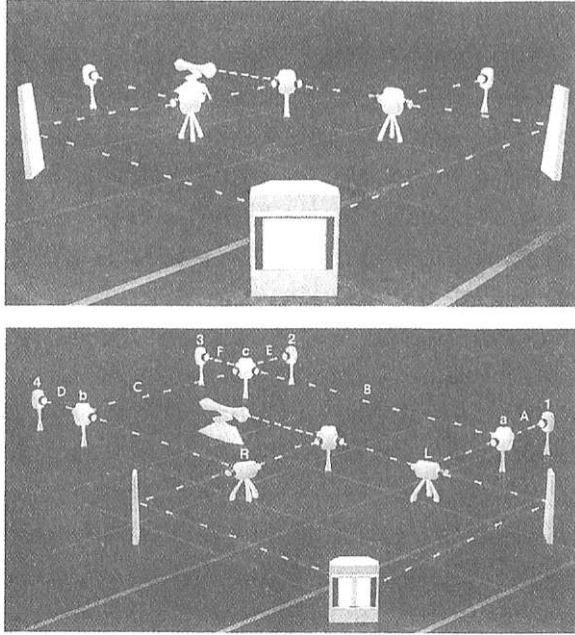
Geçmişî Biçimlendirmek

Bu deney, yani *gecikmiş seçimli kuantum silicisi* deneyi de Scully ve Drühl tarafından önerildi. Şekil 7.1 deki demet bölücü aygıtla başlayan bu deney, her bir yola aşağı-değiştirici adı verilen aygıtlar yerleştirilerek değiştirilmiştir. Aşağı-değiştiriciler girdi olarak bir foton alır, çıktı olarak her biri özgün totonun yarı enerjisine sahip olan ("aşağı-değiştirilmiş") iki foton üretirler, iki fotondan biri (ki *sinyal* totonu olarak adlandırılır) özgün fotonun detektör ekranına doğru izleyeceği yola doğru yönlendirilir. Aşağı-değiştirici tarafından üretilmiş olan diğer foton (ki *işsiz* foton olarak adlandırılır) ise, Şekil 7.5a'da görüldüğü gibi, bambaşka bir yoldan gönderilir. Deneyin her tekrarlanışında hangi aşağı-değiştiricinin işsiz-foton ortağı çıkardığını gözleyerek sinyal fotonunun ekrana doğru hangi yolu izlediğini belirleyebiliriz. Bir kere daha, sinyal fotonları hakkında hangi-yoldan bilgisinin toplanma yeteneği -herhangi bir sinyal fotonuyla etkileşmediğimiz için bütünüyle dolaylı olsa da- girişim deseninin oluşmasını engelleme etkisine sahiptir.

Şimdi daha tuhaf bölüme geldik. Verilen bir işsiz fotonun hangi aşağı-değiştiriciden çıktığını belirlemeyi olanaksız hale getirecek şekilde deneyi etkilersek ne olur? Yani işsiz fotonlarda somutlaşan hangi-yoldan bilgisini silersek ne olur? Çok şaşırtıcı bir şey olur: Sinyal fotonlarına doğrudan bir şey yapmamış olsak bile, işsiz ortaklarının taşıdığı hangi-yoldan bilgisini silmekle, sinyal fotonlarının yeniden girişim deseni sergilemesini sağlayabiliriz. Gerçekten önemli olduğu için bunun nasıl olduğunu göstereyim.

Eğer bu bölümde zorlandığınızı hissediyorsanız, sürekliliği kaybetmeden diğer alt bölüme atlayabilirsiniz. Ama sonuçlar gerçekten hayret verici olduğu için atlamamanızı tavsiye ederim.

Bütün temel fikirleri somutlaştıran Şekil 7.5b ye bir göz atın. Ama gözünüz korkmasın. Aslında görüldüğünden daha basittir ve şimdi üzerinden adım adım gideceğiz. Şekil 7.5b'deki düzenek, Şekil 7.5a'dan, salındıktan sonra işsiz fotonları nasıl saptayacağımız konusunda farklılaşıyor. Şekil 7.5a'da fotonları doğrudan saptamıştık ve dolayısıyla her birinin hangi aşağı-değiştiriciden geldiğini, yani verilen bir sinyal fotonunun hangi yoldan geçtiğini hemen belirleyebilirdik. Yeni deneyde her işsiz (oton bir labirentten geçirilir, bu da bizim böylesi bir saptama yapmamızı olanaksız kılar. Örneğin, bir işsiz fotonun "L" ile işaretlenen aşağı-değiştiriciden salındığını varsayalım. Doğru-



Şekil 7.5 (a) Aşağı-değiştiricilerle güçlendirilmiş bir demet bölücü deneyi, işsiz fotonlar hangi-yoldan bilgisini verdiği için, bir girişim deseni oluşturmaz, (b) Eğer işsiz fotonlar doğrudan dedektörler tarafından belirlenmez ve şekilde gösterilen labirent boyunca gönderilirse işte o zaman verilerden bir girişim deseni çıkarılabilir. Dedektör 2 veya 3 ile belirlenen işsiz fotonlar hangi-yoldan bilgisi vermediği için sinyal fotonları bir girişim deseni oluşturur.

dan detektöre girmek yerine (Şekil 7.5a daki gibi) bu foton bir demet bölücüye ("a" ile işaretlenmiş) gönderilir ve dolayısıyla, yüzde 50 olasılıkla "A" ile işaretlenmiş yoldan, yüzde 50 olasılıkla "B" ile işaretlenmiş yoldan gider. A yolundan giderse, ("1" ile işaretlenmiş) foton detektörüne girecek ve varışı beklendiği gibi kaydedilecektir. Ama eğer işsiz foton B yolundan giderse, başka etkilere maruz kalacaktır. Başka bir demet bölücüye ("c" ile işaretlenmiş) yönlendirilecek, böylece yüzde 50 olasılıkla E yolundan devam ederek "2" ile işaretlenmiş detektöre gidecek, yüzde 50 olasılıkla F yolundan devam ederek "5" ile işaretlenmiş detektöre gidecektir. Şimdi -dikkat edin, çünkü bütün bunların yapılmasının bir nedeni var- aynı mantık, "R" ile işaretlenmiş aşağı-değiştiriciden salınan bir işsiz fotona uygulandığında, eğer işsiz foton D yolundan giderse "4" ile işaretlenmiş detektör tarafından kaydedileceğini, eğer C yolundan giderse c demet bölücüsünden geçtikten sonra izleyeceği yola bağlı olarak ya detektör 5 tarafından veya detektör 2 tarafından kaydedileceğini söyler.

Acaba olayı neden bu kadar karmaşık hale getirdik? Dikkat ederseniz, eğer bir işsiz foton detektör 1 tarafından saptanırsa, R aşağı-değiştiriciden salınan bir işsiz fotonun detektöre ulaşacak bir yolu olmadığı için, bu fotonun eşi olan sinyal fotonunun soldaki yoldan geçtiğini anlarız. Benzer şekilde, bir işsiz foton detektör 4 tarafından saptanırsa, onun eşi olan sinyal fotonunun sağdaki yoldan geçtiğini anlarız. Ama eğer işsiz foton detektör 2 tarafından saptanırsa, onun eşi olan sinyal fotonunun hangi yoldan geçtiği konusunda hiçbir fikrimiz olmaz çünkü bu foton yüzde 50 olasılıkla L aşağı-değiştiricisi tarafından salınmış olup B-E yolunu, yüzde elli olasılıkla da R aşağı-değiştiricisi tarafından salınmış olup C-E yolunu izlemiştir. Benzer biçimde, eğer bir işsiz foton detektör 3 tarafından saptanmışsa, L aşağı-değiştiricisi tarafından salınmış ve B-F yolunu izlemiş veya R aşağı-değiştiricisi tarafından salınmış ve C-F yolunu izlemiş olabilir. Bu nedenle, *işsiz fotonları detektörler 1 ve 4 tarafından saptanmış olan sinyal fotonlarının hangi yoldan*

bilgisine sahip oluruz ama işsiz fotonları detektörler 2 ve 4 tarafından saptanmış olan sinyal fotonlarının hangi yoldan bilgisi silinmiş olur.

Acaba bu bazı hangi-yoldan bilgilerinin silinişi -sinyal fotonlarına *doğrudan hiçbir şey yapmamış* olsak bile- girişim etkilerinin geri gelişi anlamına mı geliyor? Gerçekten öyle ama yalnızca işsiz eş-fotonları detektör 2 veya detektör 3 tarafından saptanmış olan sinyal fotonları için. Yani sinyal fotonlarının ekrandaki çarpma noktalarının tamamı Şekil 7.5a'daki veriler gibi görünecek, ya bir yoldan ya da diğerinden giden fotonların karakteristiği olduğu üzere, *en küçük bir girişim deseni ipucu gösterecektir.* Ama dikkatimizi bu veri noktalarının bir alt takımına -örneğin işsiz fotonları detektör 2 veya detektör 3 tarafından saptanmış olan sinyal fotonlarına- yoğunlaştırırsak, bunlar bir girişim deseni *sergileyecektir!* İşsiz fotonları bir nedenden ötürü hangi-yoldan bilgisi sağlamayan sinyal fotonları, her iki yoldan birden geçmiş gibi davranırlar! Eğer deney düzeneğini, işsiz fotonu detektör 2 tarafından saptanmış olan her sinyal fotonunun konumu için kırmızı, diğerlerinin tamamının konumu için yeşil renkli noktalar gösterecek şekilde ayarlamış olsak, ekrana bakan renk körü birisi girişim deseni görmez ama diğer herkes kırmızı noktaların parlak ve karanlık şeritler halinde düzenlenmiş olduğunu -yani girişim deseni sergilediğini- görür. Aynı şey detektör 2 yerine detektör 3 için de doğrudur. Ama işsiz fotonları detektör 1 veya detektör 4 tarafından saptanmış olan sinyal fotonlarını ayırmış olsak, bu fotonlar eşlerinin hangi-yoldan bilgisini verdikleri için böyle bir girişim deseni ortaya çıkmaz.

Deneylerce de doğrulanan⁵ bu sonuçlar, göz kamaştırıcıdır: Şekil 7.5adaki gibi, hangi-yoldan bilgisi sağlama potansiyeli olan aşağı-değiştiriciler koyarak girişim desenini yok ederiz. Girişim deseni olmayınca da, doğal olarak her fotonun ya soldaki yoldan ya da sağdaki yoldan geçtiği sonucuna varırız. Ama şimdi, bunun acele varılmış bir sonuç olduğunu görüyoruz. İşsiz fotonlardan bazılarının taşıdığı hangi-yoldan bilgisi sağlama potansiyelini dikkatlice yok ederek verileri tekrar girişim dese-

ni gösterecek şekilde getirebiliriz ki bu da fotonlardan bazılarının gerçekten her iki yoldan birden geçtiğini gösterir.

Belki de sonuçların en göz kamaştırıcısı olan şunu da gözden kaçırmayın: Fazladan üç demet bölücü ve dört işsiz-foton detektörü laboratuvarın veya evrenin öbür tarafında bulunabilir, çünkü tartışmamızdaki hiçbir şey, bunların işsiz lotonları eş sinyal fotonları ekrana çarpmadan önce veya sonra saptamalarına dayanmıyor. O zaman bu aygıtların birbirinden çok uzakta, örneğin on ışık yılı uzakta olduklarını varsayın ve bunun neye yol açacağını bir düşünün. Şekil 7.5b'deki deneyi bugün yaparsınız, çok büyük sayıda fotonun çarpma noktalarını -birbiri peşisıra- kaydeder ve girişim deseni sergilemediklerini gözlersiniz. Eğer birisi sizden verileri açıklamanızı isterse, işsiz fotonlar nedeniyle hangi-yoldan bilgisinin elde edildiğini ve bu yüzden her sinyal fotonunun kesinlikle bir yoldan veya diğerinden geçtiğini, bunun da girişim olasılığını ortadan kaldırdığını söylersiniz. Ama yukarıda da değindiğimiz gibi bu, neyin olup bittiği konusunda acele varılmış bir sonuç, geçmişin erken yapılmış bir tanımı olur.

Gördüğünüz gibi, on yıl sonra dört foton detektörü -birbiri peşisıra- işsiz fotonları alacaktır. Eğer bundan sonra, diyelim detektör 2'de hangi fotonların alındığı konusunda (yani birinci, yedinci, sekizinci, on birinci... işsiz fotonlar ulaşmış) bilgilendirilerseniz ve sonra da yıllar önce aldığınız verilere dönerek bunlara karşılık gelen foton çarpma noktalarını ekranda parlatırsanız (yani ulaşmış olan birinci, yedinci, sekizinci, on birinci fotonları), parlattığınız veri noktalarının ekranda bir girişim deseni oluşturduğunu, bunun da bu sinyal fotonlarının her iki yoldan birden geçtiğini ortaya çıkardığını bulursunuz. Alternatif olarak sinyal fotonları verilerini toplamanızdan 9 yıl 364 gün sonra şakacının biri a ve b demet bölücülerini çıkararak -ertesi gün işsiz fotonlar ulaştığında hepsinin ya detektör 1'e veya detektör 4'e gitmelerini garanti ederek, böylece de *bütün* hangi-yoldan bilgisinin korunmasını sağlayarak- deneye sabotaj yaparsa, o zaman siz bu bilgiyi aldığınızda, *her* sinyal fotonunun ya sağdaki ya da soldaki yoldan geçtiğini, dolayısıyla sinyal fotonu verile-

rinden çıkarılacak bir girişim deseni olmayacağı sonucuna varırsınız. Bu yüzden, bu tartışmanın açıkça gösterdiği gibi, sinyal fotonu verilerini açıklamak için anlatacağınız öykü, verilerin toplanmasından on yıl sonraki ölçümlere dayanır.

Gelecekteki ölçümlerin bugün yaptığınız deneyde olup bitenleri herhangi bir şekilde değiştirmeyeceğini; gelecekteki ölçümlerin bugün aldığınız verileri değiştiremeyeceğini bir kere daha vurgulamak isterim. Ama gelecekteki ölçümler, sonradan bugün olup biteni tanımlarken kullanacağınız bazı ayrıntıları *etkilerler*. İşsiz foton ölçümlerinin sonuçlarını almadan önce, verilen bir sinyal fotonunun hangi-yoldan geçmiş olduğu konusunda gerçekten hiçbir şey söyleyemezsiniz. Bununla birlikte, sonuçları aldığınızda işsiz eşleri başarılı bir şekilde hangi-yoldan bilgisini araştırmakta kullanılan sinyal fotonlarının -yıllar önce- soldan veya sağdan geçmiş olarak *tanımlanabilecekleri* sonucuna varırsınız. Vardığınız diğer bir sonuç da, işsiz eşlerinin taşıdığı hangi-yoldan bilgileri silinmiş olan sinyal fotonlarının -yıllar önce- kesinlikle ya bir yoldan ya da diğerinden geçmiş olarak *tanımlanamayacakları* olur (bu sonucu, yeni elde edilmiş işsiz foton verilerini kullanarak, bu son sınıf sinyal fotonları arasında daha önceden gizli kalmış olan girişim desenini açığa çıkararak, ikna edici bir biçimde kanıtlayabilirsiniz). Bu anlamda geleceğin, anlattığınız geçmişe ait bir öykünün biçimlenmesine yardım ettiğini görürüz.

Bu deneyler bizim sıradan uzay ve zaman kavramlarımıza göre çok büyük bir meydan okumadır. Bir şeyden çok önce ve çok uzakta gerçekleşen başka bir şeyin, bizim o şeyi tamamlamamızda hayati bir önemi vardır. Herhangi bir klasik -sağduyusal- bakış açısıyla bu olay, deliliktir. Elbette önemli nokta da buradadır: Klasik bakış açısı, kuantum evreninde kullanılamayacak bir bakış açısıdır. Einstein-Podolsky-Rosen tartışmasından kuantum fiziğinin evrende yerel olmadığını öğrendik. Eğer bu dersi tam olarak özümlediyseniz -doğruyu söylemek gerekirse zor bir kavram- uzayla zaman arasında bir tür bağlantıyı kapsayan bu deneyler çok sıra dışı gibi görünmeyebilir. Ama gündelik hayat standartlarıyla son derece olağanüstü oldukları kesindir.

Kuantum Mekaniği ve Yaşananlar

Bu deneyleri öğrendikten sonra birkaç gün için sevinçli olduğumu hatırlıyorum. Kendimi, gerçekliğin gizli yüzüne bir göz atmış gibi hissetmiştim. Gündelik yaşantılar -bu dünyaya ilişkin, sıradan, günlük etkinlikler- birden kuantum dünyamızın gerçek doğasını gizleyen klasik bir bilmecenin parçalanı gibi görünmeye başlamışlardı. Her gün yaşadığımız dünya, kuantum gerçekliğinin şaşırtıcı doğruları doğanın elçabukluğu ile gizlenmiş olarak beklerken, dinleyicilerini bildik, her zamanki uzay ve zaman kavramlarına inanmaları için yatıştıran bir sihir gibi görünmeye başlamıştı.

Son yıllarda fizikçiler, doğanın hilelerini açıklamak için -kuantum mekaniği yasalarının, gündelik hayatı son derece başarılı bir şekilde açıklayan klasik yasalarla nasıl bağdaştırılacağını anlamak için- özet olarak, atom ve atom-altı yapıların makroskopik cisimler oluşturmak üzere birleşirken sihirli tuhaflıklarından nasıl sıyrıldıklarını anlamak için çok çaba harcadılar. Araştırmalar sürüyor ama şimdiye kadar çok şey öğrenildi. Şimdi, zamanın okuna ilişkin bazı özel bağlantılara bir göz atalım, ama bu kez kuantum mekaniğinin bakış açısından.

Klasik mekanik 1600'lerin sonuna doğru Newton taralından keşfedilen yasaları temel alır. Elektromanyetizma 1800'lerin sonuna doğru Maxwell'in keşfettiği yasaları temel alır. Özel görelilik Einstein'ın 1905 yılında keşfettiği, genel görelilikse yine onun 1915'te keşfettiği yasaları temel alır. Bu yasaların hepsinde ortak olan ve zaman oku ikileminde (geçen bölümde açıklandığı gibi) temel olan şey, bu yasaların zamanda geçmiş ve geleceği tamamiyle simetrik bir biçimde ele almalarıdır. Bu yasaların hiçbir yerinde zamanda "ileri" yönünü "geri" yönünden ayıracak herhangi bir şey yoktur. Geçmiş ve gelecek eşit olarak ele alınır.

Kuantum mekaniği Erwin Schrödinger'in 1926 yılında keşfettiği bir yasayı temel alır." Bu yasa hakkında, zamanın bir anında, Şekil 4.5'teki gibi kuantum mekaniğine özgü bir olasılık dalgasının şeklini girdi olarak alıp daha önceki veya sonraki bir anda bu olasılık dalgasının nasıl görüldüğünü belirleyebilmemi-

za olanak verdiği gerçeğinin ötesinde bir şey bilmenize gerek yok. Eğer bu olasılık dalgası elektron gibi bir parçacıkla ilişkili ise, bu dalgayı, herhangi belirli bir anda bir deneyle bu elektronun belirli bir yerde bulunma olasılığını hesaplamak için kullanabilirsiniz. Newton, Maxwell ve Einstein'ın klasik yasaları gibi Schrödinger'in kuantum yasası da geçmiş-zamanla gelecek-zamanı eşit bir şekilde ele alır. *Böyle* başlayıp şöyle biten bir olasılık dalgasını gösteren bir "film", ters yönde oynatılabilir -yani olasılık dalgası şöyle başlayıp *böyle* bitebilir- ve bu filmlerden hangisinin doğru hangisinin yanlış olduğunu söylemenin hiçbir yolu yoktur. Her ikisi de Schrödinger denkleminin aynı derecede geçerli çözümleridir. Her ikisi de olayların gelişebileceği anlamlı yolları temsil ederler.⁷

Elbette burada sözü edilen "film", geçen bölümde bir tenis topunun veya kırılan bir yumurtanın hareketlerinin çözümlendiği filmlerden çok farklıdır. Olasılık dalgaları doğrudan görebileceğimiz şeyler değildir; bir olasılık dalgasını filme alacak bir kamera yoktur. Olasılık dalgalarını matematiksel denklemler kullanarak tanımlayabilir ve bunların en basitlerini zihninizde Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki gibi canlandırabiliriz. Ama olasılık dalgalarına ancak dolaylı olarak bir ölçüm süreciyle ulaşabiliriz.

Yani Bölüm 4'te özetlendiği ve yukarıdaki deneylerde tekrar tekrar görüldüğü gibi, kuantum mekaniğinin standart formüle edilişi olayların gelişimini *iki* farklı aşamada tanımlar. Birinci aşamada elektron gibi bir parçacığın olasılık dalgası -ya da alanın daha matematiksel diliyle *dalga fonksiyonu*- Schrödinger tarafından keşfedilen denkleme uygun olarak evrilir. Bu denklem dalga fonksiyonunun şeklinin, tıpkı bir su dalgasının gölün bir yanından diğerine yayılırken olduğu gibi yavaş ve düzgün bir biçimde değişmesini garantiler. İkinci aşamanın standart tanı-

Kuantum mekaniği, haklı olarak, düzgün ve yavaş değil de, sonraki bölümlerde açıkça göreceğimiz gibi, çalkantılı ve tedirgin bir mikro evren ortaya kovduğu yolunda bir üne sahiptir. Bu tedirginliğin kaynağı, dalga fonksiyonunun kendisinin her zaman var olan tedirgin niteliği, her ne kadar olaylar şimdi böyle ise de, bir an sonra çok farklı olabilecekleri olasılığının varlığıdır.

mında elektronun konumunu ölçerek gözlenebilir gerçeklikle temas kurarız ve bunu yaptığımızda elektronun dalga fonksiyonu aniden ve keskin bir biçimde değişir. Elektronun dalga fonksiyonu çok daha iyi bildiğimiz su dalgaları ya da ses dalgaları gibi değildir: Elektronun konumunu ölçtüğümüzde, dalga fonksiyonu sivrilir veya Şekil 4.7'de görüldüğü gibi çöker ve parçacığın olmadığı yerlerde 0 değeri alırken parçacığın deney sonucunda bulunduğu yerde yüzde 100 olasılığa fırlar.

Birinci aşama -dalga fonksiyonlarının Schrödinger denklemine göre evrilmesi- matematiksel olarak kesin ve tamamiyle kuşkusuz olup fizik camiasınca tam olarak kabul edilmiştir, ikinci aşama -dalga fonksiyonunun ölçüm sonucunda çökmesi- ise, aksine son seksen yıldır, iyi taraftan bakıldığında fizikçilerin zihnini hafifçe karıştırmış, kötü taraftan bakıldığında ise meslek yasaamlarını mahveden sorunlar, bilmece ve potansiyel çelişkiler ortaya koymuştur. Bölüm 4 ün sonunda söz edildiği gibi güçlük, Schrödinger denklemine göre dalga fonksiyonlarının çökmüyor *olmasıdır*. Dalga fonksiyonlarının çökmesi eklentidir. Deneycilerin gerçekte gördüklerini açıklamak amacıyla Schrödinger, denklemine bulduktan sonra eklenmiştir. Ham, çökmemiş bir dalga fonksiyonu parçacığın orada ve burada olduğu gibi acayip bir fikri temsil ediyorsa da, deneyler bunu hiçbir zaman görmezler. Onlar parçacığı kısmen orada, kısmen burada değil, her zaman belirli bir konumda veya diğerinde bulurlar; ölçüm aygıtlarının göstergeleri hiçbir zaman hem şu değeri hem de bu değeri göstermek gibi hayaletimsi bir karışım sergilemez.

Aynı şey, elbette, çevremizdeki dünyada yaptığımız rastgele gözlemlerde de geçerlidir. Hiçbir zaman bir sandalyenin hem orada hem de burada olduğunu gözlemeyiz; Ay'ın geceleyin gökyüzünün hem biryanında hem de diğeryanında olduğunu gözlemeyiz; bir kedinin hem ölü hem de canlı olduğunu hiçbir zaman görmeyiz. Dalga fonksiyonunun çökmesi kavramı, ölçüm işleminin dalga fonksiyonunun kuantum belirsizliğini terk ederek pek çok olasılıktan birini seçmesine neden olduğunu ön koşul olarak kabul ettiğimizde yaşadıklarımızla örtüşür.

Kuantum Ölçümü Bilmecesi

Ama bir deneycinin ölçüm yapması bir dalga fonksiyonunun çökmesine nasıl neden olur? Aslında çökme gerçekten olur mu, eğer olursa mikroskopik düzeyde ne olup biter? Herhangi bir ölçüm veya bütün ölçümler çökmeye neden olur mu? Çökme ne zaman olur ve ne kadar sürer? Schrödinger denklemine göre dalga fonksiyonları çökmediğine göre, kuantum evriminin ikinci aşamasında hangi denklem devreye girer ve bu yeni denklem nasıl Schrödinger denkleminin kuantum süreçleri üzerindeki gücünü zorla alarak onu tahtından indirebilir? Ve, zamanın okuna ilişkin ilğimiz açısından önemli olarak, ilk aşamayı yöneten denklem olan Schrödinger denklemi, zamanın ileri ve geri yönleri arasında bir ayrım yapmazken, ikinci aşamanın denklemi ölçümün yapılmasından önceki ve sonraki zamanlar arasında temel bir asimetri yaratıyor olabilir mi? Yani, kuantum mekaniği *gündelik dünya ile olan arayüzünü ölçümler ve gözlemlerle işin içine katarak* fiziğin temel yasalarının içine bir zaman oku yerleştiriyor olabilir mi? Ne de olsa kuantumun geçmişi ele alışının klasik fizikten nasıl farklı olduğunu ve *geçmiş* sözcüğüyle belirli bir gözlemin veya ölçümün öncesini kastettiğimizi daha önce tartışmıştık. O zaman, ikinci-aşama dalga fonksiyonunun çöküşüyle somutlaşan ölçümler geçmiş ve gelecek arasında, ölçümün öncesi ve sonrası arasına bir asimetri yerleştiriyor olabilir mi?

Bu sorular tam çözüme inatçı bir şekilde direnç gösterdiler ve hep tartışmalı kaldılar. Ama on yıllar boyunca, kuantum kuramı tahmin gücünden hiç ödün vermedi. İkinci aşama açıklanması zor bir şekilde kalmış olsa da, kuantum kuramının birinci aşama/ikinci aşama formülü belirli bir sonucu veya diğerini ölçme olasılığını tahmin eder. Bu tahminler belirli bir deneyi tekrar tekrar yaparak ve bir sonucun ya da diğerinin bulunmasının frekansını inceleyerek doğrulanmıştır. Bu yaklaşımın olağanüstü deneysel başarısı, ikinci aşamada gerçekten ne olduğunun açık bir biçimde telaffuz edilememesinden kaynaklanan rahatsızlığın çok önüne geçmiştir.

Ama rahatsızlık hep vardı ve oradaydı. Bu, dalga fonksiyonunun çökmesinin bazı ayrıntılarının tam olarak bilinmemesinin ötesindeydi. *Kuantum ölçüm problemi* adı verilen problem kuantum mekaniğinin sınırlarını ve evrenselliğini ifade eden bir konudur. Bunu görmek kolaydır. Birinci aşama/ikinci aşama yaklaşımı gözlenenle (örneğin bir elektron, proton ya da atom) gözlem işlemini yapan deneyci arasında bir ayrımı ortaya koyar. Deneyci olaya girmeden önce dalga fonksiyonları Schrödinger denklemine göre, son derece mutlu bir şekilde ve düzgünce evrilirler. Ama deneyci ölçüm yapmak üzere olaya burnunu sokunca oyunun kuralları birdenbire değişir. Schrödinger denklemi bir yana bırakılır ve ikinci-aşama çökmesi olayı devralır. Ama bir deneyciyi oluşturan atomlar, elektronlar ve protonlarla kullandığı aygıtların atomları, elektron ve protonları ile incelediği atomlar, elektron ve protonlar arasında bir fark olmadığına göre neden kuantum mekaniğinin bunları ele alış biçimleri arasında bir fark olsun? Eğer kuantum mekaniği sınır olmaksızın *her şeye* uygulanan, evrensel bir kuram ise, gözlenen ve gözleyen tam olarak aynı şekilde ele alınmalıdır.

Niels Bohr aynı fikirde değildi. Deneycilerin ve onların kullandıkları aygıtların temel parçacıklardan farklı olduklarını iddia ediyordu. Aynı parçacıklardan oluşmuş olsalar bile, onlar temel parçacıkların "büyük" topluluklarıydılar ve bu yüzden klasik fizik yasaları tarafından yönetiliyorlardı. Atomların ve atom altı parçacıkların minik dünyası ile bildiğimiz insanlar ve onların kullandıkları araçlar dünyasının arasında bir yerde, boyutlar değiştiği için kurallar da değişiyordu. Bu değişimi ileri sürmenin nedeni açıktı: Kuantum mekaniğine göre minik bir parçacık, orada ve burada bulunmanın bulanık bir karışımında konumlandırılabilir ama gündelik, büyük dünyada böyle bir davranış görmüyoruz. Peki, sınır tam olarak nerededir? Ve hayati öneme sahip olan konulardan biri de, ölçüm gibi bir durumda gündelik, büyük dünya ile atomların minik dünyası bir araya geldiği zaman bu iki kurallar bütünüünün birbirleri ile nasıl bağdaşacağıdır. Bohr ikna edici bir şekilde bu soruların sınırların ötesinde

olduğunu söylerken, gerçeği söylemek gerekirse, bunların herhangi birinin cevaplayabileceği soruların sınırlarının ötesinde olduğunu öne sürüyordu. Kuram bunları göz önüne bile almadan olağanüstü kesinlikte tahminler yapabildiği için, böyle konular uzun bir zaman süresince fizikçilerin cevaplaması gereken kritik sorular listesinin çok alt sıralarında yer aldı.

Yine de kuantum mekaniğini tam olarak anlamak, gerçeklik hakkında ne söylediğini belirlemek ve zamanın okuna bir yön vermede oynayabileceği rolü saptamak için kuantum ölçüm problemi ile boğuşmak zorundayız.

Önümüzdeki iki alt bölümde bu amaçla yapılmış en önemli ve Umut verici girişimlerden bazılarından söz edeceğiz. Eğer herhangi bir noktada kuantum mekaniği ve zamanın oku konusuna odaklanan son alt bölüme doğrudan atlamak isterseniz, sonuç şu ki, kuantum ölçüm problemi üzerinde harcanan zekice çabaların çoğu önemli gelişmeler sağlamış olmakla birlikte, geniş kabul gören bir çözüm hâlâ ulaşımımızın ötesinde gibi duruyor. Birçokları buna kuantum yasasının formüle edilişindeki tek ve en önemli eksik gözüyle bakıyorlar.

Gerçeklik ve Kuantum Ölçüm Problemi

Yıllar boyunca kuantum ölçüm probleminin çözümü için pek çok öneri ortaya atıldı. Gariptir, bunlar farklı gerçeklik kavramlarına yol açmalarına rağmen -bazıları kökten farklı- konu deney sonucunda araştırmacının ne ölçeceğini tahmin etmeye gelince hepsi fikir birliği içindedir ve her biri bir büyü gibi çalışır. Her öneri aynı gösteriyi sunar ama sahne gerisine bir göz attığınızda her birinde çalışma tarzının önemli biçimde farklı olduğunu görürsünüz.

Sahnelenen oyuna gelince, kıyıda köşede ne olduğuyla pek ilgilenmezsiniz, yalnızca ürüne odaklanmayı yeterli bulursunuz. Ama iş evreni anlamaya gelince, bütün perdeleri çekip, kapıları açıp gerçekliğin en derin işleyişini ortaya koyma yönünde doymak bilmez bir acelecilik vardır. Bohr bu aceleciliği temelsiz ve yanlış yönlendirilmiş buluyordu. Ona göre gerçeklik oyunun

kendisiydi. Bir Spalding Gray monologu gibi, bütün gösteri bir deneycinin çıplak ölçümleridir. Başka bir şey yoktur. Bohr'a göre sahne gerisi yoktur. Bir dalga fonksiyonunun olasılıkların biri dışındakilerden nasıl, ne zaman ve neden vazgeçip ölçüm aygıtında tek bir belirli rakamı ürettiğini çözümlemeye çalışmak, asıl noktayı gözden kaçırmaktır. Dikkate değer tek şey, ölçülen rakamın kendisidir. On yıllar boyunca bu perspektif hüküm sürdü. Bununla birlikte, bu perspektifin aklın kuantum kuramıyla uğraşması üzerindeki sakinleştirici etkisine rağmen, insan kendini, kuantum mekaniğinin olağanüstü tahmin gücünün, evrenin işleyişinin altında yatan gizli gerçekliği ortaya çıkardığını düşünmekten alıkoyamıyor, insan, daha ileri gidip, kuantum mekaniğinin insanların yaşadıklarıyla nasıl bağdaştığını, dalga fonksiyonu ile gözlem arasındaki boşluğu nasıl doldurduğunu ve gözlemlerin altında hangi gizli gerçeğin yattığını anlamak istiyor. Yıllar boyunca birkaç araştırmacı bu işe girişti; şimdi onların geliştirdiği bazı önerileri görelim.

Kökleri Heisenberg'e kadar giden bir yaklaşım, dalga fonksiyonlarının kuantum gerçeğinin nesnel öğeleri olduğu perspektifini terk ederek bunları yalnızca gerçeklik konusunda bildiklerimizin somutlaşması olarak ele almaktır. Bir ölçüm yapmadan önce, elektronun nerede olduğunu bilmeyiz, bu bakış açısına göre elektronun konumu konusundaki bilgisizliğimiz, elektronun dalga fonksiyonunun onu, olasılıkla çeşitli yerlerde bulunuyor olarak tanımlamasıyla yansıtılır. Konumunu ölçtüğümüz anda ise elektronun yeri konusundaki bilgilerimiz aniden değişir: Artık elektronun konumunu ilke olarak tam bir kesinlikle biliyoruzdur. (Belirsizlik ilkesi gereğince eğer konumunu tam olarak biliyorsak, hızı hakkında hiçbir şey bilmiyoruzdur ama bunun şu andaki tartışmamızla bir ilgisi yok.) Bu perspektife göre, bilgilerimizdeki bu ani değişiklik, elektronun dalga fonksiyonunda ani bir değişiklik olarak yansır: Aniden çökerek Şekil 4.7'deki sivrilmiş şeklini alır ki bu da elektronun konumunu kesin bir şekilde bildiğimizi gösterir. O zaman, bu yaklaşımda dalga fonksiyonunun ani çöküşü şaşırtıcı değildir: Hepimizin yeni

bir şey öğrendiğimizde bilgimizde ortaya çıkan ani değişiklikten başka bir şey değildir.

1957'de Wheeler'in öğrencisi olan Hugh Everett tarafından ortaya konulan ikinci yaklaşım, dalga fonksiyonlarının çöktüğünü reddeder. Dalga fonksiyonunun somutlaştırdığı her potansiyel sonuç gün ışığını görür ama her birinin gördüğü gün ışığı kendi ayrı evrenine akar. *Birçok Dünya yorumu* adı verilen bu yaklaşımda "evren" kavramı sayısız "paralel evrenleri" -evrenimizin sayısız değişik biçimi- kapsayacak şekilde genişletilmiştir öyle ki, kuantum mekaniğinin *olabileceğini* tahmin ettiği herhangi bir şey, çok küçük bir olasılıkla da olsa, bu kopya evrenlerin en azından birinde *gerçekleşir*. Eğer bir dalga fonksiyonu bir elektronun burada, orada veya çok uzakta olabileceğini söylüyorsa, o zaman, bu evrenlerin birinde sizin değişik bir biçiminiz elektronu burada; evrenin bir başka kopyasında başka bir siz elektronu orada; ve üçüncü bir evrende bir başka siz elektronu çok uzakta bulacaksınız. Bu yüzden, her birimizin bir andan diğerine yaptığımız gözlemler dizisi, her birinde sizin, benim ve belirli gözlemlerin belirli sonuçlara yol açtığı bir evrende yaşayan herkesin kopyalarının bulunduğu bu devasa, sayısız evrenler ağıının bir bölümünde ortaya çıkan gerçekliği yansıtır. Böyle evrenlerin birinde siz şu anda bu kelimeleri okuyorsunuz, bir diğerinde internette dolaşmak için okumanıza ara veriyorsunuz, başka bir evrendeyse küçük bir rolünüzün olduğu bir Broadway gösterisinde endişe içinde perdenin açılmasını bekliyorsunuz. Sanki Şekil 5.1 deki gibi tek bir uzay-zaman bloğu yokmuş da, her birinde olası olayların gerçekleştiği sonsuz sayıda uzay-zaman bloğu varmış gibi görünüyor. Bu durumda, birçok dünya yaklaşımında hiçbir potansiyel sonuç yalnızca potansiyel olarak kalmaz. Dalga fonksiyonları çökmezler. Her potansiyel sonuç paralel evrenlerin birinde ortaya çıkar.

1950'lerde David Bohm'un -Bölüm 4'te Einstein-Podolsky-Rosen paradoksunu incelerken söz ettiğimiz fizikçi- geliştirdiği üçüncü öneri tümüyle farklı bir yaklaşımı benimser.⁸ Böhm, elektron gibi parçacıkların, klasik fizikte olduğu gibi ve tam da

Einstein'ın umduğu gibi, kesin konumlara ve kesin hızlara sahip olduklarını öne sürmektedir. Ama belirsizlik ilkesiyle uyum sağlamak için bu özellikler ortalıkta gözükmezler; bunlar Bölüm 4'te sözü edilen *gizli değişkenlerin* örnekleridir, ikisini birden aynı anda belirleyemezsiniz. Bohm için böyle bir belirsizlik, bilebildiklerimizin sınırını gösterirdi, parçacıkların kendilerinin gerçek nitelikleri hakkında hiçbir şey ima etmezdi. Onun yaklaşımı Bell'in sonuçlarıyla ters düşmezdi, çünkü Bölüm 4'tin sonlarına doğru incelediğimiz gibi, kuantum belirsizliğince yasaklanan belirli özellikler *dışlanmıyordu*, yalnızca yerellik dışlanıyordu ve Bohm'un yaklaşımı yerel *değildi*." Bunun yerine Bohm, bir parçacığın dalga fonksiyonunun, *gerçekliğin bir diğeri, başka ögesi, parçacığın kendisine ek olarak* var olan bir ögesi olduğunu düşünüyordu. Bohm'a göre parçacıklar veya dalgalar değil, Bohr'un tamamlayıcılık felsefesindeki gibi parçacıklar *ve* dalgalar vardı. Üstelik Bohm, parçacığın dalga fonksiyonunun parçacığın kendisiyle etkileştiğini -parçacığı "yönlendirdiğini" veya "itelediğini"- bir anlamda sonraki hareketini belirlediğini öne sürüyordu. Bu yaklaşım standart kuantum mekaniğinin başarılı tahminleriyle tam olarak uyum içinde olsa da Bohm, bir konumdaki dalga fonksiyonundaki değişikliklerin parçacığı ani bir biçimde uzak bir konuma iteleyeceğini buldu; bu da onun yaklaşımının yerel olmayışını açıkça gösteriyordu. Örneğin çift yarık deneyinde her parçacık ya bir yarıktan ya da diğerinden geçerken onun dalga fonksiyonları her iki yarıktan birden geçerek girişim sergiler. Dalga fonksiyonu parçacığın hareketini yönlendirdiği için, denklemlerin, parçacığın Şekil 4.4'teki verileri açıklayacak biçimde, ekrana çarpma olasılığının dalga fonksiyonu değerinin büyük olduğu yerde büyük, küçük olduğu yerdeyse küçük olduğunu göstermesinin büyük bir sürpriz olmaması gerekir. Bohm'un yaklaşımında dalga fonksiyonunun ayrı bir çökme aşaması yoktur, çünkü eğer parçacığın konumunu ölçmüş ve *burada* bulmuşsanız, burası ölçümün yapılmasından bir an önce parçacığın gerçekten bulunduğu yerdir.

Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini ve Tulio Weber adlı italyan fizikçiler tarafından sergilenen dördüncü bir yaklaşımda, Schrödinger denklemini tek tek parçacıkların dalga fonksiyonları üzerinde hemen hemen hiç etkisi olmayacak ama gündelik, "büyük" cisimlere uygulandığında önemli etkileri olacak şekilde zekice değiştirmek üzere cesur bir atılım yapılmaktadır. Önerilen değişiklik dalga fonksiyonlarının doğal olarak kararsız olduğunu, herhangi bir girişim olmasa da her dalga fonksiyonunun er geç çökerek sivri bir şekil alacağını varsayar. Ghiardi, Rimini ve Weber, tek bir parçacığın dalga fonksiyonunun ortalama olarak her bir milyar yılda bir kendiliğinden, rasgele bir biçimde çökeceğini öne sürdüler.¹⁰ Bu olay o kadar az görülür ki, parçacıkların her zamanki kuantum mekaniğine özgü tanımlarında hemen hemen hiç değişikliğe neden olmaz ve kuantum mekaniği mikro dünyayı daha önce elde edilememiş bir doğrulukla betimlediği için bu iyi bir şeydir. Ama milyarlarca ve milyarlarca parçacıktan oluşan deneyciler ve onların araçları gibi büyük cisimlerde, verilen bir saniyenin küçük bir bölümünde kendiliğinden bir çökmenin en azından bir bileşen parçacığı yok etine, onun dalga fonksiyonunu çöktürme olasılığı yüksektir. Ghiardi, Rimini, Weber ve diğerleri tarafından öne sürüldüğü gibi, büyük bir cisimdeki bütün dalga fonksiyonlarının dolanık yapısı, bu çökmenin bir tür kuantum domino etkisi yaratarak cismi oluşturan bütün parçacıkların dalga fonksiyonlarını çöktürmesini garantiler. Bu, saniyenin küçük bir kesrinde olup biterken, önerilen değişimse büyük cisimlerin temel olarak her zaman belirli bir konumda kalmalarını garanti altına alır: Ölçüm aletlerindeki ibreler her zaman belirli bir değeri gösterirler; Ay gökyüzünde her zaman belirli bir konumdadır; deneycilerin beyinleri daima belirli bir şey yaşar; kediler her zaman ya canlı ya da ölüdürler.

Bu yaklaşımların her birini ve burada söz etmeyeceğim diğerlerini destekleyenler ve eleştirenler vardır. "Bilgi olarak dalga fonksiyonu" yaklaşımı dalga fonksiyonu çökmesi konusunda bir tür kurnazlığa başvurarak dalga fonksiyonlarının gerçekliği-

ni reddeder ve onları yalnızca bildiklerimizin tarifine dönüştürür. Ama eleştirenlerden biri şunu sorar: Neden temel fiziğin insan farkındalığı ile bu kadar yakın ilişkili olması gereksin? Eğer biz dünyayı gözlemek üzere burada olmasaydık dalga fonksiyonları hiçbir zaman çökmez miydi ya da dalga fonksiyonu kavramı var olmaz mıydı? Yeryüzü gezegeninde insan bilinci evrimeden önce evren çok farklı bir yer miydi? İnsan deneycilerin yerine gözlemci olarak yalnızca karıncalar, fareler, amipler veya bilgisayarlar bulunsaydı ne olurdu? Onların "bilgilerindeki" değişim dalga fonksiyonlarının çökmesiyle bağlantılı olmak için yeterli olur muydu?"

Tersine, birçok dünya yorumu, bu yaklaşımda dalga fonksiyonları çökmediği için, dalga fonksiyonunun çökmesi olayından tümüyle kaçınır. Ama ödenecek bedel evrenlerin aşırı çoğalmasındır ki, eleştirenlerin çoğu bunu fazla abartılı bulmuştur.¹² Bohm'un yaklaşımı da dalga fonksiyonu çökmesinden kaçınır; ama bu yaklaşımda hem parçacıklara hem de dalgalara bağımsız gerçeklik atfedildiği için eleştirenler bu kuramın ekonomik olmadığını öne sürmüşlerdir. Üstelik, eleştirenler doğru bir biçimde Bohm'un formülleştirmesinde dalga fonksiyonunun ittiği parçacıklarla ışıktan-hızlı bir şekilde etkileşebildiklerini iddia etmektedirler. Destekleyenlerse ilk şikâyetin en iyi olasılıkla nesnel olmadığını, ikincisininse Bell'in kaçınılmasının mümkün olmadığını kanıtladığı yerel olmayışa uyduğundan her iki eleştirinin de ikna edici olmadığına dikkat çekiyorlar. Bununla birlikte, belki de mazur görülemez bir şekilde, Bohm'un yaklaşımı hiçbir zaman rağbet görmedi.¹³ Ghirardi-Rimini-Weber yaklaşımı dalga fonksiyonunun çökmesiyle doğrudan ilgilenir ve bunun için denklemleri yeni bir kendiliğinden çökme mekanizmasını içerecek şekilde değiştirir. Ama eleştirenler henüz Schrödinger denkleminde önerilen değişikliği destekleyen en küçük bir deneysel kanıt bulunmadığına dikkat çekiyorlar.

Kuantum mekaniği formülleri ile gerçek hayatta yaşananlar arasında sağlam ve tümüyle saydam bir ilişki bulmak isteyen araştırmacılar, hiç kuşkusuz bu çabalarını gelecekte de bir sü-

re daha sürdüreceklendir ama bilinen yaklaşımlardan hangisinin sonunda genel kabul göreceğini söylemek zordur. Eğer şimdi fizikçiler arasında bir anket yapılırsa, çok oyalan bir favorinin olacağını sanmıyorum. Ne yazık ki bu konuda deneysel girdilerin de yardımı sınırlı. Ghirardi-Rimini-Weber önerisi bazı durumlarda standart aşama bir/aşama iki kuantum mekaniğinden farklı olabilen tahminlerde bulunur; sapmalar günümüzün teknolojisiyle ölçülemeyecek kadar küçüktür. Diğer üç önerinin durumu daha da kötüdür çünkü deneysel hükümler karşısında daha kesin bir biçimde hareketsiz kalmışlardır. Standart yaklaşımla tam bir uyum içinde olduklarından, her biri gözlenebilecek veya ölçülebilecek şeyler konusunda aynı tahminlerde bulunurlar. Yalnızca sahne gerisinde olup bitenler konusunda farklılaşırlar. Yani kuantum mekaniğinin, gerçekliğin doğasının altında neyin yattığını ima ettiği konusunda farklılıklar sergilerler.

Kuantum mekaniği ölçüm problemi çözülmemiş olarak kalmış olsa da, son yirmi-otuz yıldır, henüz tamamlanmış olmasa bile, uygulanabilir herhangi bir çözümün parçası olabileceği yaygın olarak destek gören bir yapı gelişme aşamasındadır. Bu yapının adı *dağınım* dır (durgun dalga yapısının çevre ile etkileşmeler yüzünden bozulması yani 'decoherence').

Dağınım ve Kuantum Gerçekliği

Kuantum mekaniğinin olasılıkçı yanıyla ilk defa karşılaştığınızda ilk doğal tepki, yazı-tura atarken veya rulet çevirirken ortaya çıkan olasılıklardan daha yabancıl (egzotik) olmadığını düşünmektir. Ama kuantum girişimini öğrendiğiniz zaman, olasılığın kuantum mekaniğine çok daha temel bir şekilde girdiğini kavrarınız. Gündelik örneklerdeki çeşitli sonuçlar -yazı mı tura mı, kırmızı mı siyah mı, bir piyango numarası mı diğeri mi- bir sonucun veya diğerrinin mutlaka ortaya çıkacağı ve her sonucun bağımsız, farklı bir geçmişin ürünü olduğu kavrayışıyla ayrılmış sonuçlardır. Yazı-tura atıldığında paranın havada dönmesi bazen yazı gelmesine bazen de tura gelmesine yeterli olacak miktarlarda olur. Her sonuca atfettiğimiz 50-50 olasılık yalnızca or-

taya çıkan sonuca -yazı mı, tura mı- değil, her sonuca yol açan geçmişlere de ilişkindir. Yazı-tura atışlarının olası sonuçlarının yarısı yazı, yarısı tura olur. Geçmişlerin kendileri ise tümünden ayrı, yalıtılmış seçeneklerdir. Paranın farklı hareketlerinin birbirlerinin desteklemeleri veya yok etmelerinin bir anlamı yoktur. Tümüyle bağımsızdırlar.

Ama kuantum mekaniğinde işler farklıdır. Bir elektronun çift yarıktan detektöre kadar izleyebileceği seçenek yollar ayrı, yalıtılmış geçmişler değildir. Olası geçmişler etkileşerek gözlenen sonucu üretirler. Bazı yollar diğerini destekler, bazı yollar diğerleri tarafından yok edilir. Çeşitli olası geçmişler arasındaki böyle kuantum girişimi detektör ekranındaki karanlık ve aydınlık şeritlerden oluşan desenin nedenidir. Bu yüzden, *kuantum ve klasik olasılık kavramları arasındaki lark, birincinin girişim sergilemesi, ikincinin ise sergilememesidir.*

Dağınım küçük şeylerin kuantum fiziğiyle o kadar da küçük olmayan şeylerin klasik fiziği arasında kuantum girişimini bastırarak -yani klasik ve kuantum olasılıkları arasındaki temel farkı ani bir biçimde yok ederek- bir köprü oluşturan, yaygın bir kavramdır. Dağınımın önemi kuantum kuramının ilk zamanlarında anlaşılmış ama ortaya yeniden çıkışı 1970'te Alman fizikçi Dieter Zeh'in özgün makalesiyle¹ olmuş ve o zamandan beri aralarında gene Alman olan Erich Joos ve New Mexico'daki Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndan Wojciech Zurek'in de bulunduğu pek çok araştırmacı tarafından geliştirilmektedir.

Fikir şudur: Schrödinger denklemi iki yarıklı bir perdeden geçen tek tek ve yalıtılmış fotonlar gibi basit bir duruma uygulandığı zaman, ünlü girişim desenine yol açar. Ama bu laboratuvar örneğinin gerçek dünyada olup bitenlerin karakteristiği olmayan iki çok özel niteliği vardır. Birincisi, gündelik hayatta karşılaştığımız şeyler daha büyük ve tek bir fotondan daha karmaşıktır. İkincisi, gündelik hayatta karşılaştığımız şeyler yalıtılmış değildir: Bizimle ve çevreyle etkileşirler. Şu anda elinizdeki kitaba bir insan dokunmakta ve çok daha genel olarak kitaba sürekli olarak fotonlar ve hava molekülleri çarpmaktadır.

Üstelik kitabın kendisi de birçok molekül ve atomdan yapıldığı için, sürekli hareket halinde olan bu bileşenler birbirleri ile de etkileşmektedirler. Aynı şeyler ölçü aletlerinin göstergeleri, kediler, insan beyinleri ve gündelik hayatta karşılaştığınız her şey için de doğrudur. Astrofiziksel ölçeklerde Dünya, Ay, asteroidler ve diğer gezegenler, Güneş'ten gelen fotonlarla bombardıman ediliyor. Uzayın karanlık derinliklerindeki bir toz parçasına bile, Büyük Patlama'nın hemen ertesinde akmaya başlayan düşük-enerjili mikrodalga fotonları sürekli olarak çarpıyor. Bu nedenle, kuantum mekaniğinin ilk laboratuvar deneylerinin tersine, gerçek dünyada olup bitenler konusunda ne söylediğini anlamak için, Schrödinger denklemini böyle daha karmaşık durumlara uygulamamız gerekir.

Özet olarak, Zeh'in vurguladığı buydu ve onun çalışması, arından gelen diğerlerinin çalışmaları ile birlikte, harikulade bir şeyi ortaya çıkardı. Her ne kadar fotonlar ve hava molekülleri kitap veya kedi gibi büyük cisimler üzerinde önemli bir etkiye sahip olamayacak kadar küçük olsalar da başka bir şey yapabilirler. Büyük cismin dalga fonksiyonunu "dürterler" veya fizik dilinde onun durağanlığını bozup dağınımına yol açarlar: Birbirini izleyen tepe, çukur, tepe dizisinin sırasını bulanıklaştırırlar. Bu kritiktir, çünkü bir dalga fonksiyonunun düzenliliği, girişim etkileri üretmesi açısından çok önemlidir (Şekil 4.2'ye bakınız). Bu yüzden tıpkı çift yarık deneyinde etiketleme aygıtlarının eklenmesinin sonuçtaki dalga fonksiyonunu bulanıklaştırarak girişim etkilerini yok etmesi gibi, cisimlerin de çevrelerini oluşturan bileşenler tarafından sürekli olarak bombardıman edilmesi, girişim olayı gözlenmesi olasılığını yok eder. Kuantum girişimi olasılığı bir kere ortadan kalktığında, kuantum mekaniğinde yapısal olarak var olan olasılıklar, bütün pratik amaçlar için, yazıtura atışlarında veya rulette yapısal olarak var olan olasılıklar gibidir. Bir kere çevresel dağılma dalga fonksiyonunu bulanıklaştırdığında kuantum olasılıklarının egzotik doğası, gündelik hayatın daha yakından tanıdığımız olasılıklarına dönüşür.¹⁵ Bu da kuantum ölçüm problemine bir çözüm önerir; öyle ki, bu çözüm

eğer gerçekleşirse, bekleyebileceğimiz en iyi şeydir. Bunu önce en iyimser bakış açısı altında tanımlayacağım ve sonra da hâlâ nelerin yapılması gerektiğini vurgulayacağım.

Eğer yalıtılmış bir elektronun dalga fonksiyonu, diyelim yüzde 50 burada, yüzde 50 orada olma olasılığı gösteriyorsa, bu olasılıkları kuantum mekaniğinin tuhaflığını kullanarak yorumlamamız gerekir. Seçeneklerden ikisi de kendilerini etkileşerek ve girişim deseni ortaya koyarak gösterebilecekleri için, ikisini de eşit derecede gerçek olarak düşünmeliyiz. Serbest bir dille söylersek, elektronun her iki konumda birden *bulunmasında* bir anlam vardır. Eğer şimdi elektronun konumunu yalıtılmamış, gündelik boyutlardaki laboratuvar araçlarıyla ölçersek ne olur? Elektronun kuşkulu yeriyle ilgili olarak, ölçüm aracının ibresinin bu değeri gösterme olasılığı yüzde 50, şu değeri gösterme olasılığı yüzde 50'dir. Ama dağılma nedeniyle gösterge, her iki değer in hayaletimsi bir karışımını gösterme durumunda *olmayacaktır*; dağılma nedeniyle *bu* olasılıkları normal, klasik, gündelik anlamlarıyla yorumlayabiliriz. Tıpkı bir paranın havaya fırlatıldığında yüzde elli yazı ve yüzde elli tura gelme olasılığı olduğu halde yere düştüğünde *ya* yazı *ya da* tura gelmesi gibi, göstergenin de yüzde 50 bu değeri ve yüzde 50 şu değeri gösterme olasılığı vardır ama gösterge kesinlikle *ya* bir değeri, *ya da* diğerini gösterecektir.

Bütün diğer karmaşık, yalıtılmış olmayan cisimlere de benzer bir düşünüş mantığı uygulanabilir. Eğer bir kuantum hesaplaması kapalı bir kutuda oturmakta olan bir kedinin yüzde 50 canlı, yüzde 50 ölü olacağını ortaya koyuyorsa -çünkü bir elektron yüzde 50 olasılıkla bir bubi tuzağını tetikleyerek kediye zehirli gaz verecektir, yüzde 50 olasılıkla ise elektron hedefine isabet etmeyecek ve bubi tuzağını tetiklemeyecektir- dağılma kedinin hem ölü hem de canlı olmanın anlamsız bir karışımında *olmayacağı*m söyler. Her ne kadar on yıllar boyunca "Bir kedi için hem canlı, hem de ölü olmak ne anlama gelir?", "Kutuyu açarak kediyi gözleme eylemi onu seçeneklerden birini seçmeye, canlı ya da ölü olmaya nasıl zorlar?" gibi konularda sıcak tartışma-

lar sürdüyse de, dağılma siz kutuyu açmadan çok önce, çevrenin hemen hemen sıfır zamanda milyarlarca gözlemi tamamlayarak bütün gizemli kuantum olasılıklarını daha az gizemli klasik olasılıklara dönüştürdüğünü söyler. Siz ona bakmadan çok önce çevre kediye belirli, tek bir durumu almaya zorlamıştır. Dağınıklık, çevreden çarpan sayısız parçacık kuantum tuhaflığını parça parça uzaklaştırdığı için, kuantum acayipliklerini büyük cisimlerden dışarı "sızmaya" zorlar.

Kuantum ölçüm problemine daha tatmin edici bir çözüm bulunacağını düşünmek zordur. Daha gerçekçi olarak ve çevreyi gözardı eden basitleştirici varsayımdan vazgeçerek -ki bu basitleştirme kuantum alanının ilk yıllardaki gelişmesi için hayati bir öneme sahipti- kuantum mekaniğinin yapısal bir çözümü olduğunu görürüz. İnsan bilinci, insan deneyçiler ve insan gözlemleri artık özel bir rol oynamazlar çünkü bunlar (biz!) hava molekülleri ve fotonlar gibi, verilen bir fiziksel sistemle etkileşen, çevreye ait öğeler olurlar. Cisimlerin evrimi ve onu ölçen deneyci arasında da artık aşama 1/aşama 2 ayrımı olmaz. Her şey -gözlenen ve gözleyen- eşit durumdadır. Her şey -gözlenen ve gözleyen- kesinlikle Schrödinger denkleminde verilen aynı kuantum mekaniği yasalarına tabi olur. Ölçüm eylemi artık özel değildir; bu eylem yalnızca çevreyle temasın özel bir örneğidir.

Hepsi bu mu? Dağınım kuantum ölçüm problemini çözüyor mu? Dalga fonksiyonlarının, yol açabilecekleri potansiyel sonuçlardan biri dışında diğerlerine kapıyı kapatmasının sorumlusu dağınım mı? Bazıları öyle düşünüyor. Carnegie Mellon'dan Robert Griffiths; Orsay'dan Roland Omnes; Sanla Fe Enstitüsü'nden nobel ödüllü Murray Gell-Mann; Sanla Barbara'daki Kaliforniya Üniversitesi'nden Jim Hartle gibi araştırmacılar büyük ilerleme kaydederek dağınımı kuantum ölçüm problemini çözen, bütüncül bir yapı (*tutarlı olmayan geçmişler* adı verilen) olarak geliştirdiklerini öne sürdüler. Benim gibi diğerlerinin de merakı uyandı ama henüz tam olarak ikna olmadılar. Gördüğünüz gibi dağınımın gücü, Bohr'un büyük ve küçük sistemler arasına diktiği yapay duvarı başarılı bir şekil-

de yok ederek her şeyin aynı kuantum mekaniksel yasalara tabi olmasını sağlamasıdır. Bu önemli gelişmeyi sanırım Bohr da memnunluk verici bulurdu. Her ne kadar çözülmemiş olan kuantum mekaniği ölçüm problemi fizikçilerin kuramsal hesaplamaları deneysel verilerle bağdaştırma yeteneklerini azaltmamış olsa da, Bohr ve arkadaşlarının, bazı sıkıntılı özellikleri olmakla birlikte son derece anlaşılır olan, kuantum mekaniğine özgü bir yapı geliştirmelerine yol açtı. Birçokları bu yapının dalga fonksiyonu çökmesi hakkındaki bulanık sözlerini veya klasik fiziğin alanına giren "büyük" sistemler kavramının kesin olmayışını sinir bozucu bulur. Dağınımı göz önüne alan araştırmacılar için böylesi muğlak fikirler büyük ölçüde gereksizdir.

Bununla birlikte, yukarıdaki tanımda kenarından geçip gittiğim temel bir konu, dağınım kuantum girişimini bastırarak tuhaf kuantum olasılıklarını daha tanıdık klasik olasılıklara dönüştürse de *dalga fonksiyonunda somutlaşan potansiyel sonuçların her birinin hâlâ gerçekleşmek için diğerleriyle yarışmakta olduğunu*. Bu yüzden biz de hâlâ pek çok diğer olasılık "giderken" birinin nasıl olup dil "kazandığını" merak ederiz. Yazı-tura atıldığı zaman klasik fizik benzer bir soruya cevap verir. Klasik fizik, eğer paranın havadaki dönüşünü yeterince duyarlılıkla incelemişsek, ilke olarak, para yere düştüğünde yazı mı yoksa tura mı geleceğini *belirleyebileceğimizi söyler*. O zaman, daha yakından bakarsak, başlangıçta gözden kaçırdığımız ayrıntılar sonucu kesin olarak belirler. Aynı şey kuantum fiziğinde söylenemez. Tutarsızlık kuantum olasılıklarının klasik olasılıklar gibi yorumlanmalarına izin verir ama pek çok olasılıktan birinin gerçekleşmek üzere nasıl seçileceğinin ayrıntılarını vermez. Bohr'un düşündüğü gibi, bazı fizikçiler tek bir belirli sonucun nasıl ortaya çıktığını açıklamaya çalışmanın yanlış yola sapma olduğuna inanırlar. Bu fizikçiler, dağınımayı da kapsayacak şekilde güncellenmiş olan kuantum mekaniğinin, hesaplamaları laboratuvar ölçüm aygıtlarının davranışını açıklayan, keskin bir biçimde formüleleştirilmiş bir kuram olduğunu öne sürerler. Bu bakış açısına göre, bilimin amacı budur. *Neyin olup bittiğine ilişkin bir açık-*

lama bulabilmek, özel bir sonucun nasıl ortaya çıktığını anlayabilmek, *bilgisayar çıktılarının ve detektörlerin okuduğu değerlenil ötesindeki gerçeklik* düzeyini yakalamak mantıksız bir entelektüel açgözlülüğün ifadesidir.

Aralarında benim de bulunduğum birçokları ise farklı bir bakış açısına sahiptir. Verileri açıklamak bilimin görevidir. Ama birçok fizikçi bilimin verilerin desteklediği kuramlardan yararlanmak ve daha da öteye giderek, bunları kullanarak gerçekliğin doğasına ilişkin mümkün olan en çok bilgiyi elde etmek olduğuna inanıyorlar. Benimse ölçüm probleminin tam bir çözümüne ulaşmaya çalışarak kazanılacak bir kavrayış olduğuna ilişkin güçlü kuşkuvarım var.

Bu yüzden, her ne kadar çevreyi de kapsayan dağılmanın kuantum-klasik ayrımını ortadan kaldıran yapının hayati bir parçası olduğu yönünde yaygın bir uzlaş varsa ve pek çok kimse bu fikirlerin günün birinde ikisi arasında tam ve ikna edici bir bağlantı oluşturacağı konusunda umutluysa da, bu köprünün bugün tam olarak inşa edilmiş olduğu konusunda henüz çoğu kimse ikna olmuş değildir.

Kuantum Mekanikliği ve Zamanın Oku

O zaman, ölçüm probleminin neresindeyiz ve bunun zamanın oku için anlamı nedir? Genel olarak, gündelik yaşananları kuantum gerçekliğine bağlamayı hedefleyen iki grup öneri vardır, ilk grupta (örneğin bilgi olarak dalga fonksiyonu; birçok dünya; dağınım) Schrödinger denklemi öykünün her şeyidir; öneriler denklemlerin fiziksel gerçeklik konusunda ne anlama geldiğini yorumlamanın değişik yollarını sağlarlar. İkinci grupta (örneğin Bohm; Ghirardi-Rimini-Weber), Schrödinger denklemi başka denklemlerle tamamlanmalı (Bohm'un yorumunda dalga fonksiyonlarının parçacıkları nasıl itelediğini gösteren denklem) veya değiştirilmelidir (Ghirardi-Rimini-Weber yorumunda yeni ve açık bir çökme mekanizmasının işin içine katılması). Zaman okuna olan etkinin belirlenmesi için hayati önemi olan soru, bu önerilerin zamanın bir yönüyle diğeri arasında temel bir asimetri

getirip getirmediğidir. Schrödinger denkleminin tıpkı Newton, Maxwell ve Einstein'ın denklemleri gibi zamanda ileri ve geri yönlerini eşit olarak ele aldığını hatırlayın. Schrödinger denkleminin zamanda evrim yönünü gösteren bir oku yoktur. Önerilerden herhangi biri acaba bunu değiştiriyor mu?

İlk grup önerilerde Schrödinger yapısı hiç değiştirilmez, bu nedenle zaman simetrisi korunur, ikinci grupta ise ayrıntılara bağlı olarak zaman simetrisi kalabilir veya kalmayabilir. Örneğin, Bohm'un yaklaşımında, önerilen yeni denklem gelecek zamanı ve geçmiş zamanı eşit olarak ele aldığından, bir asimetri ortaya çıkmaz. Ama Ghirardi, Rimini ve Weber'in önerisi, zamansal yönü *olan* bir çökme mekanizması getirir; "sivri bir durumdan yayvan bir duruma giden, "çökmeyi geri alan" bir dalga fonksiyonu, değiştirilmiş olan denklemlerle uyum sağlamaz. Bu nedenle, öneriye bağlı olarak, kuantum ölçüm probleminin çözümüyle birlikte kuantum mekaniği, zamanın her iki yönünü de eşit bir biçimde ele almayı sürdürebilir veya sürdürmeyebilir. Şimdi her olasılığın ima ettiği sonuçlara bir göz atalım.

Eğer zaman simetrisi devam ederse (ki edeceğinden kuşkuluyum), geçen bölümdeki düşünüş mantığı ve sonuçların tamamı küçük değişikliklerle kuantum dünyasına taşınabilir. Zamanın oku tartışmamıza giren çekirdek fizik, klasik fiziğin zaman tersinmesi simetrisidir. Kuantum fiziğinin yapısı ve temel dili klasik fiziğinkinden bu kadar farklı iken -konum ve hızlar yerine dalga fonksiyonları; Newton yasaları yerine Schrödinger denklemleri- kuantum denklemlerinin zaman tersinmesi simetrisi zamanın okunun ele alınış biçiminin değişmeyeceğini garantiler. Parçacıkları onların dalga fonksiyonları cinsinden tanımladığımız sürece, kuantum dünyasındaki entropi, klasik fizikteki gibi tanımlanabilir. Entropinin sürekli olarak artması gerektiği sonucu -hem gelecek, hem de geçmiş adını verdiğimiz yöne doğru artması- geçerliliğini koruyacaktır.

Böylece yeniden Bölüm 6'da karşılaştığımız aynı bilmeceye geldik. Eğer dünyaya ilişkin şu andaki gözlemlerimizi veri ve inkar edilemeyecek kadar gerçek olarak kabul edersek ve eğer

entropi hem geleceğe hem de geçmişe doğru artmak zorunda ise, dünyanın bu şekilde nasıl var olduğunu ve nasıl evrileceğini nasıl açıklarız? Ve aynı iki olasılık yeniden ortaya çıkacaktır: Ya gördüğümüz her şey zamanın büyük çoğunluğunu tamamen düzensiz olarak geçirmiş olan, sonsuz bir evrende ara sıra beklenilecek istatistiksel bir dalgalanmayla ansızın ortaya çıkmış, ya da bir nedenle, Büyük Patlama dan hemen sonra son derece düşük olan entropi son 14 milyar yıldır yavaş yavaş artmış ve gelecekte de artışıını sürdürecektir olabilir. Bölüm 6'da olduğu gibi, hafızalarımıza, kayıtlara ve fizik yasalarına güvenmemiz durumundan kaçınmak için, ikinci seçeneğe -düşük-entropili patlama- odaklanıyor ve her şeyin neden ve nasıl olup da böylesine özel bir durumda başladığına bir açıklama arıyoruz.

Diğer yandan, eğer zaman simetrisi kaybolursa -eğer ölçüm probleminin bir gün kabul edilen çözümü kuantum mekaniğinin içinde gelecek ve geçmişi temel olarak asimetric olarak ele almayı başlarsa- bu, zamanın okuna en basit çözümü ortaya koyabilir. Örneğin yumurtaların kırılmalarının ama asla kendiliğinden yapışmamlarının, klasik fizik yasalarında bulduğumuzun tersine, kırılmanın bütün kuantum denklemlerini çözmesi, yapışmanın ise çözmemesi olduğunu gösterebilir. Kırılan bir yumurtanın tersine oynatılan filmi gerçek hayatta olmayacak bir hareketi temsil eder ki bu da böyle bir olayı neden hiçbir zaman gözlemediğimizi açıklar. Durum bu kadar açıktır.

Mümkündür. Ama bu dünya zaman okuna çok farklı bir açıklama sağlıyor gibi görünüyorsa da, gerçekte görüldüğü kadar laikli olmayabilir. Bölüm 6'da vurguladığımız gibi, *Savaş ve Barış'ın* sayfalarının gittikçe düzensiz hale gelmesi için düzenli olarak başlamaları gerekir. Yumurtanın kırılarak düzensiz bir hale gelmesi için düzenli, sağlam bir yumurta olarak başlaması gerekir. Entropinin geleceğe doğru artması için geçmişte entropinin düşük olması gerekir ki her şey gittikçe daha düzensiz olma potansiyeline sahip olabilsin. Bununla birlikte yalnızca bir yasanın geçmişle geleceği farklı olarak ele alması, bu yasanın daha düşük entropili bir geçmişi ima etmesini gerektirmez. Yasa hâlâ

geçmişe doğru entropinin arttığını ima ediyor olabilir (belki de entropi geçmiş ve geleceğe doğru asimetrik bir şekilde artıyor- dur) ve zamanda asimetrik bir yasanın geçmiş hakkında herhangi bir şey söyleyemiyor olması da olasıdır. Bu sonuncusu, piyasadaki zamanda asimetrik önerilerin yalnızca biri olan Ghirardi-Rimini-Weber önerisi için doğrudur. Bu önerideki çökme mekanizması bir kez işlevini yaptığında artık geri almanın hiçbir yolu yoktur, çökmüş bir dalga fonksiyonuyla başlayıp daha önceki yayılmış haline doğru evrilmesini sağlamanın bir yolu yoktur. Dalga fonksiyonunun ayrıntılı şekli çöküşte kaybolur -sivri bir fonksiyona dönüşür- ve artık dalga fonksiyonunun çöküşten herhangi bir zaman süresi kadar önce nasıl olduğunu ortaya koymak olanaksızdır.

Bu yüzden, zamanda asimetrik bir yasa her şeyin neden bir zaman sırasına göre geliştiği, neden ters yönde gelişmediği konusuna kısmi bir açıklama getirmiş olsa bile, zamanda simetrik yasaların gerektirdiği ekleri de pekala gerektirebilir: Uzak geçmişte entropinin neden düşük olduğunun açıklanması. Elbette bu, kuantum mekaniğinin şimdiye kadar önerilen zamanda asimetrik değişiklikleri için doğrudur. Bu yüzden, gelecekteki bir keşif - benim her ikisini de olanaksız gördüğüm -iki şeyi, kuantum ölçüm problemine, ek olarak entropinin geleceğe doğru azaldığı, zamanda asimetrik bir çözüm- zamanın okunu açıklama çabalarımız bizi bir kez daha evrenin başlangıcına geri götürür ki bu da kitabın gelecek bölümlerinin konusudur.

Bu bölümlerin açıkça göstereceği gibi, kozmolojik düşünceler uzayın, zamanın ve maddenin kalbine doğru çeşitli gizemlerle giderler. Bu yüzden modern kozmolojinin fikirlerinin zamanın okuna doğru olan yolculuğunda, manzara konusunda acele etmeden, kozmik geçmişte iyi düşünülmüş bir geziye çıkmalıyız.

3 Üzay-Zaman ve Kozmoloji

VIII. Bölüm

Kar Taneleri ve Uzay-Zaman Hakkında

Simetri ve Evrenin Evrimi

Richard Feynman bir zamanlar eğer modern bilimin en önemli buluşunu bir cümlede özetlemesi gerekseydi "Dünya atomlardan yapılmıştır" cümlesini seçeceğini söylemişti. Ancak evreni kavrayışımızın ne kadar büyük bölümünün atomların özellikleri ve bunların arasındaki ilişkilere ait olduğunu anladığımız zaman -yıldızların parlamasının ve gökyüzünün mavi renginin nedenlerinden bu kitabı niçin ellerinizde hissettiğinize ve bu kelimeleri gözlerinizle gördüğünüze kadar- bilimsel mirasımızı özetlemek açısından Feynman'ın seçimini daha iyi takdir edebiliriz. Günümüzün önde gelen bilim insanlarının çoğunun, eğer ikinci bir cümle seçmeleri istenseydi, bu "Evrenin yasalarının temelini simetri oluşturur" cümlesi olurdu. Son birkaç yüz yıl içinde bilimde pek çok alt-üst oluş yaşanmıştır ama en kalıcı keşiflerin ortak bir yönü vardır: Bunlar, doğanın ne kadar farklı şekilde etkilenmeye çalışılırsa çalışılsın, de-

ğişmez kalan özelliklerini bulmuşlardır. Bu değişmez kalan niteliklere fizikçiler simetri adını verirler ve bu simetriler pek çok büyük ilerlemede giderek daha hayati roller oynamışlardır. Bu da simetrinin -bütün gizemli ve karmaşık kılıklarında- gerçeğin keşfedilmeyi beklediği karanlığın üzerine güçlü bir ışık tuttuğu yolunda yeterince kanıt sağladığını göstermektedir.

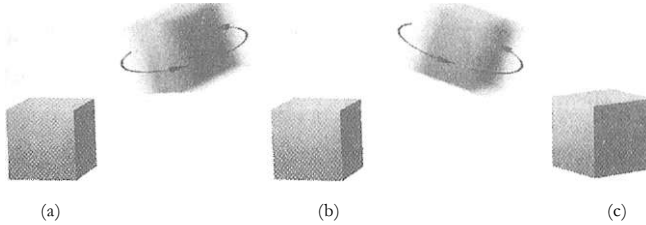
Aslında göreceğimiz gibi, evrenin tarihi büyük ölçüde simetrinin tarihidir. Evrenin evrimindeki en önemli anlar, dengenin ve düzenin birdenbire değişerek, önceki dönemlerden nitelik olarak farklı kozmik arenalara yol açtığı anlardır. Şu an geçerli olan kuram, evrenin ilk dönemlerinde böylesi bir dizi geçiş evresi geçirdiğini ve karşılaştığımız *her şeyin*, bu daha simetrik kozmik dönemin elle tutulur kalıntıları olduğu görüşünü taşıyor. Ama simetrinin evrilen evrenin kalbinde yer aldığı daha görkemli bir yan vardır. Zamanın kendisi simetri ile yakından bağlantılıdır. Açıkça görüleceği gibi, değişimin bir ölçüsü olarak zamanın ikinci anlamı ve "bir bütün olarak evrenin yaşı ve evrimi" gibi şeylerden anlamlı olarak söz edebilmemizi sağlayan bir tür kozmik zamanın varlığı, çok hassas biçimde simetrinin özelliklerine bağlıdır. Bilim insanları, uzayın ve zamanın gerçek anlamını bulmak amacıyla geriye, başlangıca doğru bakarak bu evrimi incelediklerinde, simetri, başka türlü ulaşılmayacak olan cevaplar ve fikirler veren en sağlam kılavuz olmuştur.

Simetri ve Fizik Yasaları

Simetriler çok boldur. Bir bilardo topunu elinizde tutun ve şu veya bu yönde -herhangi bir eksen çevresinde- döndürün, kesinlikle aynı görünür. Sade, yuvarlak bir yemek tabağını masaya koyun ve merkezi etrafında döndürün: Tümüyle değişmez görünür. Yeni oluşmuş bir kar kristalini yavaşça tutun ve her ucu, biraz önce komşu ucun gösterdiği yöne gelecek şekilde döndürün, hiçbir şey yapmamışsınız gibi olur. "A" harfini alın ve onu tepesinden geçen düşey eksen çevresinde döndürün, özgün harfin aynısını elde edersiniz.

Bu örneklerin açıkça gösterdiği gibi, bir cismin simetrileri, uygulandığında cismin görünüşünde hiçbir etkisi olmayan gerçek veya hayali değişikliklerdir. Bir cisim görünümünde bir fark olmadan ne kadar değişikliği kaldırabiliyorsa, o kadar simetrik-tir. Bir küre son derece simetriktir çünkü merkezinden geçen herhangi bir eksen etrafında -aşağı-yukarı, sol-sağ veya herhangi bir yön- döndürmek görüntüsünün aynı kalmasıyla sonuçlanır. Bir küp daha az simetriktir çünkü yalnızca yüzlerinin orta noktalarından geçen eksenlerin çevresinde 90° birimlerinde yapılan döndürmeler (ve bunların kombinasyonları) kübün görünüşünün aynı kalmasıyla sonuçlanır. Elbette herhangi bir kimse, örneğin Şekil 8.1c'deki gibi bir döndürme yaparsa, kübü hâlâ tanıyabilirsiniz ama birinin onunla oynadığını açıkça fark edersiniz. Simetriler ise, aksine, en becerikli uçkâğıtçılar gibidir, yaptıkları değişiklikler geride hiçbir iz bırakmaz.

Bütün bunlar cisimlerin *uzaydaki* simetrilerinden örneklerdir. Bilinen fizik yasalarının altında yatan simetriler de bunlarla yakından ilişkilidir ama bunlar için daha soyul bir soru sorulması gerekir: Gözlediğiniz fiziksel bir olayı açıklayan yasalar da kesinlikle bir etkisi olmadan, sizin üzerinizde veya çevrenizde -bir kere daim gerçek veya hayali- ne gibi değişiklikler yapılabilir? Dikkat edilirse, simetri sayılmak için bu tür değişikliklerin gözlemlerinizi değişmez olarak bırakması gerekmez. Biz daha çok bu gözlemleri yöneten yasaların değişip değişmemesiy-



Şekil 8.1 Eğer (a) dalı gibi bir küp, (b)'de olduğu gibi, karşılıklı yüzlerinin ortalarından geçen eksenler etrafında 90 derece ve katlarında döndürülürse değişmez görünür. Ama (c)'deki gibi herhangi başka bir dönme, fark edilir.

le -değişiklikten önce gördüklerinizi açıklayan yasalarla değişiklikten sonra gördüklerinizi açıklayan yasaların farklı olup olmasıyla- ilgiliniz. Bu temel fikir etrafında şimdi bazı örnekleri inceleyelim.

Olimpik bir jimnastikçi olduğunuzu ve son dört yıldır Connecticut jimnastik merkezinde çok sıkı çalışmakta olduğunuzu varsayın. Görünüşe göre sonsuz kere tekrarlayarak her hareketinizi gittikçe daha kusursuz hale getirmişsinizdir; havada yürüme hareketi için denge tahtasını ne kadar hızla itmek gerektiğini, ikili dönme hareketi için ne kadar sıçramanız gerektiğini, ikili parende atmak için paralel barda vücudunuzu ne kadar hızla fırlatmanız gerektiğini biliyorsunuzdur. Aslında vücudunuzun hareketlerini yönetenler bunlar olduğu için, vücudunuzun Newton yasalarına doğuştan alışık olduğunuzu hissedersiniz. Şimdi, son gösterinizi Olimpik yarışmaların merkezi olan New York'ta, izleyiciler karşısında yaparken, aynı yasaların geçerli olduğuna güvenirsiniz, çünkü gösterinizi tıpkı antrenmanlardaki gibi yapmaya niyetlisinizdir. Newton yasaları hakkında bildiğimiz her şey stratejinize güven verir. Newton yasaları bir konuma veya diğerine özel değildir, Connecticut'ta bir şekilde, New York'ta başka bir şekilde işlemezler. Nerede olursanız olun, aynı şekilde işlerler. Yerinizi değiştirmiş olsanız bile, vücudunuzun hareketlerini yöneten yasalar, tıpkı döndürülen bir bilardo topunun görüntüsü gibi, bundan etkilenmez.

Bu simetri, *yer değiştirme simetrisi veya yer değiştirme değişmezliği* adını alır. Sadece Newton yasalarına değil, Maxwell'in elektromanyetik yasalarına, Einstein'ın özel ve genel görelilik yasalarına, kuantum mekaniğine ve modern fizikte herhangi bir kimsenin ciddiye alacağı herhangi bir öneriye de uygulanır.

Ama önemli bir noktaya dikkat edin. Gözlemlerinizin ayrıntıları ve yaşananlar bazen bir yerden diğerine değişiklik gösterebilir ve gösterecektir. Eğer jimnastik gösterilerinizi Ay'da yapaysaydınız, yukarı sıçramak için bacaklarınızla zemine uyguladığınız aynı kuvvete tepki olarak vücudunuzun havada çizdiği yol çok farklı olurdu. Ama bu farkı tam olarak anlıyoruz ve bu fark

zaten yasalarla bütünleşmiş durumdadır. Ay, Dünya'dan daha küçük kütleli olduğu için, uyguladığı kütleçekimi etkisi daha küçüktür; sonuç olarak gövdeniz farklı yörüngeler çizer. Bu gerçek -bir cismin kütleçekiminin onun kütlesine bağlı olduğu gerçeği- Newton'un kütleçekimi yasasının (ve Einstein'ın çok daha rafine genel göreliliğinin de) *ayrılmaz* bir parçasıdır. Ay'daki ve Dünya'daki deneyimleriniz arasındaki fark, kütleçekimi yasasının bir yerden diğerine değiştiğini ima etmez. Yalnızca kütleçekimi yasasının zaten içinde barındırdığı çevresel farkı yansıtır. Bu yüzden, bilinen fizik yasalarının New York ve Connecticut'ta -veya şimdi ekleyelim Ay'da da- eşit bir biçimde uygulandığını söylediğimizde, bu doğrudur, ama yasaların bağlı olduğu çevresel farkları belirlemek zorunda kalabileceğinizi aklınızdan çıkarmayın. Bununla birlikte, ki bu kilit bir sonuçtur, yasaların sağladığı açıklayıcı yapı, konumun değişmesiyle herhangi bir değişikliğe uğramaz. Konumdaki bir değişiklik fizikçilerin kara tahtanın başına geçerek yeni yasalar bulmaya çalışmalarını gerektirmez.

Fizik yasaları bu şekilde işlemek zorunda değildir. Fizik yasalarının devletlerin yasaları gibi değişken olduğu bir evren hayal edebiliriz; bildiğimiz fizik yasalarının bize Ay'daki, Andromeda galaksisindeki, Yengeç bulutsusundaki veya evrenin öbür yanındaki fizik yasaları hakkında hiçbir şey söylemediği bir evren hayal edebiliriz. Aslında burada işleyen yasaların, evrenin uzak köşelerinde işleyen yasalarla aynı olduğundan kesinlikle emin değiliz. Ama eğer yasalar orada bir yerde değişiyorsa, bunun çok uzak bir yer olması gerektiğini biliyoruz, çünkü gittikçe daha hassas bir şekilde yapılan astronomi gözlemleri, yasaların her yerde, en azından görebildiğimiz uzayda aynı olduğu yolunda gittikçe daha ikna edici kanıtlar ortaya koyuyor. Bu da simetrinin şaşırtıcı gücüne ışık tutuyor. Dünya gezegenine ve yakın çevresine mahkûm olmamıza rağmen, yer değiştirme simetrisi nedeniyle, buradan ayrılmadan bütün evrende işleyen temel yasaları öğrenebiliriz, çünkü keşfettiğimiz yasalar, o yasalardır.

Dönme simetrisi veya. dönme değişmezliği yer değiştirme değişmezliğinin yakın akrabasıdır. Uzaydaki her yönün diğeriyle eşit olduğu düşüncesine dayanır. Dünyadan bakmak elbette bu sonuca varmanıza yol açmaz. Yukarı baktığınızda, aşağı baktığınız zaman gördüklerinizden çok daha farklı şeyler görürsünüz. Ama yine, bu da çevresel ayrıntıları yansıtır; yasaların kendilerinin karakteristik bir özelliği değildir. Eğer Dünyayı terk edip bütün yıldızlardan, galaksilerden ve diğer gök cisimlerinden uzağa, uzayın derinliklerine gitseniz, simetri açıkça ortaya çıkar: Simsiyah boşlukta bir yönü diğerinden ayıracak hiçbir şey yoktur. Hepsi eşittir. Maddenin ve kuvvetlerin özelliklerini araştırmak üzere kurmakta olduğunuz derin uzay laboratuvarının şu yöne mi yoksa bu yöne mi bakması gerektiği konusunda bir an bile düşünmezsiniz, çünkü yasalar bu seçime kesinlikle bağlı değildir. Eğer bir gece, bir şakacı laboratuvarın jiroskop ayarlarını değiştirse ve belirli bir eksen çevresinde biraz dönmesine neden olsa, bunun deneylerinizde incelediğiniz fizik yasalarına hiçbir etkisi olmasını beklemezsiniz. Yapılan her ölçüm bu beklentiye tam olarak karşılır. Bu nedenle, yaptığınız deneyleri yöneten ve bulduğunuz sonuçları açıklayan yasaların, hem nerede olduğunuzdan -ki bu yer değiştirme simetrisidir- hem de uzayda hangi yöne doğru durduğunuzdan - ki bu da dönme simetrisidir¹- bağımsız olduğuna inanırız.

Bölüm 3'te incelediğimiz gibi, Galileo ve diğerleri, fizik yasalarının saygı göstermesi gereken bir simetrinin daha olduğunun çok iyi farkındaydılar. Eğer derin uzay laboratuvarınız sabit hızla hareket ediyorsa -o yöne doğru ister saatte 5 kilometre hızla, ister saatte 100.000 kilometre hızla gidiyor olun- bu hareketin, gözlemlerinizi açıklayan yasalar üzerinde hiçbir etkisi olmaz, çünkü siz de, sizin sabit olduğunuzu, hareket edenlerin diğer her şey olduğunu iddia eden birisi kadar haklısınızdır. Görmüş olduğumuz gibi, Einstein bu simetriyi son derece beklenmedik bir biçimde, sizin hareketinizden veya ışık kaynağının hareketinden etkilenmeyecek gözlemlerin arasına ışığın hızını da katarak genişletmiştir. Bu, şaşırtıcı bir hamleydi, çünkü normal

olarak biz bir cismin hızının niteliklerini, gözlenen bu hızın genellikle gözlemcinin hareketine bağlı olduğunu bildiğimiz için, çevresel ayrıntılar kutusuna atarız. Ama doğanın Newtonsal yapısının çatlaklarından ışığın simetrisinin aktığını gören Einstein, tıpkı bir bilyardo topunun dönmeden etkilenmemesi gibi ışık hızının da hareketten etkilenmediğini bildirerek ışığın hızını doğanın ihlal edilemez bir yasası düzeyine yükseltti.

Einstein'ın diğer büyük keşfi olan genel görelilik, daha da fazlası simetrik olan kuramlara doğru giden yola çok iyi bir şekilde uyum sağlar. Nasıl özel göreliliğin birbirlerine göre sabit hızla hareket eden bütün gözlemciler arasında simetri kurduğunu düşünüyorsak, genel göreliliğin de, bir adım ileri giderek, bütün ivmelenen gözlemciler arasında simetri kurduğunu düşünebiliriz. Bu olağandışıdır, çünkü vurguladığımız gibi, her ne kadar sabit hızlı hareketi hissedemiyor olsak da ivmeli hareketi *hissedebiliriz*. Dolayısıyla, gözlemlerinizi tanımlayan fizik yasalarının, ivmelendiğiniz zaman hissettiğiniz fazladan kuvveti açıklayabilmek için farklı olmaları gerekirmiş gibi duruyor. Newton'un yaklaşımında da durum *böyledir*, onun bütün üniversite birinci sınıf fizik kitaplarında yer alan yasalarının, eğer İvmelenen bir gözlemci tarafından kullanılmıyorlarsa, değiştirilmeleri gerekir. Ama Bölüm 3'te incelenen eşdeğerlik ilkesi gereğince, Einstein, ivmelenme sonucu hissettiğiniz kuvvetin, uygun şiddette bir kütleçekimi alanında hissettiğiniz kuvvetten ayırt edilemeyeceğini fark etmişti (ivme büyüdükçe kütleçekimi alanı da büyür). Bu yüzden Einstein'ın daha rafine perspektifine göre, çevrenizde uygun bir kütleçekimi alanı bulunduğu sürece, fizik yasaları siz ivmelendiğinizde de *değişmezler*. Genel görelilik bütün gözlemcileri; rasgele, sabit olmayan hızlarla hareket edenleri bile eşit olarak ele alır -bunlar tamamiyle simetriktir- çünkü her biri, hissedilen kuvvetleri farklı kütleçekimi alanlarına atfederek, kendilerinin sabit olduğunu öne sürebilir. İvmelenen bir gözlemcinin ve bir diğerinin gözlemleri arasındaki farklar, bu yüzden, jimnastik gösterinizi Dünya'da veya Ay'da yaparken gördüğünüz farklardan daha fazla şaşırtıcı

olmadığı gibi doğa yasalarındaki değişiklikler için de daha fazla kanıt sunmaz.²

Bu örnekler pek çok kimsenin, Feynman'ın hemfikir olacağından çok kuşkulu olduğum şekilde, neden doğa yasalarının altında yatan çok sayıda simetrinin, bilimsel görüşlerimizin bir özeti olarak, atom hipotezinin hemen ardından geldiğini düşündüklerini gösteriyor. Ama bu öykünün dahası var. Son yirmibeş-otuz yıldır, fizikçiler simetrleri açıklayıcı merdivenin en üst basamaklarına yükselttiler. Önerilen bir doğa yasasıyla karşılaştığınızda, sorulacak doğal bir soru şudur: Neden bu yasa? Neden özel görelilik? Neden genel görelilik? Neden Maxwell'in elektromanyetizma kuramı? Neden Yang-Mills'in zayıf ve nükleer kuvvet kuramları (bunları yakında inceleyeceğiz)? Önemli bir cevap, bu kuramların çok hassas deneylerce tekrar tekrar doğrulanan öngörülerde bulunduklarıdır. Elbette bu, fizikçilerin bu kuramlara duyduğu güvenin temelidir ama önemli bir şeyi dışarıda bırakır.

Fizikçiler bu kuramların doğru yolda olduklarına da inanırlar, çünkü tanımlaması zor bir şekilde, doğru olduklarını *hissederler* ve simetri görüşleri bu hissin temelini oluşturur. Evrende hiçbir yerin, bir başkasıyla karşılaştırıldığında özel olmamasının doğru olduğu hissi vardır, bu yüzden fizikçiler yer değiştirme simetrisinin doğanın simetrleri arasında olması gerektiğine güven duyarlar. Hiçbir sabit hızlı hareketin diğeriyle karşılaştırıldığında özel olmamasının doğru olduğu hissi vardır, bu yüzden fizikçiler, sabit hızla hareket eden bütün gözlemciler arasında tam bir simetriyi kapsayan özel göreliliğin doğa yasalarının temel bir parçası olduğuna güven duyarlar. Bunun gibi, *herhangi bir* gözlemsel bakış noktası -olası bir ivmeli hareketin kapsanmasından bağımsız olarak- bir diğeri kadar geçerli olmalıdır. Bu yüzden fizikçiler, bu simetriyi işin içine katan en basit kuram olan genel göreliliğin, doğal olayları yöneten en derin gerçekler arasında olduğuna inanırlar. Yakında göreceğimiz gibi, kütleçekiminin dışındaki üç kuvvetin kuramları -elektromanyetizma, güçlü ve zayıf nükleer kuvvetler- başka, daha soyut ama aynı dere-

cede zorlayıcı simetri ilkelerini temel almaktadırlar. Buyüzden doğanın simetrisi yalnızca doğa yasalarının sonuçları değildir. Bizim modern perspektifimize göre simetriler, yasaların çıktığı kaynağın temelidir.

Simetri ve Zaman

Doğanın kuvvetlerini yöneten yasaları biçimlendirmenin ötesinde, simetri fikirleri zaman konusunun kendisi için de hayati bir önem taşır. Zamanın geçtiğini, bazı şeylerin eskisinden farklı olduğuna dikkat ederek anlarız. Kol saatimizdeki saat ibresi farklı bir rakam gösterir, Güneş'in gökyüzündeki konumu farklıdır, sayfaları dağınık olan *Savaş ve Barışın* yaprakları daha düzensizdir, kola şişenizden kaçan karbon dioksit molekülleri daha dağılmıştır; tüm bunlar bir şeylerin değiştiğini açıkça gösterir ve böyle değişikliklerin gerçekleşme potansiyelini zaman sağlar. John Wheeler'dan aktarırsak, zaman, doğanın her şeyin bir anda olup bitmesini önlemek için kullandığı bir yoldur.

Bu yüzden zamanın varlığı özel bir simetrinin *yokluğuna* bağlıdır: Sezgisel kavramımıza herhangi bir benzerlik gösteren *an be an* kavramını tarif etmek için bile evrendeki şeyler an be an *değişmelidir*. Eğer şeylerin şimdi nasıl olduklarıyla eskiden nasıl oldukları arasında mükemmel bir simetri olsaydı, an be an değişimin bir bilardo topunun döndürülmesiyle ortaya çıkan değişimin ötesinde sonuçları olmasaydı, şimdi algıladığımız biçimiyle zaman olmazdı.³ Bu, Şekil 5.1 de gösterildiği gibi, uzay-zamanın genişlemediğini söylemekle aynı şey değildir, uzay-zaman genişleyebilirdi. Ama zaman eksenini boyunca her şey düzgün, birörnek olacağı için, evrenin evrildiği veya değiştiği bir yön olmazdı. Zaman, bu gerçekliğin arenasının soyut bir niteliği olurdu -uzay-zaman sürekli ortamının dördüncü boyutu- aksi takdirde, tanınması mümkün olmazdı.

Bununla birlikte, zamanın varlığı, özel bir simetrinin yokluğuyla çakışıyor olsa bile, kozmik bir ölçekteki uygulaması, evrenin farklı bir simetriye çok saygılı olmasını gerektirir. Fikir basittir ve Bölüm 3'ü okurken sizin de kafanıza takılmış olabilecek

bir soruyu cevaplar. Eğer görelilik bize, zamanın geçişinin, ne kadar hızlı hareket ettiğimize ve içinde bulunuyor olabileceğimiz kütleçekimi alanına bağlı olduğunu öğretiyorsa, astronomların ve fizikçilerin evrenin tamamının belirli ve kesin bir yaşta -bu günlerde 14 milyaryıl olarak alınan biryaş- olduğunu söylemelerinin anlamı nedir? Kime göre ondört milyar yıl? Hangi saate göre ondört milyar yıl? Çok uzaklardaki Tadpole galaksisinde yaşayan varlıklar da evrenin yaşının 14 milyar yıl olduğu sonucuna varırlar mı ve eğer öyleyse, onların saatlerinin de bizimkilerle aynı hızda işlemelerini sağlayan şey nedir? Cevap simetriye, uzayda simetriye dayanır.

Eğer gözleriniz, dalga boyları kırmızı ve portakal renginden çok daha uzun olan ışıkları görebilseydi, yalnızca düğmesine bastığınızda mikrodalga fırınınızın içinin çalışmaya başlayarak ışıkla dolduğunu değil, herkesin karanlık algıladığı bir gecede, gökyüzünde dağılmış halde bulunan soluk ve yaygın bir parlamayı da görebilecektiniz. Kırk yıldan daha uzun bir süre önce bilim insanları, evrenin, Büyük Patlama'nın hemen ertesindeki bunaltıcı koşulların soğumuş bir kalıntısı olan mikrodalga ışıınımlıyla -uzun dalga boylu ışık- dolu olduğunu keşfettiler.⁴ Bu *koz-mik mikrodalga fon ışıınımlı* tümüyle zararsızdır. İlk zamanlarda çok sıcaktı ama evren evrilip genişledikçe bu ışıınımlı sürekli olarak seyredildi ve soğudu. Bugün, mutlak sıfırın hemen hemen 2.7 derece üzerinde olup, öne sürülen en büyük zararı, anten kablo-sunu çıkarıp yayın yapmayan bir frekansa ayarladığınızda televizyonunuzun ekranında gördüğünüz karlanma görüntüsüdür.

Ama bu hafif parazit astronomlara, bir tyrannosaurus kemiğinin paleontologlara verdiğini verir: Uzak geçmişte ne olduğunu kurgulayabilmek için hayati önemi olan, geçmişe açılan bir pencere. Bu ışıınımlı, son on yıldaki hassas uydu ölçümlerince ortaya çıkarılan temel özelliği, son derece düzgün, birörnek olmasıdır. ışıınımlı gökyüzünün bir bölümündeki sıcaklığı, diğer bir bölümündeki sıcaklığından derecenin binde birinden daha az fark eder. Dünyada böyle bir simetri, Weather Channel'i (Meteoroloji Kanalı) çok anlamsız bir hale getirdi. Eğer sıcaklık

Jakarta'da 35 derece ise, Adelaide, Şanghai, Cleveland, Anchorage ve diğer herhangi bir yerde sıcaklığın 34,999 dereceyle 35,001 derece arasında olacağını hemen anladınız. Kozmik ölçekte ise, tersine, ısınımın sıcaklığının birörnekliliği, iki kritik düşünceye yol açtığı için *inanılmaz ölçüde* ilginçtir.

Birincisi, bu ısınım evrenin ilk dönemlerinde kara delikler gibi büyük, yığınsı, yüksek-entropili madde topraklarıyla dolu olduğu yolunda gözlemsel kanıtlar sağlar, çünkü böylesi türdeş olmayan bir ortam, ısınımın üzerinde de türdeş olmayan izler bırakmış olmalıdır. Oysa ısınımın sıcaklığının birörnek olması genç evrenin türdeş olduğunu ortaya koyar; ve Bölüm 6'da gördüğümüz gibi, kütleçekiminin önemli olduğu durumlarda -evrenin ilk dönemlerinde olduğu gibi- türdeşlik düşük entropiyi ima eder. Bu da iyi bir şeydir çünkü zamanın oku konusundaki tartışmamız, evrenin düşük entropili başlamasına dayanıyordu. Kitabın bu bölümündeki amaçlarımızdan biri, bu gözlemi açıklayabilmek için gidebileceğimiz kadar gitmektir. Türdeş, düşük-entropili, çok büyük ölçüde düşük olasılıklı çevrenin nasıl oluştuğunu anlamak istiyoruz. Bu bizi zamanın okunun kaynağını anlamaya büyük bir adım yaklaştıracaktır.

İkincisi, her ne kadar evren, Büyük Patlama dan beri evriliyorsa da, ortalama olarak bu evrim evrenin her yerinde hemen hemen aynı olmuş olmalı. Buradaki, Whirlpool galaksisindeki, Coma kümesindeki ve diğer her yerdeki sıcaklığın virgülden sonra dördüncü basamağa kadar aynı olması için, uzayın her bölgesindeki fiziksel koşulların Büyük Patlama dan bu yana temel olarak aynı şekilde evrilmiş olması gerekir. Bu önemli bir sonuç olmakla birlikte doğru yorumlanması gerekir. Geceleğin gökyüzüne bir göz atmak elbette çeşitlenmiş bir evreni gözler önüne serer: Gezegenler ve her çeşit yıldızlar uzayda şuraya buraya serpiştirilmişlerdir. Ama önemli nokta, evrenin bütünü'nün evrimini çözümlediğimiz zaman, bu 'küçük'-ölçekli değişiklikler üzerinden ortalama alan bir "makro" perspektiften baktığımız ve büyük-ölçekli ortalamaların hemen hemen tam olarak birörnek görüldüğüdür. Bir bardak suyu düşünün. Mole-

kül düzeyinde su hiç de türdeş bir yapıya sahip değildir: Şurada bir H_2O molekülü, arada bir uzay parçası, burada bir H_2O molekülü daha vb. Ama eğer küçük ölçekli moleküler kümелilik üzerinden ortalama alır ve suyu gündelik hayatta çıplak gözle gördüğümüz "büyük" ölçeklerde incelersek, bardaktaki su son derece birörnek ve türdeş görünür. Gökyüzüne doğru baktığımızda gördüğümüz birörnek olmama hali, tek bir H_2O molekülünün mikroskopik görüntüsü gibidir. Ama bir bardak suda olduğu gibi, evren yeterince büyük ölçeklerde -yüz milyonlarca ışık yılı mertebesindeki ölçeklerde- incelendiğinde, olağanüstü türdeş görünür. Bu yüzden ışıının birörnekliliği hem fizik yasalarının, hem de evrendeki ortamın ayrıntılarının fosilleşmiş bir vasiyetidir.

Bu durumun önemli sonuçları vardır çünkü bir bütün olarak evrene uygulanabilecek zaman kavramını tanımlamamıza olanak veren şey, evrenin birörnekliliğidir. Eğer değişimin ölçüsü olarak geçerli bir geçen zaman tanımını alırsak, uzaydaki koşulların birörnekliliği, evrendeki değişimin birörnekliliğinin ve bu yüzden geçen zamanın birörnekliliğini de ima eder. Nasıl dünyanın jeolojik yapısının birörnekliliği biri Amerika'da, diğeri Afrika'da, bir diğeri ise Asya'da bulunan jeologların dünyanın tarihi ve yaşı konusunda hemfikir olmalarına olanak veriyorsa, uzayın tamamındaki kozmik evrimin birörnekliliği de biri Samanyolu galaksisinde, diğeri Andromeda galaksisinde, bir diğeri ise Tadpole galaksisinde bulunan fizikçilerin *evrenin* tarihi ve yaşı konusunda hemfikir olmalarına olanak verir. Somutlaştıracak olursak, evrenin türdeş evrimi, biri burada, diğeri Andromeda galaksisinde, bir diğeri ise Tadpole galaksisinde bulunan saatlerin ortalama olarak hemen hemen aynı fiziksel koşullara maruz kalacağını ve bu yüzden hemen hemen aynı hızda çalışacakları anlamına gelir. Böylece uzayın türdeşliği evrensel bir eşzamanlılık sağlar.

Şimdiye kadar önemli ayrıntıları (bir sonraki alt bölümde işlenecek olan uzayın genişlemesi gibi) atlamış olsam da, tartışma konunun özünü aydınlatıyor: Zaman simetriterin kavşağın-

da bulunur. Eğer evrende mükemmel bir zamansal simetri olsaydı -tamamiyle değişmez olsaydı- zamanın ne anlama geldiğini tarif etmek bile zor olurdu. Öte yandan, eğer evren, uzayda simetriye sahip değilse -eğer, örneğin fon ışıınımı farklı bölgelerde çok farklı sıcaklıklara sahip olacak şekilde gelişigüzel olsaydı- kozmolojik olarak zamanın pek anlamı olmazdı. Farklı yerlerdeki saatler farklı hızlarla çalışır ve böylece evren 3 milyar yaşındayken nasıl olduğu sorulduğunda, cevap üç milyar yıl geçtiğini kimin saatiyle gördüğünüze bağlı olurdu. *Bu* da karmaşık olurdu. Neyse ki evrenimizde zamanı anlamsız kılacak kadar çok simetri yok ama böylesi karmaşık durumlardan kaçınmamıza yetecek kadar, evrenin toplam yaşı ve zaman içindeki evriminden söz edecek kadar simetri var.

O zaman, şimdi dikkatimizi bu evrime çevirelim ve evrenin tarihine bir göz atalım.

Yapıyı Esnetmek

Evrenin tarihi kulağa büyük ve karmaşık bir konu gibi gelmekle birlikte, genel hatlarıyla şaşırtıcı derecede basit olup büyük ölçüde bir temel gerçeğe dayanır: Evren genişliyor. Bu gelişen kozmik tarihin en önemli ögesi ve kesinlikle insanlığın en büyük keşiflerinden biri olduğu için, kısaca bunun nasıl böyle olduğunu görelim.

1929'da Edwin Hubble, Pasadena, Kaliforniya'da bulunan Mount Wilson'daki 2.5 metre çapındaki teleskobu kullanarak, saptayabildiği otuzbeş-kırk galaksinin birbirlerinden uzaklaşmakta olduklarını buldu.⁵ Aslında Hubble bir galaksi ne kadar tızaktaysa, uzaklaşma hızının o kadar fazla olduğunu fark etti. Anlamlı bir ölçek verelim: Hubble'ın özgün gözlemlerinin daha rafine çeşitlemeleri (diğerlerinin yanı sıra Hubble Uzay Teleskobu da kullanılarak binlerce galaksi incelenmiştir) bizden 100 milyon ışık yılı uzaktaki galaksilerin bizden saatte 9 milyon kilometre hızla, 200 milyon ışık yılı uzaktaki galaksilerin saatte 18 milyon kilometre hızla, 300 milyon ışık yılı uzaktaki galaksilerin saatte 26.5 milyon kilometre hızla uzaklaşmakta oldukla-

rını göstermiştir. Hubble'ın keşfi şok ediciydi çünkü hâkim olan bilimsel ve felsefî önyargılar evrenin en büyük ölçeklerde durağan, sonsuz, sabit ve değişmez olduğunu öne sürüyordu. Ama Hubble bu görünümü bir hamlede dağıttı. Einstein'ın genel göreliliği, mükemmel bir deney ve kuram birlikteliği sergileyerek, Hubble'ın keşfine güzel bir açıklama getirdi.

Aslında bir açıklama bulmanın özel bir zorluğu olmadığını düşünebilirsiniz. Sonuçta, eğer bir fabrikanın yanından geçerken her çeşit malzemenin hızla her yöne doğru uçtuğunu görürseniz, büyük olasılıkla bir patlama olduğu sonucuna varırsınız. Metal ve beton parçalarının izlediği yolları geriye doğru izlerseniz bunların bir noktaya doğru gittiğini görür ve burasının da büyük olasılıkla patlamanın gerçekleştiği yer olduğunu bulursunuz. Aynı düşünüş mantığı, yeryüzünden baktığımızda -Hubble'ın gözlemlerinin ve sonradan yapılan gözlemlerin desteklediği gibi- galaksiler bizden uzaklaşıyor gibi göründüklerinden, bizim uzaydaki konumumuzun, yıldızların ve galaksilerin hammaddesini birörnek olarak kusan, çok eski bir patlamanın yeri olduğunu gösterir. Ama bu kuramın sorunu, uzayın bir bölgesini -bizim bulunduğumuz bölge- diğerlerinden ayırarak, evrenin doğum yeri olarak işaretlemesidir. Eğer durum böyle olsaydı, derin anlamları olan bir asimetriye neden olurdu: Bu patlamanın olduğu yerden -yani bizden- uzak bölgelerdeki fiziksel koşullar, buradakilerden çok farklı olurdu. Astronomi verilerinde böyle bir asimetrinin ipuçları yoktur. Bunun da ötesinde, Kopernik öncesi düşünce ile karışmış olan "insan içinci" açıklamalarda büyük ölçüde kuşkulandığının tersine, Hubble'ın keşfinin daha oturmuş bir yorumu, bizim konumumuzun kozmik düzende özel bir yer işgal etmediği bir açıklamayı gerektirir.

Genel görelilik böyle bir açıklama sağlar. Einstein uzayın ve zamanın esnek, sabit olmayan, lastik gibi, katı olmayan bir yapıda olduğunu buldu ve uzayla zamanın madde ve enerjinin varlığına nasıl tepki verdiğini kesin bir biçimde gösteren denklemleri ortaya koydu. 1920'lerde Rus matematikçi ve meteorolog

Alexander Friedmann ve Belçikalı papaz ve astronom Georges Lemaître birbirlerinden bağımsız olarak, bütün evrene uygulanan Einstein'ın denklemlerini çözümlediler ve bu ikisi çarpıcı bir şey buldular. Tıpkı Dünya'nın kütleçekiminin havaya fırlatılan bir topun ya daha yükseklerle çıkıyor olması ya da aşağıya düşüyor olması gerektiğini, havada sabit duramayacağını (en yüksek noktaya ulaştığı an dışında) ima ettiği gibi, Friedmann ve Lemaître bütün evrene dağılmış bulunan madde ve ışıının kütleçekimi nedeniyle uzayın yapısının ya daha da gerilmesi ya da büzülmesi gerektiğini, sabit boyutlarda kalamayacağını ima ettiğini buldular. Aslında bu, benzetmenin fiziğin yalnızca özünü değil, matematiksel içeriğini de gösterdiği ender örneklerden biridir çünkü yerden yüksekteki topun yüksekliğini yöneten denklemler Einstein'ın evrenin boyutlarını yöneten denklemleriyle hemen hemen aynıdır."

Genel görelilikte uzayın esnekliği, Hubble'ın keşfinin yorumlanması için esaslı bir yol sağlar. Genel görelilik, galaksilerin dışarı doğru hareketini fabrikadaki patlamanın kozmik çeşitlemesi olarak açıklamak yerine, uzayın milyarlarca yıldır gerilmekte olduğunu söyler. Uzay şiştikçe, tıpkı kabarmakta olan üzümlü bir kekin içindeki üzümün birbirlerinden gittikçe uzaklaşması gibi, galaksileri de birbirlerinden uzağa doğru sürüklemektedir. Bu nedenle dışarı doğru hareketin kaynağı uzayda ortaya çıkan bir patlama *değildir*. Dışarı doğru hareket uzayın kendisinin sürekli olarak dışarı doğru şişmesinin sonucudur.

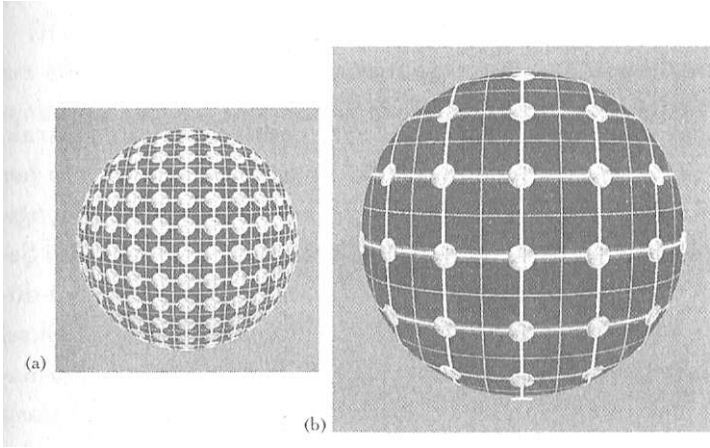
Kilit düşünceyi daha iyi anlamak için, çok yararlı bir örnek olduğundan fizikçilerin sık sık başvurduğu şişmekte olan balon örneğini gözünüzün önüne getirin (bu benzetmenin, kitabın sonundaki notlarda göreceğiniz gibi, en azından, kozmolojiye önemli katkıları olan bir bilim insanı olan Willem de Sitter'la yapılan bir röportaj sonrasında 1930'da bir Hollanda gazetesinde çıkan, eğlenceli bir çizgi-öyküye kadar izi sürülebilir)- Bu örnekte içinde yaşadığımız üç boyutlu uzay, Şekil 8.2a'da görüldüğü gibi göz önünde canlandırması daha kolay olan ve gittikçe daha fazla şişirilen, iki boyutlu, küresel bir balon yüzeyi-

ne benzetilir. Galaksiler balonun yüzeyine eşit aralıklarla yapıştırılmış bozuk paralarla temsil edilir. Dikkat ederseniz, balon genişledikçe paralar da birbirlerinden uzaklaşarak genişleyen uzayın nasıl galaksileri de sürükleyerek birbirlerinden uzaklaştırdığı konusunda basit bir benzetme ortaya koyar.

Bu modelin önemli bir özelliği, paralar arasında tam bir simetri olmasıdır çünkü bir paradan bakıldığında ne görülüyorsa diğerinden bakıldığında da aynı şey görülür. Bunu göz önünde canlandırabilmek için küçüldüğünüzü, bu paralardan birinin üzerinde oturduğunuzu ve balon yüzeyinin her tarafına baktığınızı hayal edin (bu benzetmede balonun yüzeyi bütün uzayı temsil ettiği için balona dışarıdan bakmanın hiçbir anlamı yoktur). Ne görürsünüz? Balon genişledikçe diğer paraların sizden her yöne doğru uzaklaştıklarını görürsünüz. Eğer başka bir paranın üzerinde olsaydınız ne görürdünüz? Simetri, aynı şeyi göreceğinizi garantiler: Paralar her yöne doğru uzaklaşmaktadır. Bu somut görüntü -gittikçe daha hassas astronomi gözlemleri tarafından desteklenen- evrendeki 100 milyardan daha fazla sayıdaki galaksilerden herhangi birinde bulunan ve güçlü bir teleskopla geceleyin gökyüzüne bakan bir gözlemcinin ortalama olarak bizimle aynı görüntüyü, her yönde birbirlerinden uzaklaşmakta olan galaksileri göreceği yolundaki inancımızı çok iyi örnekler.

Ve bu yüzden, dışarı doğru olan hareket önceden var olan bir uzaydaki bir fabrika patlamasına benzemiyor da, uzayın kendisinin gerilmesinden kaynaklanıyorsa, bu hareketin merkezi olan özel bir noktaya -özel bir paraya veya özel bir galaksiye- ihtiyaç yoktur. Her nokta -her para, her galaksi- diğerleriyle tam olarak eşittir. Herhangi bir noktadan görülen manzara, patlamanın merkezinden görülen manzara gibidir. Her para diğer paraların uzaklaşmakta olduğunu görür, bizim gibi herhangi bir galaksideki bir gözlemci, bütün diğer galaksilerin uzaklaşmakta olduğunu görür. Bu, bütün konumlar için doğru olduğundan, dışarı doğru olan hareketin yayıldığı merkez olan özel, tek bir konum yoktur.

Üstelik, bu açıklama yalnızca galaksilerin uzaysal olarak türdeş olan dışarı doğru olan hareketlerinin nedenini nitel olarak ilklamakla kalmaz, Hubble tarafından bulunan ve sonraki gözlemlerce daha büyük bir kesinlikle doğrulanan nicel ayrıntıların • lı nedenlerini gösterir. Şekil 8.2b'de gösterildiği gibi, eğer balon, verilen bir zaman aralığında şişerek örneğin iki katına çıkarsa, bütün uzaysal uzaklıklar da iki katına çıkacaktır. Aralarında 1 «çintimetre olan paraların arasında şimdi 2 santimetre, 2 santimetre olanların aralarında şimdi 4 santimetre, 3 santimetre olanların aralarında şimdi 6 santimetre bulunacaktır vb. Bu yüzden, belirli herhangi bir zaman aralığında iki paranın arasındaki uzaklık artışı, başlangıçla aralarındaki uzaklıkla orantılıdır. Verilen bir zaman aralığında uzaklığın daha fazla artması daha büyük hız anlamına geldiği için, başlangıçta birbirlerinden uzak olan paralar birbirlerinden daha hızlı uzaklaşırlar. Özet



olarak, iki para birbirinden ne kadar uzaksa, aralarında o kadar fazla balon yüzeyi vardır, bu yüzden de balon şişerken birbirlerinden daha hızlı uzaklaşırlar. Bu düşünüş mantığını tam olarak genişleyen uzaya ve onun kapsadığı galaksilere uygularsak, Hubble'ın gözlemlerinin bir açıklamasını elde ederiz. İki galaksi birbirlerinden ne kadar uzaksa, aralarında o kadar büyük uzay vardır ve bu yüzden uzay gerilirken (şişerken) birbirlerinden o kadar hızlı uzaklaşırlar.

Genel görelilik, galaksilerin gözlenen hareketini uzayın şişmesine bağlayarak yalnızca uzaydaki bütün noktaları simetrik olarak ele alan bir çözüm sağlamakla kalmamış, bir hamlede Hubble'ın bütün verilerini açıklamıştır. İşte fizikçilerin neredeyse "yanlış olamayacak kadar güzel" diye tanımladıkları, gözlemleri sayısal bir kesinlikle ve sanatsal bir simetriyle vererek kuttudan -yani uzayın kendisinden- çıkan, böyle bir açıklamadır. Uzayın yapısının gerilmekte olduğu yolunda, neredeyse evrensel bir fikir birliği vardır.

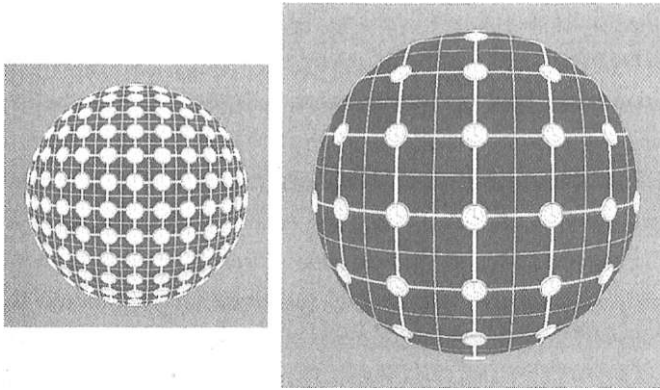
Genişleyen Evrende Zaman

Balon modelinin biraz farklı bir çeşitlemesini kullanarak, uzay genişliyor olsa bile, uzaydaki simetrisinin nasıl evrenin her tarafına birörnek uygulanan bir zaman kavramına yol açtığını artık daha kesin olarak anlayabiliriz. Her bozuk paranın Şekil 8.3'leki gibi, birbirinin eşi olan saatlerle değiştirildiğini düşünün. Görelilikten, birbirinin eşi olan saatlerin farklı fiziksel etkilere -farklı hareketlere veya farklı kütleçekimi alanlarına- maruz kaldıklarında farklı hızla işleyeceklerini biliyoruz. Basit ama kilit bir gözlem, şişen balonun üzerindeki paralar arasındaki tam simetrisinin saatler arasındaki simetriye dönüşmesidir. Bütün saatler aynı fiziksel koşullara maruz kalır, bu yüzden aynı hızla işler ve aynı miktarda zaman geçtiğini ölçerler. Benzer biçimde, galaksilerin arasında tam bir simetri bulunan, genişleyen bir evrende, *bir galaksi veya diğeriyle birlikte hareket eden saatler de aynı hızda işlemeli ve aynı geçen zaman miktarını ölçmelidirler.* Başka türlü nasıl olabilir? Her saat diğerleriyle aynı-

dır ve ortalama olarak, hemen hemen aynı fiziksel şartların etkisi altındadır. Bu, gene simetrinin şaşırtıcı gücünü gösterir. Herhangi bir hesaplama veya ayrıntılı bir çözümleme olmaksızın, fiziksel ortamın birörnekliliğinin, mikrodalga fon ışınlamının birörnekliliği ve galaksilerin uzaydaki birörnek dağılımının⁸ doğruladığı gibi, zamanın birörnekliliği sonucunu çıkarmamıza olanak sağladığını anlarız.

Her ne kadar buradaki düşünüş mantığı basit de olsa, sonuç kafa karıştırıcı olabilir. Uzay genişledikçe galaksiler de birbirlerinden uzaklaştıkları için, bu galaksilerle birlikte hareket eden saatler de birbirlerinden uzaklaşır. Üstelik, birbirlerinden, aralarındaki çok farklı uzaklıklarca belirlenen çok farklı hızlarla uzaklaşırlar. Bu hareket, Einstein'ın özel göreliliğinin bize öğrettiği gibi, saatleri artık eşzamanlı olmaktan çıkarmaz mı? Birçok nedenden dolayı bu sorunun cevabı hayırdır; bu konuda düşünmenin ayrıntılı ve yararlı bir yolu şöyledir.

Bölüm 3'ten, Einstein'ın *uzayda* değişik şekillerde hareket eden saatlerin değişik hızlarda çalıştıklarını keşfettiğini öğrenmiştik (çünkü zamandaki hareketlerinin farklı miktarlarını



Şekil 8.3 Hareketleri ortalama olarak yalnızca uzayın genişlemesinden kaynaklanan galaksilerle birlikte hareket eden saatler evrensel kozmik zaman ayarı oluştururlar. Birbirlerinden ayrılırlar bile, *uzayda* değil, *uzayla birlikte* hareket ettikleri için, eşzamanlı olarak kalırlar.

uzaydaki hareketlerine aktarırlar; Bart ın kay-kayında önce kuzeye gittiği, daha sonra hareketinin bir bölümünü doğuya aktardığı örneği hatırlayın). Ama şimdi söz konusu olan saatler, uzayda hiç hareket *etmezler*. Tıpkı her paranın balon üzerinde bir noktaya yapıştırılması ve balonun şişmesiyle yalnızca diğer paralardan uzaklaşması gibi, her galaksi de uzayda belirli bir yer kaplar ve yoğunlukla uzayın şişmesi nedeniyle yalnızca diğer galaksilerden uzaklaşır. Bu da, uzayın kendisine göre, bütün saatlerin aslında durağan olduğu ve aynı hızda çalışacakları anlamına gelir. Evrenin yaşını ölçmekte kullanılacak olan eşzamanlı kozmik saatler, *hareketleri yalnızca uzayın genişlemesinden kaynaklanan* bu saatlerdir.

Elbette, dikkat ederseniz, saatinizi yanınıza alıp bir roketle binerek uzayda olağanüstü hızlara ulaşabilir, uzayın genişlemesinden gelen kozmik akıştan çok daha büyük hızlarla hareket edebilirsiniz. Eğer bunu yaparsanız, sizin saatiniz farklı bir hızla işleyecek ve Büyük Patlama dan beri farklı bir zaman geçtiğini bulacaksınız. Bu, son derece gerçekçi bir bakış açısidir ama tümüyle bireycidir: Ölçülmekte olan zaman, özel olarak nerede bulunduğunuzun geçmişine ve hareket durumunuza bağlıdır. Astronomlar evrenin geçmişinden söz ettikleri zamansa evrensel bir şey, her yerde aynı anlama sahip olan bir şey ararlar. Uzaydaki değişimin birörnekliği, bunu yapmanın bir yolunu gösterir.⁹

Aslında, mikrodalga fon ışıınının birörnekliği, uzayın kozmik akışı ile birlikte hareket edip etmediğinizi sınavan, elde hazır olan bir test ortaya koyar. Gördüğünüz gibi, her ne kadar mikrodalga fon ışıını uzayda türdeş ise de, uzayın genişlemesinin getirdiği kozmik akışın ötesinde ek bir hareket yaparsanız, ışıının türdeş olduğunu gözlemezsiniz. Nasıl bir arabanın kornasının sesi yaklaşmakta iken normalden ince, uzaklaşmakta iken ise normalden daha kalın duyulursa, bir roketle uzayda hareket ettiğinizde de roketin ön tarafına doğru gelen mikrodalgaların teppe ve çukurları, roketin arka tarafına gelenlere göre daha yüksek frekanslarda çarparlar. Mikrodalgalarda daha yüksek fre-

kans, daha yüksek sıcaklık demektir, bu yüzden, gittiğiniz doğrultudaki ışıının arkanızdan gelmekte olan ışıından biraz daha yüksek sıcaklıkta olduğunu bulursunuz. Burada, Dünya adlı "uzay gemisinde" de astronomlar, uzayın bir yönündeki mikrodalgaların sıcaklığını, ters yöndekilerden biraz daha yüksek *olarak* ölçüyorlar. Bunun nedeni yalnızca Dünya'nın Güneş çevresinde, Güneş'inse galaksi merkezi çevresindeki hareketi değil, bütün Samanyolu galaksisinin de kozmik genişlemenin üzerinde küçük bir hızla Hydra takımyıldızına doğru hareket ediyor olmasıdır. Ancak astronomlar bu göreceli olarak küçük hareketlerin etkilerini yok edecek düzeltmeleri yaptıktan sonra algıladığımız mikrodalgalar, gökyüzünün bir bölümüyle diğeri arasındaki ışıının sıcaklığının birörnekliğini sergilerler. İşte bütün evreni tarif ederken anlamlı bir şekilde zamandan söz edebilmemize olanak veren, bir konum ve diğeri arasındaki bu birörneklik, bu bütünsel simetridir.

Genişleyen Evrenin Kolayca Fark Edilmeyen Özellikleri

Kozmik genişleme konusundaki açıklamamızın birkaç ince noktası üzerinde durmaya değer. Birincisi, çevremizdeki uzaya baktığımızda gördüğümüz uzay üç boyutlu iken, balon benzetmesinde herhangi bir rol oynayan tek şeyi yalnızca balonun *yüzeyi*, yalnızca iki boyutlu bir yüzey (her nokta Dünya yüzeyindeki enlem ve boylamlara benzeyen iki rakamla belirlenebilir) olduğunu hatırlayın. Gerçek, üç boyutlu öyküdeki temel kavramları korumakla birlikte göz önünde canlandırmak çok daha kolay olduğu için daha düşük boyutlu olan bu modeli kullanıyoruz. Bunu akılda tutmak önemlidir, özellikle de balon modelinde özel bir noktanın bulunduğunu, bunun da balonun şişerken bütün yüzeyinin uzaklaştığı iç hacminin orta noktasının olduğunu söyleme eğilimindeyseniz. Bu gözlem doğru olsa da, balonun yüzeyinde olmayan bir noktanın hiçbir rolü olamayacağından, bu benzetmede anlamsızdır. Balonun yüzeyi *bütün* uzayı temsil eder; balonun yüzeyinde olmayan noktalar yalnızca benzet-

menin ilgisiz yan ürünleri olup evrende herhangi bir yere karşılık gelmezler.*

İkincisi, eğer daha uzaklardaki galaksilerin uzaklaşma hızları da daha büyükse, bu, yeterince uzak olan galaksilerin bizden ışık hızından daha büyük hızlarla uzaklaşıyor olacakları anlamına gelmiyor mu? Cevap, çok net bir evettir. Ama özel görelilikle bir çelişki yoktur. Neden? Çünkü bu, kozmik akış nedeniyle birbirlerinden uzaklaşan saatlerin eşzamanlı olarak kalmalarıyla yakından ilişkilidir. Bölüm 3'te vurguladığımız gibi, Einstein, *uzayda* hiçbir şeyin ışıktan daha hızlı hareket edemeyeceğini gösterdi. Ama galaksiler ortalama olarak uzayda hemen hemen hiç hareket etmezler. Galaksilerin hareketi neredeyse tümüyle *uzayın kendisinin gerilmesi yüzündendir*. Einstein'ın kuramı, uzaydaki iki noktanın -iki galaksinin- birbirlerinden ışık hızından büyük hızlarla uzaklaşacakları şekilde gerilmesini yasaklamaz. Einstein'ın sonuçları, uzayın genişleme hızı çıkarıldıktan sonraki hızlara, uzayın genişlemesinden kaynaklanan hızların ötesindeki hızlara sınırlama getirir. Gözlemler, birbirlerinden uzayın şişmesi nedeniyle uzaklaşan galaksilerin hızları ışık hızını geçebilecek olsa da, kozmik akışla hareket eden tipik galaksiler için böylesi fazladan hareketlerin, özel göreliliğe tam olarak uyan bir şekilde, en alt düzeyde olduğunu doğruluyorlar.*¹

* iki boyutlu balon yüzeyi benzetmesinin ötesine geçerek küresel üç boyutlu bir model yapmak, matematiksel olarak kolay ama profesyonel matematikçi ve fizikçiler için bile göz önünde canlandırması zordur. İçi dolu, parmak delikleri olmayan bowling topuna benzeyen katı bir top düşünme eğiliminde olabilirsiniz. Ama bu, kabul edilebilir bir şekil değildir. Evrenin her yerinin (ortalama olarak) diğer yerleriyle aynı olduğuna inandığımızdan, modeldeki tüm noktaların diğerleriyle eşit olmasını isteriz. Ama bowling topu birbirinden çok farklı noktalara sahiptir: bazıları dış yüzey üzerindedir, bazıları içtedir, birisi ise merkezdedir. Nasıl iki boyutlu bir balon yüzeyi üç-boyutlu küresel bir bölgeyi (balonun içindeki havayı barındıran bölge) çevreliyorsa, kabul edilebilir üç-boyutlu, küresel bir yüzey de dört-boyutlu küresel bir bölgeyi çevrelemek zorundadır. Bu yüzden, dört-boyutlu bir uzayda bulunan bir balonun üç-boyutlu küresel yüzeyi kabul edilebilir bir şekildir. Ama hâlâ el yordamıyla bir görüntü bulmaya çalışıyorsanız, profesyonellerin yaptıklarını yapabilirsiniz: göz önünde canlandırması daha kolay olan düşük-boyutlu örnekleri kullanın. Bunlar hemen bütün temel özelliklerden yoksundur. Biraz daha ileride bir kürenin yuvarlak şeklinin tersine üç boyutlu düz uzayı göz önüne alacağız ve bu düz uzay göz önünde canlandırılabilir.

Üçüncüsü, eğer uzay genişliorsa, bu galaksilerin birbirlerinden uzaklaşmalarının yanı sıra, her galaksinin içinde şişen uzayın galaksinin içindeki yıldızları birbirlerinden uzaklaştıracak; her yıldızın ve her gezegenin içinde şişen uzayın, sizin, benim ve her şeyin içinde şişen uzayın atomları birbirlerinden uzaklaştıracakları; atomların içinde şişen uzayın atom altı parçacıkları da birbirlerinden uzaklaştıracakları anlamına gelmez mi? Kısaca, şişen uzay metre çubuklarımız da aralarında olmak üzere *her şeyin* boyut olarak büyümesine neden olarak, genişlemenin gerçekten olduğunu fark etmemizi olanaksız hale getirmez mi? Cevap: Hayır. Balon ve para modelini yeniden düşünün. Balonun yüzeyi şişerken bütün paralar birbirinden uzaklaşır ama paraların kendileri genişlemez. Elbette eğer galaksileri balon yüzeyine siyah daireler çizmek yoluyla göstermiş olsaydık, balon boyut olarak büyüdüğünde küçük daireler de büyürlerdi. Ama gerçekte neyin olup bittiğini siyah daireler değil, paralar gösterir. Paraların boyutu sabit kalır çünkü içlerindeki çinko ve bakır atomlarını bir arada tutan kuvvetler üzerine tutkalla yapıştırıldıkları balonun genişlerken uyguladığı dışarı doğru çekmeden çok daha güçlüdür. Benzer biçimde atomları bir arada tutan nükleer kuvvetler, kemiklerinizi ve derinizi bir arada tutan elektromanyetik kuvvetler, yıldız ve galaksileri bütün halde ve galaksilerde bir arada tutan kuvvetler, uzayın dışarı doğru şişmesinden daha kuvvetli olduğu için bu nesnelerden hiçbiri genişlemez. Yalnızca en büyük ölçeklerde, tek tek galaksilerden çok daha büyük ölçeklerde uzayın genişlemesi hemen hemen hiç dirençle karşılaşmaz (aralarındaki büyük uzaklıklar yüzünden birbirinden uzakta bulunan galaksiler arasındaki kütleçekimi kuvvetleri görelî olarak küçüktür) ve bu nedenle, böyle süper-galaksilerarası ölçeklerde uzayın şişmesi gök cisimlerini birbirinden uzaklaştırır.

*1 Evrenin genişlemesinin zamanla azaldığına veya arttığına bağlı olarak, bu galaksilerden yayılan ışık Zeno'yu bile gururlandırabilecek bir savaş verebilir: ışık bize doğru ışık hızıyla gelirken, uzayın genişlemesi, ışığın kat etmesi gereken uzaklığı artırarak ışığın bize ulaşmasını engelleyebilir. Ayrıntılar için notlar bölümüne bakınız.¹⁰

Kozmoloji, Simetri ve Uzayın Şekli

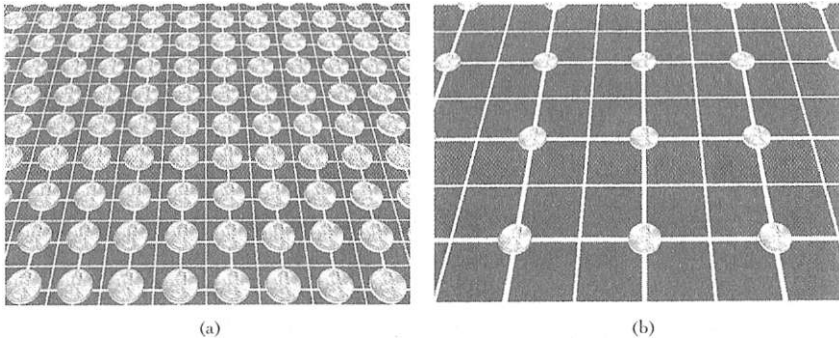
Eğer birisi sizi bir gece yarısı derin uykunuzdan uyandırıp da evrenin şeklini -uzayın tam şeklini- kendisine anlatmanızı istese, cevap vermekte zorlanırdınız. Uyku sersemiyken bile Einstein'ın uzayın bir çeşit oyun hamuruna benzediğini gösterdiğini ve bu yüzden, ilke olarak herhangi bir şekli alabilecek olduğunu bilirdiniz. Bu durumda size bu soruyu soran kişiyi nasıl cevaplardınız? Biz, uzayda yüz milyarlarca benzeri bulunan bir galaksinin dış bölgelerinde, ortalama büyüklükte bir yıldızın çevresinde dolanan küçük bir gezegenin üzerinde yaşıyoruz, bu durumda bütün evrenin şekli hakkında herhangi bir şey bilmeniz nasıl beklenebilir? Uyku sersemliği geçmeye başlayınca yavaş yavaş bir kere daha simetrinin gücünün yardımınıza koştüğünü fark ederdiniz.

Eğer bilim insanlarının, büyük ölçekli ortalamalarda evrendeki bütün konumların ve bütün yönlerin simetrik olarak birbirleriyle bağlantılı olduğu yolundaki yaygın inancını göz önüne alırsanız, soruşturmacınızın size sorduğu soruyu cevaplamaya yakınsınız demektir. Bunun sebebi, bütün şekillerin bazı bölgeleri diğer bölgelerinden esaslı bir biçimde farklı oldukları için, hemen hemen hiçbir şeklin bu simetri ölçütünü *karşılamamasıdır*. Armudun alt tarafı üste göre daha şişkindir; yumurtanın orta tarafları daha yassı, uçları daha sivridir. Bu şekiller bir dereceye kadar simetri gösterse de tam anlamıyla simetrik olmaktan uzaktır. Böyle şekilleri dışarıda bırakarak ve kendinizi yalnızca her bölgenin ve yönün diğerleriyle aynı olduğu şekillerle sınırlandırarak olasılıkları son derece daraltabilirsiniz.

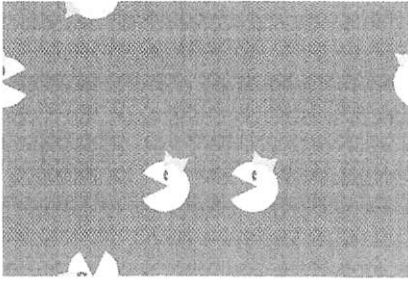
Ölçütü karşılayan bir şekille zaten karşılaşmıştık. Balonun küresel yüzeyi, şişen yüzeydeki paralar arasında simetriyi sağlayan en temel şekildi ve bu yüzden bu şeklin üç-küre adı verilen bir çeşitlemesi, uzayın şeklini temsil edebilecek olan adaylardan biridir. Ama bu da tam bir simetri gösteren tek şekil değildir. Daha kolay göz önüne getirilebilen iki-boyutlu modellerle düşünmeyi sürdürerek, üzerine eşit aralıklarla metal paralar yapııştırılmış olan *sonsuz* genişlikte ve *sonsuz* uzunlukta olan, düm-

düz bir lastik çarşafı düşünün. Bütün çarşaf genişlerken, tam bir uzaysal simetri ve Hubble'ın keşfiyle tam bir tutarlılık sergiler: Şekil 8.4'te görüldüğü gibi her para, diğerlerinin kendisinden, uzaklıklarıyla orantılı bir hızla uzaklaştıklarını görür. Bu nedenle, bunun üç-boyutlu bir çeşitlemesi, yani içine galaksilerin serpiştirildiği, saydam lastikten yapılmış sonsuz genişleyen bir küp, uzayın şekli için bir başka olasılıktır. (Eğer mutfakla ilintili benzetmelerden hoşlanıyorsanız, daha önce söz ettiğimiz sonsuz büyüklükteki bir üzümlü kek hamuru düşünebilirsiniz, hamur küp biçiminde olabilir ama sonsuz büyüklüktedir. Burada üzümler galaksi rolündedir. Pişen kek kabarıyor ve üzümler gittikçe birbirlerinden uzaklaşırlar.) Bu şekle *düz uzay* adı verilir çünkü küresel örnekte olduğu gibi eğriliği yoktur (buradaki "düz"ün anlamı matematikçilerin ve fizikçilerin kullandığı gibidir, benzetme olarak "gözleme şekli" ile pek ilgisi yoktur.)¹¹

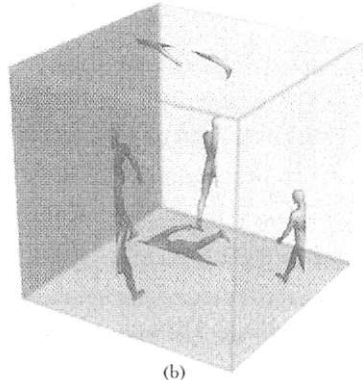
Hem küresel, hem de sonsuz düz şekillerin arasında ortak olan hoş nokta, her ikisinde de sonsuza kadar yürümeniz durumunda bile bir kenara ya da sınıra ulaşamamanızdır. Bu, dikenli birtakım sorulardan kaçınmanıza olanak sağlaması açısından çekicidir: Uzayın kenarının ötesinde ne var? Uzayın sınırında yürürseniz ne olur? Eğer uzayın kenarı veya sınırı yoksa, so-



Şekil 8.4 (a) Sonsuz düz bir yüzey üzerinde herhangi bir paradan bakıldığında görülen manzara, diğerinden görülenlerle aynıdır, (b) Şekli 8.4a'daki paralar birbirinden ne kadar uzaksa, yüzey genişledikçe aralarındaki uzaklıklar da o kadar artar.



(a)



(b)

Şekil 8.5 (a) Bir video oyunu ekranı düzdür ("eğri olmama" anlamında) ve boyutu sınırlıdır, ama "kapandığı" için, bir kenarı veya sınırı yoktur. Matematiksel olarak böyle şekillere *iki-boyutlu* torus adı verilir, (b) Üç-boyutlu torus adı verilen, aynı şeklin *üç boyutlu* çeşitlemesi de düzdür (eğri olmama anlamında), sınırlı hacme sahiptir ama kapandığı için bir kenarı ya da sınırı yoktur. Eğer bir yüzün içinden geçerseniz, diğer yüzden içeri girersiniz.

runun da anlamı yoktur. Ama dikkat ederseniz, iki şekil bu çekici özelliği farklı yollarla gerçekleştiriyor. Eğer küresel olarak şekillendirilmiş uzayda dosdoğru yürürseniz, tıpkı Magellan gibi, hiçbir kenarla karşılaşmadan er geç başladığınız noktaya dönersiniz. Tersine, eğer sonsuz düz uzayda dosdoğru yürürseniz, tıpkı Energizer Bunny gibi hiçbir kenara ulaşmazsınız amil bu kez başladığınız noktaya da hiçbir zaman dönmezsiniz. Bu, eğri ve düz şekillerin geometrileri arasında temel bir farkmış gibi görünüyorsa da, bu anlamda düz uzayın küreye şaşırtıcı derecede benzeyen, basit bir çeşitlemesi vardır.

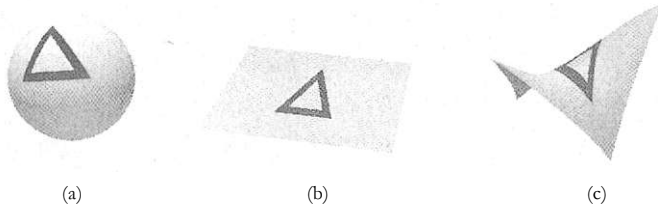
Bunu göz önünde canlandırmak için, ekranın kenarları varmış gibi gözükken ama kenardan aşağı düşemeyeceğiniz için gerçekte kenarları olmayan video oyunlarından birini düşünün: Eğer sağdan kaybolursanız soldan ortaya çıkarsınız; yukarıdan kaybolursanız aşağıdan ortaya çıkarsınız. Ekran, aşağıyla yukarıyı, sağla solu birleştirerek "kapanır"; bu durumda şekil düzdür (eğri değil) ve *sınırlı* boyutludur ama kenarı yoktur. Matematiksel olarak *iki-boyutlu torus* adı verilen bu biçim, Şekil 8.5a'da gösterilmiştir.¹² Bu şeklin üç-boyutlu çeşitlemesi -üç boyutlu torus- uzayın yapısı için olası bir başka şekil ortaya koyar. Bu şek-

li her üç eksen çevresinde kapanan dev bir küp olarak düşünebilirsiniz: Şekil 8.5b'de görüldüğü gibi, üstte yürürken altta ortaya çıkarsınız, arkaya doğru yürürken önde, sola doğru yürürken sağda ortaya çıkarsınız. Böyle bir şekil düzdür -eğri olmama anlamında, yassı olma anlamında değil- her yönde sonludur ama gene de kenarları veya sınırları yoktur.

Bu olasılıkların ötesinde, Hubble'ın uzayın simetrik şişmesi açıklamasıyla tutarlı bir başka şekil daha vardır. Bunu üç boyutta gözde canlandırmak her ne kadar biraz daha zor ise de, küresel örnekte olduğu gibi, iyi bir iki boyutlu benzeri vardır: Pringle's patates cipsinin sonsuz boyutlu şekli. Genelde *eyer* adı verilen bu şekil, bir tür ters küredir: Küre, dışarı doğru simetrik olarak genişlerken, eyer, Şekil 8.6'da görüldüğü gibi, simetrik olarak içeri doğru çökmüştür. Biraz matematiksel dil kullanırsak, kürenin *pozitif eğrilğe sahip* (dışarı doğru şişer), eyerinsene *negatif eğrilğe* sahip (içeri doğru büzülür), düz uzayınsa -sonsuz veya sonlu olsun- *eğrilğe sahip olmadığını* (şişmez ve büzülmez) söyleriz."

Araştırmacılar bu listenin -birörnek pozitif, negatif veya sıfır)- uzaydaki bütün konumlar ve bütün yönler arasında simetri bulunması gerekliliği ile tutarlı, olası eğriliklerinin tamamını oluşturduğunu kanıtlamışlardır. Bu gerçekten hayret vericidir. Sonsuz olasılıkların bulunabileceği bir şey hakkında, *bütün evrenin* şekli hakkında konuşuyoruz. Ama simetrinin büyük gücünü kullanan araştırmacılar, olasılıkları en aza indirebilmişlerdir. Bu yüzden, eğer cevabınıza simetrinin kılavuzluk etmesine izin vererseniz ve eğer gecenin ilerlemiş saatlerinde sizi sorguya çeken kişi bazı tahminlerde bulunmanıza olanak sağlarsa, bu soruyu doğru bir şekilde cevaplayabilirsiniz.¹³

Tıpkı bir video oyunu ekranının kenarları veya sınırları olmayan düz uzayın sonlu-boyutlu bir örneğini oluşturması gibi, eyer şeklinin de kenarları veya sınırları olmayan, sonlu-boyutlu çeşitmeleri vardır. Bunu daha fazla açmayacağım ama, her üç tür eğrilğin de (pozitif, negatif veya sıfır) kenarları veya sınırları olmayan sonlu-boyutlu şekillerle gerçekleştirilebileceğine dikkatinizi çekmek isterim. (O zaman, ilke olarak, Magellan, yapmış olduğu yolculuğun uzaydaki bir benzerini, eğrilği bu olasılıkların herhangi biri ile verilmiş olan bir evrende yapabilirdi.)



Şekil 8.6 Uzak için iki boyutlu benzetmeler kullanırsak, tam anlamıyla simetrik olan -yani biryerden görülen manzaranın diğer yerlerde görülenlerle aynı olduğu- üç tür eğrilik vardır. Bunlar (a) kürede olduğu gibi, dışarı doğru birörnek şişen pozitif eğrilik; (b) sonsuz bir düzlem veya sonlu video oyunu ekranındaki gibi, hiç şişmeyen *sıfır* eğrilik; (c) eyer şeklinde olduğu gibi, içeri doğru birörnek büzülen *negatif* eğrilik.

Buna rağmen, neden uzayın yapısının olası şekillerinin çeşitlenmeleriyle uğraştığımızı merak ediyor olabilirsiniz. Tek bir evrende yaşıyoruz, o zaman neden tek bir şekil belirleyemiyoruz?

Listesini yaptığımız şekiller, evrende bulundukları yerden bağımsız olarak her gözlemcinin, en büyük ölçeklerde aynı evreni görmeleri gerektiği yolundaki inancımızla tutarlı olanlardır. Ama böylesi simetri görüşleri, yüksek oranda seçici olsa da, sonuna kadar giderek tek bir cevabı bulabilmemiz için yeterli olmazlar. Bunun için Einstein'ın genel görelilik denklemlerine ihtiyaç duyarız.

Einstein'ın denklemleri, girdi olarak evrendeki madde ve enerji miktarını alır (simetri görüşleri uyarınca birörnek dağıldığı varsayılmıştır) ve çıktı olarak uzayın eğriliğini verirler. Buradaki güçlük, astronomların on yıllar boyunca, gerçekte ne kadar madde ve enerji bulunduğu konusunda bir fikir birliğine ulaşamamış olmalarıdır. Eğer evrendeki bütün madde ve enerji uzaya birörnek dağıtılmış olsa ve eğer bu yapıldıktan sonra madde yoğunluğunun *kritik yoğunluk* olarak adlandırılan, metreküpte $0,000000000000000000000001$ (10^{-23}) gramdan -her metreküpte yaklaşık beş hidrojen atomu- daha fazla madde bulunduğu anlaşılmış olsa ' Einstein'ın denklemleri uzayın eğriliğinin pozitif ol-

Günümüzde evrende madde ışıınımdan daha bol olduğu için, kritik yoğunluğu maddeyle daha çok ilişkili olarak metreküpte gram olarak vermek daha uygundur. Metreküpte 10^{-23} gram kulağa çok gibi gelmiyorsa da, evrendeki metreküp sayısı çok fazladır. üstelik zamanda geriye doğru baktığınızda, kütle/enerjinin sıkışmış olduğu uzay daha küçük olacağından evrenin yoğunluğu daha büyük olur.

duğu sonucunu verir; eğer maddenin yoğunluğu kritik yoğunluktan azsa, denklemler negatif eğrilik verir; eğer yoğunluk tam olarak kritik yoğunluğa eğitse, o zaman denklemler uzayın eğriliginin sıfır olduğu sonucunu verir. Her ne kadar bu gözlemsel konu henüz tam olarak çözölmemiş olsa da, en rafine veriler uzay için sıfır eğriliciği, düz uzayı işaret ediyor. Ama Enerjizer Bunny'nin aynı yönde sonsuza kadar hareket ederse karanlıkta kayıp mı olacağı, yoksa bir çember çizerek sizi arkadan mı yakalayacağı -uzayın sonsuza kadar devam mı ettiği yoksa bir video ekranı gibi kapanmakta mı olduğu- sorusu tam olarak cevapsızdır.¹⁴

Böyle olsa bile, kozmik yapı konusunda nihai cevap olmadan bile, son derece açık olan şey, simetrimin, bir bütün olarak evrene uygulandığında uzayı ve zamanı kavramamıza olanak veren temel düşünce olduğudur. Simetrimin gücü olmasaydı daha işin başında takılırdık.

Kozmoloji ve Uzay-Zaman

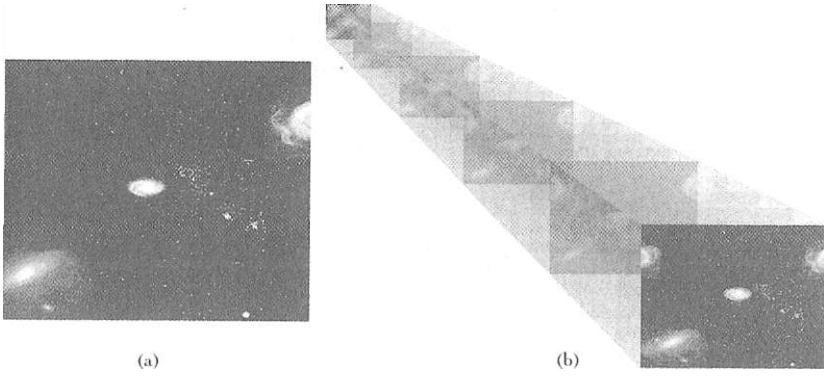
Artık kozmik geçmişi, genişleyen uzay kavramıyla Bölüm 3'teki uzay-zamanın ekmek somunu tanımını birleştirecek açıklayabiliriz. Hatırlayın, ekmek somunu tanımında her dilim -her ne kadar iki boyutlu da olsa- üç boyutlu uzayı, zamanın tek bir anında, belirli bir gözlemcinin bakış açısından göröndüğu şekliyle temsil ediyordu. Farklı gözlemciler somunu göreli hareketlerinin ayrıntılarıyla belirlenen farklı açılarla dilimliyorlardı. Dahil önce karşılaştığımız örneklerde, uzayın genişlemesini dikkate almamış, evrenin yapısının zamanla sabit ve değişmez olduğunu varsaymıştık. Şimdi, kozmik evrimi de işin içine katarak o örnekleri daha rafine hale getirebiliriz.

Bunu yapmak için, uzaya göre durağan durumda olan gözlemcilerin -yani, tıpkı balona yapıştırılmış olan paralar gibi, hareketleri yalnızca kozmik genişlemeden kaynaklanan-gözlemcilerin perspektifini kullanacağız. Birbirlerine göre hareket ediyor olsalar bile, böyle bütün gözlemcilerin arasında simetri vardır -satatleri uyuşur- ve bu yüzden uzay-zaman somununu tam olarak

aynı şekilde dilimlerler. Yalnızca uzayın genişlemesinden kaynaklanan hareketin dışında kalan görelî hareket, bu gözlemlerinin saatlerinin farklı hızlarda çalışmasına neden olur ve bunların uzay-zaman somununu farklı açılarda dilimlemeleriyle sonuçlanır. Aynı zamanda uzayın şeklini de belirlememiz gerekir, bu nedenle, karşılaştırma amacıyla yukarıda incelenen olasılıklardan bazılarını göz önüne alacağız.

En kolay çizilebilecek örnek, düz ve sonlu bir şekil olan video oyunu şeklidir. Şekil 8.7a'da böyle bir evrende bir dilimi, yani şu anda bütün uzayı temsil ettiğini düşünebileceğiniz şematik bir görüntü görüyorsunuz. Basit olsun diye, bizim galaksimizin, Samanyolu'nun şeklin ortasında bulunduğunu düşünelim. Hiçbir konumun ne olursa olsun diğerlerinden hiçbir şekilde farklı olmadığını aklınızdan çıkarmayın. Kenarlar bile yanlısamadır. Üsttarafuzayın bittiği bir yer değildir, çünkü üst taraftan kaybolduğunuzda alt tarafta yeniden ortaya çıkarsınız; benzer şekilde, sol taraftan kaybolunca sağ taraftan yeniden ortaya çıktığınız için sol taraf da uzayın bittiği bir yer değildir. Astronomi gözlemleriyle uzlaştırmak için, her kenar ekranın ortasından itibaren en azından 14 milyar yıl uzunluğunda olmalıdır ama her biri çok daha uzun olabilir.

Dikkat ederseniz biz yıldızları ve galaksileri bu şimdi diliminde çizildikleri gibi göremeyiz, çünkü Bölüm 5'te tartışıldığı gibi, herhangi bir cisimden şimdi yayılan ışığın bize ulaşması zaman alır. Havanın açık olduğu, karanlık bir gecede gökyüzüne baktığınızda gördüğünüz ışıklar çok önce -milyonlarca ve hatta milyarlarca yıl önce- yayılmaya başlamışlar ve ancak şimdi Dünyaya doğru olan uzun yolculuklarını tamamlamış, teleskobumuza girmiş ve uzayın derinliklerinin görkemli görünümüne tanıklık etmemizi sağlamaktadırlar. Uzay genişlediği için, çok uzun zaman önce, bu ışıklar yayılmaya başladığında evren çok daha küçüktü. Bunu, somunun sağ tarafına şu andaki şimdi dilimimizi, sola doğru ise zamanın daha önceki anlarındaki evrenimizi gösteren bir dilimler dizisi koyduğumuz Şekil 8.7b de gösterdik. Gördüğünüz gibi, evrenin giderek daha eski zamanlarına

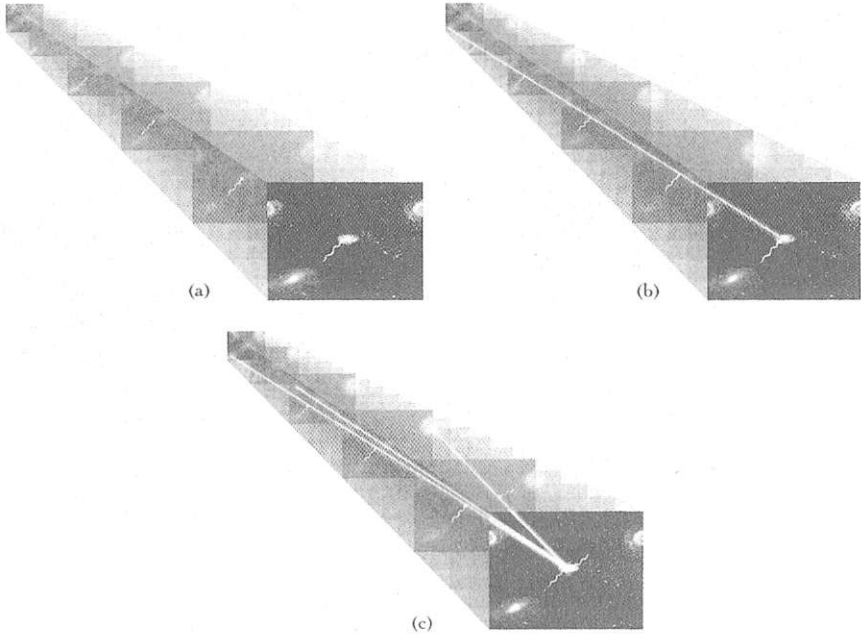


Şekil 8.7 (a) Uzayın düz ve sonlu boyutlu, yani bir video oyunu ekranı gibi şekillenmiş olduğu varsayıldığında uzayı şimdi betimleyen şematik görüntü. Sağ üstteki galaksinin solda yeniden görüldüğüne dikkat edin. (b) Uzayın zamanda evrilmesini betimleyen şematik görüntü. Anlatımın açık olması için birkaç zaman dilimiyle yetinilmiştir. Zamanda geriye baktığımızda, uzayın tam boyutunun ve galaksiler arasındaki uzaklığın azaldığına dikkat edin.

baktığımızda hem uzayın tam boyutu, hem de galaksiler arasındaki uzaklıklar azalır.

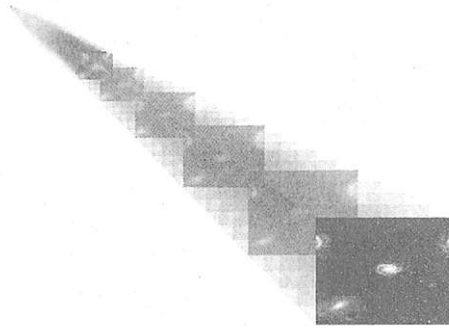
Şekil 8.8'de, belki de bir milyar yıl önce uzak bir galaksinin yaydığı, Samanyolu'nda bize doğru gelmekte olan ışığın geçmişi de görebilirsiniz. Şekil 8.8a daki başlangıç diliminde ışık yayılmaya başlıyor ve izleyen dilimlerde evren gittikçe genişliyor olsa bile, ışığın gittikçe yaklaştığını ve en sağdaki zaman diliminde de sonunda bize ulaştığını görebilirsiniz. Şekil 8.8b'de ışığın yolculuğu sırasında geçtiği her dilimdeki bu konumları birbirine bağlayarak, ışığın uzay-zamandaki yolunu gösterebiliriz. Birçok yönden ışık aldığımızdan, Şekil 8.8c'de çeşitli ışık ışınlarının şimdi bize ulaşmak için geçtikleri yolların örnekleri görülüyor.

Bu şekiller uzaydan gelen ışıkların dramatik bir biçimde, nasıl zaman kapsülü olarak kullanılabileceğini gösteriyor. Andromeda galaksisine baktığımızda, aldığımız ışık 3 milyon yıl kadar önce yayınlanmıştır, bu yüzden Andromedayı uzak geçmişte olduğu gibi görüyoruz. Coma kümesine baktığımız zaman aldığımız ışık 300 milyon yıl kadar önce yayınlanmıştır ve bu yüzden Coma kümesini çok daha eski bir dönemde olduğu gibi görüyo-



Şekil 8.8 (a) Çok uzun zaman önce uzak bir galaksiden yayınlanan ışık, sonraki zaman dilimlerinde gittikçe Samanyolu'na yaklaşıyor, (b) Sonunda uzak galaksiyi gördüğümüzde, bize ulaşan ışık çok önce yayımlandığı için, galaksiye hem uzay hem de zaman üzerinden bakıyoruz demektir. Işığın uzay-zamanda aldığı yol, parlatılmıştır, (c) Bugün gördüğümüz çeşitli uzay cisimlerinin yaydığı ışığın uzay-zamanda izledikleri yollar.

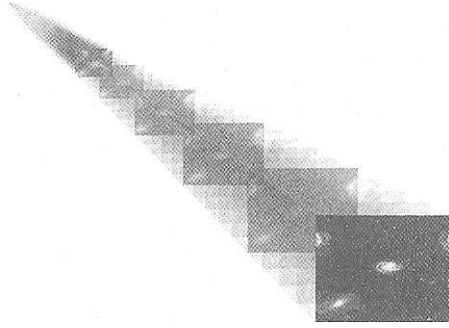
ruz. Eğer şimdi Coma kümesinde bulunan bütün galaksilerdeki bütün yıldızlar süpernova olsalar, biz bu durumdan 300 milyon yıl boyunca haberdar olamayız; ancak bu kadar yıl sonra süpernovalardan yayılan ışık bize ulaşacak zaman bulabilir. Benzer biçimde Coma kümesinde bulunan ve bizim şu anki şimdibilimimizde yer alan bir astronom süper-güçlü bir teleskobu Dünyaya doğru çevirse, birçok eğreltiotu, eklembacaklı ve sü-rüngenlerin atalarını görecekti; Çin Seddini veya Eyfel Kulesi-ni 300 milyon yıl boyunca göremeyecekti. Elbette temel kozmo-loji konusunda çok iyi eğitim almış olan bu astronom, gördük-lerinin Dünya'nın uzak geçmiş olduğunu fark edecek ve kendi uzay-zaman somununda Dünya'nın ilk bakterilerini ait oldukla-rı zaman dilimine yerleştirecekti.



Şekil 8.9 Uzaysal genişlemeden kaynaklanan kozmik akışın ötesinde önemli miktarda hareket eden bir gözlemcinin zaman dilimi

Bunların tümünde hem bizim, hem de Coma kümesindeki astronomun yalnızca uzaysal genişlemeden kaynaklanan kozmik akış nedeniyle hareket ettiği varsayılır çünkü böylelikle, onun uzay-zaman somununu kesiş şeklinin bizimkiyle çakışmasını garantilenmiş olur; onun şimdi-listesinin bizimkiyle uyuşması garanti altına alınır. Bununla birlikte eğer astronomumuz kozmik akışın ötesinde uzayda büyük hızlarla hareket etmeye başlarsa, onun dilimleri Şekil 8.9'daki gibi, bizimkilerle bir açı yapacaktır. Bu durumda, Bölüm 5'teki Chewie'de bulduğumuz gibi, bu astronomun şimdisi bizim geçmiş veya gelecek olarak gördüğümüz zamanla çakışacaktır (bu, ek hareketin bize doğru mu yoksa bizden uzağa doğru mu olduğuna bağlıdır). Ama dikkat ederse-niz, onun dilimleri artık uzaysal olarak türdeş olmayacaktır. Şekil 8.9'daki her açılı dilim, evreni farklı zamanlarda keser ve bu yüzden bu dilimler birörnek olmaktan uzaktır. Bu, kozmik geçmişin tanımlanmasını oldukça karmaşık hale getirir ki, fizikçilerin ve astronomların genelde böylesi perspektiflere sıcak bakmalarının nedeni budur. Onlar bunun yerine, genellikle yalnızca kozmik akış nedeniyle hareket eden gözlemcilerin perspektiflerini göz önüne alırlar, çünkü bu türdeş olan dilimlere yol açar, ama temelde, her bakış noktası, bir diğeri kadar geçerlidir.

Kozmik uzay-zaman somununun daha soluna doğru bakarsak, evren daha küçülür ve daha yoğunlaşır. Nasıl bir bisiklet



Şekil 8.10 Düz ve sonlu boyutlu olan bir evrenin kozmik geçmiş; uzay-zaman "somunu". Tepedeki bulanıklık, evrenin başlangıç dönemindeki kavrayışımızın eksikliğini simgeliyor.

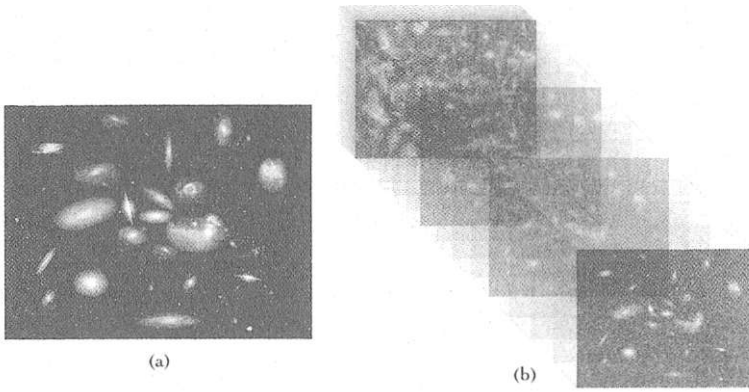
lastiğine hava basmayı sürdürdüğünüzde lastik gittikçe ısınır, uzayın büzülmesi sonucunda madde ve enerji daha fazla sıkıştırıldığı için evren git gide daha fazla ısınır. Eğer başlangıçtan saniyenin on milyonda biri kadar sonrasına gidebilseydik, evrenin yoğunluğu ve sıcaklığı öylesine yüksek olurdu ki, bildiğimiz madde doğanın en temel öğelerinden oluşan bir plazmaya dönüşürdü. Eğer yolculuğumuzu sıfır zamanının kendisine *-Büyük Patlama* anına- kadar sürdürebilseydik, bilinen bütün evren, bu cümlelerin sonundaki noktanın yanında bir dev gibi kaldığı bir boyuta kadar sıkıştırdı. Bu erken dönemlerdeki yoğunluklar öylesine yüksekti ve koşullar öylesine uç değerlerdeydi ki, şu anda sahip olduğumuz en iyi fiziksel kuramlar bile ne olup bittiği konusunda bir fikir veremezdi. Gittikçe daha açık olarak görülecek nedenlerden ötürü yirminci yüzyılda geliştirilen ve çok başarılı olan fizik yasaları böyle uç koşullarda dağılır ve zamanın başlangıcını anlamak için yaptığımız yolculukta bizi dümen-siz bırakır. Yakında, son gelişmelerin umut verici bir deniz feneri gibi davrandığım ama şimdilik, başlangıçta ne olduğu konusundaki eksik kavrayışımızın, kozmik uzay-zaman somununun uzak sol tarafında bulanık bir bölge bırakmak -eski Dünya haritalarındaki bilinmeyen bölgelerin günümüzdeki türü- olduğunu itiraf ettiğimizi göreceğiz. Bu son dokunuşla, Şekil 8.10'da kozmik geçmişin genel bir resmini veriyoruz.

Değişik Şekiller

Şimdiye kadar uzayın bir video oyunu ekranı gibi şekillendiğini varsaydık ama bu öykü, diğer olasılıklar için de aynı özelliklerin çoğuna sahiptir. Örneğin eğer veriler sonunda uzayın şeklinin küresel olduğunu gösterirse, zamanda geriye gittikçe kürenin boyutu küçülür, evren gittikçe daha sıcak ve daha yoğun bir hale gelir ve sıfır anında bir tür Büyük Patlama başlangıcıyla karşılaşırız. Küreler birbirlerinin yanında düzgün bir biçimde sıralanamayacakları için (örneğin, her dilimin öncekini çevreleyen bir küre olduğu bir "küresel somun düşünebilirsiniz), Şekil 8.10'dakine benzeyen bir resim çizmek zordur amil grafik karmaşıklıkların ötesinde fizik büyük ölçüde aynıdır.

Sonlu düz uzayla sonsuz eyer şeklindeki uzayın ortak özellikleri olmakla birlikte bir temel özellik bakımından birbirlerinden ayrılırlar. Kesitlerin sonsuza kadar uzanan düz uzayı temsil ettiği Şekil 8.1 1 e bir göz atın (elbette bunların yalnızca bir bölümünü gösterebiliyoruz). Daha eski zamanlara baktıkça uzay büzülür; Şekil 8.1 lb'de zamanda geriye baktıkça galaksiler gittikçe birbirlerine yaklaşır. Bununla birlikte uzayın tam boyutu aynı kalır. Neden? Sonsuz tuhaf bir şeydir. Eğer uzay sonsuzsa ve siz bütün uzaklıkları yarıya düşürürseniz, uzayın boyutu sonsuzun yarısı olur ki bu da hâlâ sonsuzdur. Bu yüzden, zamanda geriye doğru baktıkça, her şey birbirine yaklaşır ve yoğunluklar gittikçe yükselirse de, evrenin tam boyutu sonsuz olarak kalır; her şey sonsuz uzaysal genişleme sonucunda her yerde yoğunlaşır. Bu da farklı bir Büyük Patlama görüntüsüne yol açar.

Normal olarak evrenin kabaca dış uzay ve zamanın olmadığı Şekil 8.10'daki gibi bir nokta olarak başladığını varsayabiliriz. O zamanlar bir çeşit patlamayla uzay ve zaman, sıkıştırılmış biçimlerinden açılmaya başladılar ve genişleyen evren ortaya çıktı. Ama eğer evren, uzaysal olarak sonsuzsa, *zaten Büyük Patlama anında sonsuz bir uzaysal genişleme vardı*. Bu başlangıç anında enerji yoğunluğu patlarcasına arttı ve hiçbir şeyle karşılaştırılamayacak ölçüde yüksek sıcaklıklara ula-



Şekil 8.11 (a) Galaksilerin doldurduğu düz uzayın şematik gösterimi, (b) İlk dönemlerde uzay büzülür -bu yüzden ilk dönemlerde galaksiler birbirlerine daha yakındı- ama sonsuz uzayın tam boyutu sonsuz kalmaya devam eder. İlk dönemlerde ne olduğu konusundaki bilgisizliğimiz bulanık bölgeyle gösteriliyor ama burada burada bu bölge uzayın sonsuz genişliğince uzanıyor.

şildi, ama bu uç koşullar yalnızca bir noktada değil, her yerde vardı. Bu durumda Büyük Patlama tek bir noktada oluşmadı, Büyük Patlama sonsuz uzaysal genişlikte her yerde birden oluştu. Bunu klasik, tek bir noktadaki başlangıç ile karşılaştırsak, sanki uzaysal genişliğin her noktasında birçok Büyük Patlama olmuş gibidir. Büyük Patlama dan sonra uzay şişmeye başladı ama tam boyutu büyümedi çünkü zaten sonsuz olan bir şey daha fazla büyüyemez. Şekil 8.1 lb'ye soldan sağa doğru baktığınızda göreceğiniz gibi, artan şey, (oluştuktan sonra) galaksi gibi cisimlerin arasındaki uzaklıklardı. Sizin ya da benim gibi bir galaksiden veya diğerinden bakan bir gözlemci, etraftaki galaksilerin, tıpkı Hubble'ın keşfettiği gibi uzaklaştığını görürdü.

Sonsuz düz uzayın akademik olmanın ötesinde olduğunu aklınızdan çıkarmayın. Uzayın tam şeklinin eğri olmadığı konusunda çok miktarda kanıt bulunduğunu göreceğiz ve henüz düz uzayın video oyun ekranı şeklinde olduğu yolunda bir kanıt bulunmadığı için, düz, sonsuz büyüklükteki uzaysal şekil, uzay-zamanın büyük ölçekli yapısının öncüsüdür.

Kozmoloji ve Simetri

Simetri düşünceleri modern kozmoloji kuramının gelişmesinde açıkça vazgeçilmez olmuştur. Zamanın anlamı, bir bütün olarak evrene uygulanabilirliği, uzayın tam şekli ve hatta altında yatan genel görelilik yapısı, hepsi de simetri üzerinde temellenir. Bu durumda bile, simetri düşüncelerinin evrilen evreni haberdar ettiği başka bir yol daha vardır. Tarihi boyunca evrenin sıcaklığı, Büyük Patlama'nın hemen ertesindeki vahşi sıcaklıklardan bugün uzayın derinliklerinde ölçebileceğiniz mutlak sıfırın birkaç derece üzerindeki çok düşük sıcaklıklara kadar devasa miktarlarda değişmiştir. Önümüzdeki bölümde açıklayacağım gibi, ısı ve simetrinin kritik karşılıklı bağımlılığı yüzünden, bugün görmekte olduğumuz şeyler, büyük olasılıkla evrenin ilk dönemlerini yapısal olarak kalıba dökmüş olan çok daha zengin bir simetrinin soğumuş kalıntısı olup, evrenin en temel ve en tanıdık özelliklerinden bazılarını belirlemiştir.

Boşluğun Buharlaşması

Sıcaklık, Hiçlik ve Birleşme

Evrenin genel yapısı ile ilgilenen bir haberci, evren tarihinin yüzde doksan beşinden fazlası boyunca aşağı yukarı aynı haberi geçmeyi sürdürürdü: *Evren genişlemeye devam ediyor. Madde genişleme nedeniyle yayılmayı sürdürüyor. Evrenin yoğunluğu hâlâ azalıyor. Sıcaklık düşmeye devam ediyor. Çok büyük ölçeklerde evren simetrik, türdeş görünümünü koruyor.* Tüm evreni özetlemek her zaman bu kadar kolay olmamıştı. İlk aşamalar, telaşlı ve heyecanlı bir habercilik gerektirili kılardı çünkü bu dönemde evren hızla değişiyordu. Biz şimdi biliyoruz ki, o zaman olup bitenler, bugün yaşadıklarımızda çok önemli roller oynamışlardır.

Bu bölümde, evrende somutlaşan simetrinin keskin bir biçimde değiştiğine inanılan ve her değişimin kozmik tarihe yeni bir bölüm eklediği, Büyük Patlama dan saniyenin bir kesri kadar sonraki kritik anlara odaklanacağız. Habercimiz artık aynı bir-

kaç satırı rahat rahat, birkaç milyar yılda bir fakslıyor olsa da, simetrisinin keskin bir biçimde değiştiği ilk anlarda işi çok daha zordu, çünkü maddenin temel yapısı ve onun davranışını yöneten kuvvetler tam anlamıyla yabancıydı. Bunun nedeni ısı ve *simetri* arasındaki karşılıklı etkileşime bağlı olup, boş uzay ve hiçlik kavramlarıyla ne demek istediğimizi yeni baştan düşünmemizi gerektirir. Göreceğimiz gibi, bu yeniden düşünme, evrenin ilk anları konusundaki kavrayışımızı zenginleştirmekle kalmaz, bizi, geçmişi Newton, Maxwell ve özellikle Einstein'a kadar giden bir rüyayı *-birleştirme* rüyasını- gerçekleştirmeye bir adım daha yaklaştırır. Bu gelişmelerin, en modern kozmolojik yapı olan ve en baskıcı soruların bazılarıyla birlikte karşılarında standart Büyük Patlama modelinin bile sessiz kaldığı en çapraşık bilmecelelere cevap bulan şişme kozmolojisine sahneyi hazırlamış olması da aynı derecede önemlidir.

Isı ve Simetri

Bazı şeyler çok ısındıklarında veya soğuduklarında, zaman zaman değişirler. Bazen bu değişim o kadar belirgin olur ki, başlangıçtaki şeyleri sonradan tanıyamazsınız bile. Büyük Patlama dan hemen sonra ortaya çıkan kavurucu koşullar ve uzayın genişleyip soğumasıyla ortaya çıkan hızlı sıcaklık düşüşü nedeniyle, sıcaklık değişiminin nedenlerini anlamak, evrenin erken dönem tarihi ile uğraşmada hayati bir öneme sahiptir. Ama işe basit biçimde başlayalım. Buzdan başlayalım.

Eğer çok soğuk bir buz parçasını ısıtırsanız, başlangıçta çok fazla şey olmaz. Her ne kadar sıcaklığı yükselse de, görünümü hemen hemen aynı kalır. Ama sıcaklığını 0 derece Celsius'a kadar yükseltip ısıtmaya devam ederseniz, aniden dramatik bir şey olur. Katı buz ergimeye başlar ve sıvı suya dönüşür. Bu geçişin bilindik olması, olayın önemsiz olduğu anlamına gelmez. Daha önce buz ve suyla ilgili deneyimlerimiz olmasa, bunların arasındaki yakını ilişkiyi anlamak çok zor olurdu. Biri kaya gibi sert, diğeri ise akıcı bir sıvı. Basit bir gözlemlerle bunların her ikisinin de molekül yapısının aynı olduğu, H_2O olduğu yolunda doğru-

dan bir kanıta ulaşamaz. Eğer daha önceden hiç buz ve su görmemiş olsaydınız ve size her ikisinden de birer miktar verilseydi, başlangıçta büyük olasılıkla bunların birbirleri ile ilişkili olmadığını düşünürdünüz. Ama bunlardan biri 0 derece Celsius sınırını geçtiğinde, mucizevi bir simya sonucunda diğerine dönüştüğüne tanık olurdunuz.

Sıvı suyu ısıtmaya devam ederseniz, gene bir süre sıcaklığın yükselmesi dışında çok fazla bir şey olmadığını görürsünüz. Ama sonra, 100 derece Celsius'a ulaştığınızda, bir başka keskin değişim olur: Sıvı su kaynamaya ve buhara, gene sıvı suyla ve katı buzla bağlantısı pek açık olmayan sıcak bir gaza dönüşmeye başlar. Elbette bunların her üçünün de molekül bileşimi aynıdır. Katıdan sıvıya ve sıvıdan gaza olan değişimler *faz geçişleri* olarak bilinirler. Sıcaklıkları yeterince yüksek bir aralıkta değiştirilen çoğu madde, benzer değişimler gösterirler.¹

Simetri, faz geçişlerinde temel bir rol oynar. Hemen hemen her durumda, eğer bir şeyin faz geçişinden önceki ve sonraki simetri durumlarını uygun bir yöntemle karşılaştırsak, önemli bir değişiklik buluruz. Örneğin moleküler düzeyde buz, H_2O moleküllerinin düzenli, altıgen bir kafes üzerinde yer aldığı kristal bir yapıya sahiptir. Şekil 8.1 deki kübün simetrisi gibi, buz moleküllerinin tam deseni bazı özel değiştirmeler, örneğin altı yüzlü yapının özel eksenlerinin etrafındaki 60 derecelik dönmelerle değişmez olarak kalır. Tersine, buzu ısıttığımızda kristal yapı eriyerek, herhangi bir eksen etrafındaki bütün dönmeler sonucunda değişmez olarak kalan bir örnek molekül yığınlarına -su-ya dönüşür. Bu yüzden buz ısıtılarak ve katıdan sıvıya faz geçişi yapması sağlanarak daha simetrik hale getirilebilir. (Her ne kadar sezgisel olarak, örneğin buz gibi daha düzenli olan bir şeyin daha simetrik olduğunu düşünürsek de, bunun tam tersi doğrudur; herhangi bir şey eğer dönme gibi bir dönüşüme maruz kaldığında görünüşü aynı kalıyorsa daha simetridir.)

Benzer şekilde, suyu ısıtarak buhara dönüştürdüğümüzde de faz geçişi gene simetri artışıyla sonuçlanır. Bir su yığıncığında H_2O molekülleri ortalama olarak, bir molekülün hidrojen tarafı

komşu molekülün hidrojen tarafına gelecek şekilde konumlanırlar. Bir yığındaki bir molekülü veya diğerini döndürürseniz, moleküler deseni gözle görünür şekilde bozarsınız. Ama su kaynayıp buhara dönüştüğünde moleküller şurada burada dolaşırlar; artık H_2O moleküllerinin duruşlarında herhangi bir desen kalmaz ve böylece eğer bir molekülü veya molekül grubunu döndürürseniz, gazın görünümü aynı kalır. Bu yüzden, nasıl buzun suya dönüşmesi simetri artışıyla sonuçlanıyorsa, suyun buhara dönüşmesi de aynı şekilde simetride bir artışla sonuçlanır. Çoğu (ama tümü değil²) madde, katıdan sıvıya ve sıvıdan gazla faz geçişlerinde simetri artışı sergileyerek benzer biçimde davranır.

Suyu veya herhangi başka bir maddeyi soğuttuğumuzda da öykü neredeyse aynıdır, yalnızca olaylar ters yönde gelişir. Örneğin, gaz biçimindeki buharı soğutursanız başlangıçta neredeyse hiçbir şey olmaz ama sıcaklık 100 derece Celsius'a düştüğünde buhar ansızın sıvı suya yoğunlaşmaya başlar; sıvı suyu soğuttuğunuzda 0 dereceye ulaşana kadar pek bir şey olmaz, bu anda ise aniden donarak katı buza dönüşmeye başlar. Simetrilerle ilgili olarak aynı düşünüş mantığını izleyerek -ama ters yönde- bu her iki faz geçişine de simetride bir *azalmanın* eşlik edeceği sonucuna varırız.

Buz, su, buhar ve bunların simetrileri hakkında sanırım bu kadarı yeter. Bütün bunların kozmolojiyle ne ilgisi var? 1970'lerde fizikçiler yalnızca evrenin içindeki cisimlerin değil, *evrenin kendisinin de faz geçişleri sergileyebileceğini* fark ettiler. Geçen 14 milyar yıl süresince, evren sürekli olarak genişledi ve basıncı düştü. Nasıl basıncı düşen bisiklet lastiği soğursa, genişleyen evrenin sıcaklığı da sürekli bir biçimde düştü. Sıcaklığın düştüğü bu sürenin çoğunda çok şey olmadı. Ama evren -su için 0 derece ve 100 derece Celsius'a karşılık gelen- özel kritik sıcaklıklardan geçerken kökten değişikliklere maruz kaldı ve çok büyük bir simetri azalması yaşadı. Birçok fizikçi şu anda evrenin

Simetrinin azalması daha az değişikliğin fark edilmeyeceği anlamına geliyorsa da, bu dönüşümler sırasında çevreye salınan ısı, bütün entropinin -çevreyi de dahil ederek- artmasını garanti altına alır.

"çökelti" veya "donmuş" bir evresinde, önceki dönemlerden çok farklı bir evrede yaşadığımıza inanıyorlar. Her ne kadar, çok daha bilindik örneklerle birçok nitel benzerlikleri varsa da, kozmolojik faz geçişleri tam olarak bir gazın sıvıya yoğunlaşması veya bir sıvının katıya dönüşmesi şeklinde değildir. Evren soğuyarak özel sıcaklıklardan geçerken çökekleşen veya donan "madde" bir alandır, daha doğrusu *Higgs alanıdır*. Bunun ne anlama geldiğini görelim.

Kuvvet, Madde ve Higgs Alanları

Modern fiziğin yapısının çoğunu alanlar oluşturur. Bölüm 3'te incelenen elektromanyetik alan, doğadaki alanlar arasında belki de en basiti ve değeri en çok anlaşılmış olandır. Radyo ve televizyon yayınları, hücresel telefon haberleşmeleri, güneşin sıcaklığı ve ışığı arasında yaşarken sürekli olarak elektromanyetik alanlar denizinde yıkınıyoruz. Fotonlar elektromanyetik alanların temel bileşenleridir ve elektromanyetik kuvvetin mikroskopik ileticileri olarak düşünülebilirler. Bir şey gördüğünüz zaman onu, gözünüze girerek retinanızı etkileyen bir elektromanyetik dalga alanı veya gene gözünüze girerek aynı şeyi yapan foton parçacıkları olarak düşünebilirsiniz. Bu nedenle, foton kimi zaman elektromanyetik kuvvetin *haberci parçacığı* olarak da bilinir.

Kütleçekimi alanını da yakından biliriz çünkü o bizi ve çevremizdeki her şeyi sürekli olarak yeryüzüne bağlar. Tıpkı elektromanyetik alanlarda olduğu gibi, hepimiz bir kütleçekimi alanları denizinde yüzüyoruz. Bu alanlar arasında Dünya'nınki başattır ama biz aynı zamanda Güneş'in, Ay'ın ve diğer gezegenlerin kütleçekimi alanlarını da hissediyoruz. Nasıl fotonlar elektromanyetik alanı oluşturan parçacıklarsa, fizikçiler *gravitonların* da kütleçekimi alanını oluşturan parçacıklar olduklarına inanıyorlar. Graviton parçacıkları henüz deneysel olarak keşfedilmedi ama bu şaşırtıcı değil. Kütleçekimi, kuvvetler arasında uzak ara en zayıf olanıdır (örneğin buzdolabına tutturulan sıradan bir mıknatıs bir toplu iğneyi çekerek *bütün* yerkürenin kütleçekimi alanını yenebilir) ve bu yüzden deneycilerin, kuvvetle-

rin en zayıfının en küçük bileşenini henüz bulamamış olması kolaylıkla anlaşılabilir. Deneysel doğrulama olmadan bile çoğu fizikçi, tıpkı fotonların elektromanyetik alanı ilettikleri gibi (bunlar elektromanyetik kuvvetin haberci parçacıklarıdır) gravitonların da kütleçekimi alanını ilettiklerine inanırlar (bunlar da kütleçekimi kuvvetinin haberci parçacıklarıdır). Bir bardağı elinizden düşürürseniz, bu olayı kütleçekimi alanının bardağı çekmesi veya Einstein'ın çok daha rafine geometrik tanımını kullanarak, bardağın, uzay-zamanın yapısında Dünya'nın varlığı tarafından oluşturulan olukta kayması olarak veya -eğer gravitonlar gerçekten varsa- graviton parçacıklarının bardakla Dünya arasında değiş-tokuş edilerek, bardağa Dünyaya doğru düşmesini "söyleyen" "mesajı" iletmeleri olarak düşünebilirsiniz.

Bu iyi bilinen kuvvet alanlarının ötesinde doğanın *güçlü nükleer kuvvet* ve *zayıf nükleer kuvvet* olarak bilinen iki kuvvet çilesini daha vardır ve bunlar da etkilerini alanlar yoluyla iletirler. Nükleer kuvvetler yalnız atom ve atom-altı ölçeklerinde etkili oldukları için elektromanyetizma ve kütleçekimine göre daha az tanınırlar. Bu durumda bile, Güneş'in parlamasının nedeni olan nükleer füzyon, nükleer güç reaktörlerindeki nükleer parçalanma (filyon) ve uranyum ve plütonyum gibi elementlerin radyoaktif bozunması düşünülecek olursa, bu kuvvetlerin gündelik hayatımızdaki etkileri hiçbir şekilde daha az önemli değildir. Güçlü ve zayıf nükleer kuvvet alanları, 1950'lerde bunların kuramsal yapıları üzerinde çalışan C. N. Yang ve Robert Mills'e atfen *Yang-Mills alanları* olarak bilinirler. Nasıl elektromanyetik alan fotonlardan oluşuyorsa ve kütleçekimi alanının gravitonlardan oluştuğuna inanılıyorsa, güçlü ve zayıf alanların da parçacık bileşenleri vardır. Güçlü kuvvetin parçacıkları *gluon*, zayıf kuvvetin parçacıkları ise W ve Z parçacıkları olarak bilinirler. Bu kuvvet parçacıklarının varlığı 1970'lerin sonu ve 1980'lerin başında Almanya ve isviçre'de yürütölen hızlandırıcı deneyleriyle kanıtlanmıştır.

Alan yapısı maddeye de uygulanır. Kabaca ifade edersek, kuantum mekaniğinin olasılık dalgaları bir madde parçacığı veya

diğerinin bir konumda veya diğerinde bulunma olasılığını veren ve uzayı kaplayan alanlar olarak düşünülebilirler. Örneğin, bir elektron, parçacık olarak -Şekil 4.4'te olduğu gibi fosfor ekranda nokta iz bırakan bir parçacık olarak- düşünülebilir ama aynı zamanda Şekil 4.3b'de olduğu gibi, fosfor ekrandaki girişim desenine katkıda bulunan, dalgalanan bir alan olarak da düşünülebilir (ve düşünülmelidir de).⁵ Aslında, her ne kadar burada daha fazla ayrıntıya girmeyeceksem de,⁴ bir elektronun olasılık dalgası, *elektron alanı* -pek çok bakımdan elektromanyetik alana benzeyen ama elektron alanının en küçük bileşeni olarak elektronun fotona benzer bir rol oynadığı alan- ile yakından bağlantılıdır. Aynı alan tanımı madde parçacıklarının bütün diğer türlerine de uygulanır.

Artık hem madde alanlarını hem de kuvvet alanlarını incelediğimize göre, her şeyi kapsadığımızı düşünebilirsiniz. Ama şimdiye kadar anlatılan öykünün henüz tamamlanmış olmadığı konusunda genel bir fikir birliği vardır. Birçok fizikçi, deneysel olarak hiçbir zaman saptanamamış olan ama son yirmibeş-otuz yıldır hem modern kozmoloji düşüncesinde, hem de temel parçacık fiziğinde önemli roller oynayan, üçüncü tür bir alanın varlığına güçlü bir şekilde inanıyor. Bu akına İskoç fizikçi Peter Higgs'e atfen Higgs alanı adı verilir.⁵ Ve eğer önümüzdeki altbölümdeki düşünceler doğruysa, bütün evren, sizi, beni ve karışlaştığımız her şeyi oluşturan parçacıkların birçok özelliğinden sorumlu olan bir Higgs alanı okyanusu -Büyük Patlama'nın soğuk bir kalıntısı- içinde yüzmektedir.

Soğuyan Bir Evrendeki Alanlar

Alanlar sıcaklığa, tıpkı sıradan maddenin verdiği gibi tepki verirler. Sıcaklık ne kadar artarsa, bir alanın değeri -tıpkı hızla kaynamakta olan bir kap suyun yüzeyi gibi- o kadar şiddetle dalgalanır. Günümüzde uzayın tipik sıcaklığı olan dondurucu soğukta (mutlak sıfırın üzerinde 2.7 derece veya genel olarak 2.7 Kelvin olarak gösterilir) ya da Dünya'mızdaki daha yüksek sıcaklıklarda alan dalgalanmaları veya salınımları çok kü-

çüktür. Ama Büyük Patlama'nın hemen ertesinde sıcaklık öylesine yüksekti ki Büyük Patlama dan 10^{-43} saniye sonra sıcaklığın 10^{32} Kelvin olduğu düşünülüyor- bütün alanlar son derece şiddetli bir biçimde salınıyordu.

Evren genişleyip soğudukça, başlangıçtaki devasa madde ve ışı nım yoğunlukları sürekli olarak azalmaya, evrenin dev boyutlu boşlukları gittikçe daha boşalmaya ve alan salınımları gittikçe küçülmeye başladı. Pek çok alan için bunun anlamı, bu alanların ortalama değerlerinin sıfıra yaklaşmasıdır. Herhangi bir anda belirli bir alanın değeri sıfırın hafifçe üstüne çıkabilir (tepe) ve bir an sonra sıfırın biraz altına düşebilir (çukur) ama ortalama olarak çoğu alanın değeri sıfıra yakın kalır, ki biz sıfır değerini sezgisel olarak yokluk veya boşlukla özdeşleştiririz.

Higgs alanının işe karıştığı yer, işte burasıdır. Araştırmacılar Higgs alanının Büyük Patlama dan hemen sonraki kavurucu sıcaklıklarda diğer alanlara benzer özellikler gösteren, şiddetle aşağı-yukarı salınan bir tür alan olduğunu anladılar. Ama araştırmacılar, (nasıl sıcaklığı yeterince düştüğü zaman buhar, yoğunlaşarak sıvı suya dönüşüyorsa) evrenin sıcaklığı yeterince düştüğünde, Higgs alanının da bütün uzayda *sıfırdan farklı* değerine doğru çökeldiğine inanıyorlar. Fizikçiler buna *sıfırdan farklı Higgs alanı boşluk beklenti değeri* (yani Higgs çökeleği) oluşması adını verirler, ama teknik dili biraz rahatlatmak için ben buna *Higgs okyanusunun* oluşumu adını vereceğim.

Bu biraz Şekil 9.1a'daki gibi, ortasında kurtçukların bulunduğu sıcak, küresel, metal bir kâseye düşen kurbağanın davranışına benzetilebilir. Başlangıçta kurbağa bacaklarını yanmaktan korumak için can havliyle şuraya buraya sıçrayarak ortalama olarak kâsenin ortasından ve kurtçuklardan uzak kalır, hatta onların orada olduklarının farkına bile varmaz. Ama kâse soğuyunca kurbağa sakinleşir, artık sıçramaz, kâsenin ortasına doğru kayar ve Şekil 9.1b'deki gibi, orada akşam yemeğini bulur.

Ama eğer kâse, Şekil 9.1c'deki gibi, farklı biçimde olsaydı, her şey daha farklı olurdu. Gene başlangıçta kâsenin çok sıcak olduğunu ve kurtçukların gene kâsenin ortasında, ama bu



(a)

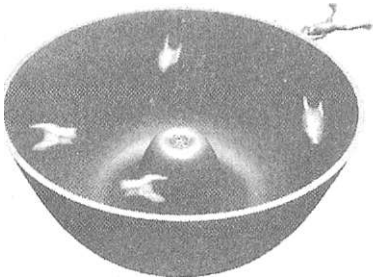


(b)

Şekil 9.1 (a) Sıcak, metal bir kâseye bırakılan kurbağa, aralıksız bir şekilde sıçrar, (b) Kâse soğuduğu zaman kurbağa sakinleşir, daha az sıçrar ve kâsenin ortasına kayar.

kez merkezdeki küçük bir tepenin üzerinde olduğunu varsayın. Kurbağayı içeri bıraktığınızda gene hızla oraya buraya sıçrar ve ortadaki tepede bulunan ödülünden habersiz kalır. Sonra, kâse soğuyunca, kurbağa sakinleşerek daha az sıçramaya başlar ve kâsenin düz kenarlarından aşağı kayar. Ama yeni biçim yüzünden, kurbağa hiçbir zaman kâsenin merkezine ulaşamaz. Kâsenin vadi bölümüne kayarak Şekil 9.1d'deki gibi kurtçuklardan uzak kalır.

Eğer kurbağayla kurtçukların arasındaki uzaklığın, alanın değerini -kurbağa kurtçuklardan ne kadar uzaksa, alanın değeri



(c)



(d)

Şekil 9.1 (c) Aynen (a)'daki gibi, ama sıcak kâsenin biçimi değişik, (d) Aynen (b)'deki gibi, ama şimdi kâse soğuduğunda, kurbağa bir vadiye doğru kayar ki burası da kâsenin ortasından (kurtçukların bulunduğu yerden) belli bir uzaklıktadır.

de o kadar büyüktür- ve kurbağanın yüksekliğinin o alan değerindeki enerjiyi temsil ettiğini varsayarsak -kâsenin içinde kurbağa ne kadar yüksekteyse, alan da o kadar fazla enerji içerir- o zaman bu örnekler, evren soğudukça alanların sergiledikleri davranışlara benzetilebilir. Evren sıcakken alanlar, tıpkı kâsenin içindeki kurbağanın bir yerden diğerine sıçradığı gibi, şiddetle bir değerden diğerine sıçrar. Evren soğudukça alanlar "sakinleşirler", daha seyrek ve daha sakin sıçramaya başlarlar ve değerleri aşağıya, düşük enerjilere kayar.

Önemli nokta işte buradadır. Kurbağa örneğinde olduğu gibi, nitel olarak farklı sonuçların ortaya çıkma olasılığı vardır. Eğer alanın enerji kâsesinin şekli -ki buna *potansiyel enerji* denir- Şekil 9.1a'dakine benziyorsa, alanın uzaydaki değeri, tıpkı kurbağanın kurtçukların bulunduğu yere kadar kayması gibi, kâsenin merkezine kadar, sıfıra kadar düşecektir. Ama eğer alanın potansiyel enerjisi Şekil 9.1c'dekine benziyorsa, alanın değeri sıfıra kadar, enerji kâsesinin merkezine kadar düşmeyecektir. Tıpkı kurbağanın kurtçuklardan *sıfırdan* farklı bir miktar uzaklıktaki vadiye kayması gibi, alanın değeri de vadiye -kâsenin merkezinden *sıfırdan farklı* bir miktar uzaklıktadır- kayacaktır ki bunun anlamı alanın *sıfırdan farklı* bir değer alacağıdır.⁶ Bu son davranış biçimi Higgs alanlarının karakteristiğidir. Evren soğudukça bir Higgs alanının değeri de vadiye takılır ve hiçbir zaman sıfıra düşmez. Bu tarif ettiğimiz şey birörnek bütün uzayda olacağından, evren, birörnek ve sıfırdan farklı bir Higgs alanı -bir Higgs okyanusu- içinde yüzer.

Bunun oluş nedeni, Higgs alanlarının temeldeki tuhaflığına ışık tutar. Uzayın bir bölgesi soğuyup boşaldıkça -madde ve ısı- nım daha dağınık hale geldikçe- o bölgedeki enerji de giderek azalır. Bunu sınır değerlere kadar götürürsek, enerjisini düşürebildiğiniz kadar düşürdüğünüz zaman, uzayın olabilecek en boş bölgesine ulaşmışsınız demektir. Uzayın bir bölümünü kaplayan sıradan alanlar için, Şekil 9.1b'deki gibi, değerleri kâsenin ortasına kadar kaydığı zaman bunların enerji katkısı en düşüktür; yani değerleri sıfır olduğunda enerjileri de sıfırdır. Bu da iyi

ve sağduyuya uygun bir anlam ifade eder, çünkü biz de uzayın bir bölümünü boşaltmayı, alan değerleri de bunun içinde olmak üzere her şeyi sıfıra eşitlemekle ilişkilendiririz.

Ama bir Higgs alanı için her şey farklı işler. Nasıl bir kurbağa Şekil 9.1c'deki gibi, ancak çevredeki vadiden sıçrayabilmek için yeterli enerjiye sahip olduğu takdirde merkezi bir düzlüğe ulaşabilir ve kurtçuklarla sıfır uzaklığa ulaşabilirse, Bir Higgs alanı da ancak kâsenin merkezindeki tepeyi aşacak kadar enerji taşıdığı takdirde kâsenin merkezine ulaşabilir ve *sıfır* değerini alabilir. Eğer, tersine, kurbağanın enerjisi çok azsa ya da yoksa, Şekil 9.1d'deki gibi, vadiye -kurtçuklardan *sıfırdan farklı* bir uzaklığa- kadar kayacaktır. Benzer biçimde, enerjisi çok az veya sıfır olan bir Higgs alanı da kâsenin vadi bölümüne -kâsenin merkezinden sıfırdan farklı bir uzaklık- kadar kayacak ve bu yüzden de *sıfırdan farklı* bir değer alacaktır.

Bir Higgs alanını sıfır değerini -bölgeden bir alanı tümüyle boşaltmak için yaklaşabilecek gibi görüldüğünüz en yakın değer, hiçlik değerine ulaşmak için yaklaşabilecek gibi görüldüğünüz en yakın değer- almaya zorlamak için, enerjisini *yükseltmek* zorundasınız ve enerji cinsinden konuşursak, bu durumda, uzayın o bölgesi olabileceği kadar boş olmayacaktır. Kulağa çelişkili gibi gelse de, Higgs alanını yok etmek -yani değerini sıfıra düşürmek- o bölgeye enerji vermekle aynı anlamdadır. Ka-ba bir benzetme olarak, dışarıdan, çevreden gelen ses dalgalarını yok edecek ses dalgaları üreterek kulak zarınıza çarpacak olan seslerin gelmesini engelleyen şu fantezi kulaklıkları düşünün. Eğer kulaklık mükemmel çalışırsa, o ses ürettiğinde sessizlik olur ama kulaklığı kapattığınızda çevreden gelen sesleri duyarsınız. Araştırmacılar, tıpkı kulaklığınızın programlandığı sesleri çıkardığında *daha* az ses duymanız gibi; soğuk, bomboş uzayın da Higgs alanı okyanusuyla dolu olduğunda, sahip olabileceği en düşük enerjiye sahip olacağına -olabileceği kadar boş olacağına- inanma durumuna gelmişlerdir. Araştırmacılar, olabilecek en boş uzayı *boşluk* olarak adlandırırlar ve böylece boşluğun aslında birörnek bir Higgs alanıyla dolu olabileceğini öğreniriz.

Bir Higgs alanının uzayda sıfırdan farklı bir değeri alması süreci -bir Higgs okyanusunun oluşumu- *kendiliğinden simetri kırılması*' olarak adlandırılır ve yirminci yüzyılın kuramsal fiziğinin son yirmibeş-otuz yılında ortaya atılan en önemli fikirlerden biridir. Nedenini görelim.

Higgs Okyanusu ve Kütlenin Kaynağı

Eğer bir Higgs alanının değeri sıfırdan farklı ise -eğer hepimiz bir Higgs okyanusunda yüzüyorsak- o zaman bunu hissetmemiz, görmemiz veya bir şekilde bundan haberdar olmamız gerekmez mi? Kesinlikle. Modern kuram haberdar olduğumuzu iddia ediyor. Diğer elinizle kolunuzu tutun ve ileri geri sallayın. Kolunuzun kütlesini ileri-geri hareket ettiren kaslarınızın işleyişini hissedebilirsiniz. Eğer bir bowling topunu tutarsanız, kaslarınızın daha çok çalışması gerekir çünkü hareket ettirilen kütle büyüdükçe uygulanması gereken kuvvet de artar. Bu anlamda bir cismin kütlesi, onun hareket ettirilmeye karşı olan direncini temsil eder; daha kesin bir dille söylemek gerekirse, kütle bir cismin hareketinin değiştirilmesine, yani önce sola, sonra sağa, sonra yeniden sola gidişlere -ivmelere- karşı direncini temsil eder. Ama ivmelenmeye karşı bu direnç nereden geliyor? Veya fizik diliyle ifade edersek, bir cisme eylemsizlik (süredurum) özelliği nereden geliyor?

Bölüm 2 ve Bölüm 3'te Newton, Mach ve Einstein'ın bu soruya *kısmi* cevap olarak öne sürdükleri önerileri gördük. Bu bilim insanları, örneğin dönen kova deneyinde ortaya çıkan ivme gibi ivmeleri ona göre tanımlayabilecekleri bir durağanlık stan-

Terminoloji o kadar önemli değildir ama kısaca nereden geldiğini görelim. Şekil 9.1a ve 9.1c'deki vadi simetrik biçimlidir -çember şeklindedir- ve her noktası diğerleriyle eşittir (her nokta olası en düşük enerji değeriyle bir Higgs alanını simgeler). Ama Higgs alanının değeri kâsenin kenarından aşağı kaydığında, çember biçimli vadede özel *bir nokta*ya çöker ve bunu yaparken de vadedeki bir noktayı "kendiliğinden" özel bir nokta olarak seçer. Sonuçta, aralarından biri özel bir nokta olarak seçildiği için artık vadedeki her nokta diğerleriyle eşit olmaktan çıkar ve bu yüzden de Higgs alanı bu noktaların arasında önceden var olan simetriyi bozar veya "kırar". Toparlarsak, Higgs'in vadedeki sıfırdan farklı özel bir nokta'ya kayması sürecine *kendiliğinden simetri kırılması* adı verilir. Kitapta daha ileride, böyle bir Higgs okyanusunun oluşumu ile bağlantılı olan simetri azalmasının daha elle tutulur niteliklerini de tarif edeceğiz.⁷

dardı belirlemenin peşindeydiler. Newton için bu standart mutlak uzaydı; Mach için, uzak yıldızlardı; ve Einstein için, önceleri mutlak uzay-zaman iken (özel görelilikte) sonraları kütleçekimi (genel görelilik) oldu. Ama durağanlık standardı ve özel olarak ivmelerin ona göre ölçülebileceği bir referans sistemi bir kere tanımlandıktan sonra, bu bilim insanlarından hiçbiri bir adım ileri gidip cisimlerin *neden* ivmelenmeye direnç gösterdiğini açıklamadı. Yani hiç kimse bir cismin ivmelere karşı çıkan özelliği olan kütlesini -eylemsizliğini- kazanma mekanizmasını belirlemedi. Higgs alanı sayesinde fizikçiler şimdi bu soruya bir cevap öneriyorlar.

Kolunuzu ve tutmakta olabileceğiniz bowling topunu oluşturan atomların hepsi proton, nötron ve elektronlardan oluşmaktadır. 1960'ların sonlarında yapılan deneyler, proton ve nötronların her birinin, kuark adı verilen, daha küçük üç parçacıktan oluştuğunu ortaya koymuştur. O zaman, kolunuzu salladığınızda bütün bu kuarkları ve elektronları ileri-geri sallıyorsunuz demektir ki bu da bizi ilginç bir noktaya götürür. Modern kuramın hepimizin içinde yüzdüğünü öne sürdüğü Higgs okyanusu kuark ve elektronlarla *etkileşir*. Tıpkı bir kaptaki balın, içine daldırılan ping-pong topunun hareketlerine direnç göstermesi gibi Higgs alanı da bu parçacıkların ivmelenmesine direnç gösterir. Bu direnç, bileşen parçacıklar üzerindeki bu çekme, sizin kolunuzun veya tutmakta olduğunuz bowling topunun veya fırlattığınız bir cismin veya bir 100 metre yarışında bitiş çizgisine doğru ilerlerken tüm gövdenizin kütlesi olarak algıladığınız şeye katkıda bulunur. Bu yüzden biz Higgs okyanusunu *hissederiz*. Bir cismin ya da diğerinin hızını değiştirmek üzere -onlara ivme kazandırmak için- günde binlerce kez uyguladığımız kuvvetler, Higgs okyanusunun direncine karşı savaşan kuvvetlerdir.⁸

Bal benzetmesi Higgs okyanusunun pek çok özelliğini ortaya koyar. Bala batırılmış bir ping-pong topunu ivmelendirebilmek için, bodrumdaki masada ping-pong oynarken uyguladığınız kuvvetlerden çok daha büyük kuvvetler uygulamanız gerekir; hızını değiştirmek için yaptığınız girişimlere, bala batırılmış

olmadığı duruma göre çok daha fazla direnç gösterir ve bu *yüzden*, bala batırılmak sanki onun kütesini artırmış gibi davranır. Benzer şekilde, her yerde var olan Higgs okyanusuyla etkileşimleri sonucunda, temel parçacıklar hızlarının değiştirilmelerine direnç gösterirler, kütle kazanırlar. Bununla birlikte bal benzetmesinin, haberdar olmanız gereken üç yanıltıcı özelliği vardır.

Birincisi, her zaman bala ulaşım topu baldan çıkararak ivmeye karşı direncinin nasıl azaldığını görebilirsiniz. Parçacıklar için bu doğru değildir. Bugün, Higgs okyanusunun bütün uzayı doldurduğuna inanıyoruz, bu nedenle parçacıkları onun etkisinden kurtarmanın bir yolu yoktur; bütün parçacıklar nerede olduklarından bağımsız olarak bir kütleyle sahiptir, ikincisi, bal bütün hareketlere direnç gösterirken Higgs alanları yalnızca ivmeli hareketlere direnç gösterirler. Balın içinde hareket eden toptan farklı olarak, uzayda sabit hızla hareket eden bir parçacık, Higgs okyanusundaki "sürtünme" nedeniyle yavaşlamaz. Hareket sabit hızla devam eder. Ancak parçacığı hızlandırmaya ya da yavaşlatmaya çalıştığımızda Higgs alanı okyanusu, varlığını, uygulamamız gereken kuvvetler yoluyla ortaya koyar. Üçüncüsü, temel parçacık yığınlarından oluşan, bilindik maddeye geldiğimiz zaman, bir başka önemli kütle kaynağı daha vardır. Proton ve nötronları oluşturan kuarklar, güçlü nükleer kuvvet tarafından bir arada tutulur: Gluon parçacıkları (güçlü nükleer kuvvetin haberci parçacıkları) kuarklar arasında değiş-tokuş edilerek onları birbirlerine 'yapıştırırlar". Deneyler bu gluon parçacıklarının yüksek enerjili olduklarını göstermiştir, Einstein'ın $E=mc^2$ denklemi enerjinin (E), kendisini kütle (m) olarak gösterebileceğini söylediği için, proton ve nötronların içinde bulunan gluonların, bu parçacıkların toplam kütlelerine önemli katkılarda bulunduğunu öğreniyoruz. Bu nedenle, daha doğru bir yaklaşım, Higgs okyanusunun balinkine benzeyen direncinin, elektron ve kuark gibi *temel* parçacıklara kütlelerini sağladığını düşünmektir ama bu temel parçacıklar, proton, nötron, atom gibi bileşik parçacıklar oluşturmak üzere bir araya geldiklerinde, başka (iyi bilinen) kütle kaynakları da işin içine girer.

Fizikçiler, Higgs okyanusunun bir parçacığın ivmesine gösterdiği direncin derecesinin, parçacığın türüne göre değiştiğini varsayarlar. Bilinen temel parçacık türlerinin hepsinin kütleleri farklı olduğu için bu önemlidir. Örneğin, proton ve nötronlar iki tür kuarktan oluşmakta iken (bunlara *yukarı-kuark* ve *aşağı-kuark* adı verilir: Proton, iki yukarı ve bir aşağı, nötron ise iki aşağı ve bir yukarı kuarktan oluşur), yıllar boyunca atom çarpıştırıcıları kullanan deneyciler, kütleleri protonunkinin 0,0047'si ile 189 katı arasında büyük bir aralıkta değişen dört farklı kuark parçacığı daha buldular. Fizikçiler, kütlelerin bu kadar farklı olmasının nedeninin, farklı parçacıkların Higgs okyanusu ile daha güçlü veya daha zayıf etkileşmesi olduğuna inanıyorlar. Eğer bir parçacık Higgs okyanusunda düzgün bir biçimde hiç etkileşmeden veya çok az etkileşerek hareket ederse, çok az direç göreceği ya da hiç görmeyeceği için parçacığın kütlesi de ya çok küçük, ya da sıfır olacaktır. Foton buna iyi bir örnektir. Fotonlar Higgs okyanusundan hiç engellenmeden geçerler ve bu yüzden kütleleri yoktur. Eğer, tersine, parçacık Higgs okyanusuyla şiddetli bir şekilde etkileşirse, kütlesi de büyük olacaktır. Kütleli elektron kütlelerinin 350.000 katı olan en büyük kütleli kuark (üst-kuark adı verilir) Higgs okyanusu ile bir elektrondan 350.000 kat daha fazla etkileşir; Higgs okyanusu içinde ivmelendirilmesi daha zordur, kütlelerinin de daha büyük olma nedeni budur. Eğer parçacığın kütlelerini bir kimsenin ününe benzetirsek, Higgs okyanusu da paparazzi gibidir: Tanınmamış kişiler fotoğrafçı kümesinin içinden kolayca geçerler ama ünlü politikacılar veya film yıldızları gidecekleri yere ulaşmakta daha fazla zorlanırlar.⁹

Bu da, neden bir parçacığın kütlelerinin diğerinden farklı olduğunu düşünmek için uygun bir yapı oluşturur, ama bugün, bilinen parçacık türlerinin Higgs okyanusuyla kesin etkileşme biçimleri konusunda temel bir açıklama yoktur. Sonuç olarak, neden bilinen parçacıkların deneylerle ortaya konmuş olan özel kütlelerine sahip oldukları yolunda temel bir açıklama yoktur. Bununla birlikte, çoğu fizikçi, eğer Higgs okyanusu olmasaydı,

bütün temel parçacıkların fotona benzeyeceğine, hiçbir şekilde kütleleri olmayacağını düşünür. Aslında, şimdi göreceğimiz gibi, evrenin ilk anlarında durum gerçekten böyle olmuş olabilir.

Soğuyan Bir Evrende Birleşme

Nasıl buhar 100 derece Celsius'ta yoğunlaşarak sıvı suya, sıvı su da 0 derece Celsius'ta donarak katı buza dönüşürse, kuramsal çalışmalar da Higgs alanının milyon kere milyar (10^{15}) derecede sıfırdan farklı bir değere yoğunlaştığını göstermiştir. Bu, hemen hemen Güneş'in çekirdeğindeki sıcaklığın 100 milyon katı olup, evrenin Büyük Patlama dan saniyenin yüz milyarda biri (10^{-11}) saniye kadar sonra sıcaklığın düştüğüne inanılan değerdir. Büyük Patlama'dan 10^{-11} saniye sonrasına kadar Higgs alanı aşağı-yukarı salınmakla birlikte ortalama değeri sıfırdı; suyun 100 derecenin üzerindeki durumu gibi, böylesi sıcaklıklarda ortam çok sıcak olduğu için Higgs okyanusu oluşamazdı. Okyanus anında buharlaşmış olurdu. Higgs okyanusu olmadığından ivmeli hareket eden parçacıklara gösterilen bir direnç yoktu (paparazzi ortadan kaybolmuştu), ki bu da, bilinen bütün parçacıkların (elektronlar, yukarı-kuarklar, aşağı-kuarklar ve diğerleri) aynı kütleyle sahip oldukları anlamına gelir: Sıfır.

Bu gözlem, neden Higgs okyanusunun oluşumunun kozmolojik bir faz geçişi olarak tarif edildiğini kısmen açıklar. Buhardan suya ve sudan buza faz geçişlerinde, başlıca iki şey olur. Görünüşte önemli bir nitel değişiklik vardır ve faz geçişlerine simetri-deki azalma eşlik eder. Higgs okyanusunun oluşumunda da bu iki temel özelliği görürüz. Birincisi, önemli bir nitel değişiklik vardı: O zamana kadar kütesiz olan parçacıklar aniden sıfırdan farklı kütlelere -bu parçacıkların şimdiki kütleleri- kavuşmuşlardı. İkincisi, bu değişikliğe simetride bir azalma eşlik etmişti: Higgs okyanusunun oluşumundan önce bütün parçacıklar aynı kütleyle -sıfır- sahipti ve bu da simetrik ilişkiler demekti. Eğer bir parçacığın kütlesini diğerininki ile değiştirseniz, bütün kütleler birbiriyle aynı olduğu için, bundan kimsenin haberi bile olmazdı. Ama Higgs alanı yoğunlaştıktan sonra, parçacık kütleleri

sıfırdan farklı -ve eşit olmayan- değerlere kavuştular ve dolayısı ile kütleler arasındaki simetri de kayboldu.

Aslında, Higgs okyanusunun oluşumundan kaynaklanan simetri azalması daha da yaygındır. 10^{-15} derecenin üzerinde Higgs okyanusu henüz yoğunlaşmadan önce, kütesiz olanlar yalnızca temel parçacıkların değişik türleri değildi, Higgs okyanusunun direnci olmadığından kuvvet parçacıklarının bütün türleri de kütesizdi. (Bugün, zayıf nükleer kuvvetin W ve Z haberci parçacıkları proton kütesinin 86 ve 97 katı kütleyle sahip oldukları biliniyor.) Ve 1960'larda özgün olarak Sheldon Glashow, Steven Weinberg ve Abdus Salam tarafından keşfedildiği gibi, bütün kuvvet parçacıklarının kütesiz oluşlarına bir başka, olağanüstü güzel bir simetri eşlik eder.

1800'lerin sonlarına doğru Maxwell, bir zamanlar tümüyle ayrı kuvvetler olduğu düşünülen elektrik ve manyetizma kuvvetlerinin, aslında aynı kuvvetin -elektromanyetik kuvvetin- iki farklı yüzü olduğunu anlamıştı (Bölüm 3'e bakınız). Onun çalışmaları elektrik ve manyetizmanın birbirini tamamladığını gösterdi; onlar çok daha simetrik, birleşik bir bütünün yin ve yang'ı idiler. Glashow, Salam ve Weinberg bu birleşim öyküsünün sonraki bölümünü keşfettiler. Onlar, Higgs okyanusu oluşmadan önce, yalnızca bütün kuvvet parçacıklarının aynı -sıfır- kütleyle sahip olmakla kalmadıklarını, fotonlarla W ve Z parçacıklarının da her anlamda aynı olduklarını anladılar.¹⁰ Nasıl bir kar kristali, uçlarının yer değiştirdiği dönmelerden etkilenmiyorsa, Higgs okyanusunun yokluğunda fiziksel süreçler de elektromanyetik ve zayıf nükleer kuvvet parçacıklarının değiş-tokuşundan, fotonların ve W ve Z parçacıklarının değiş tokuşundan etkilenmezdi. Nasıl bir kar kristalinin dönme hareketinden etkilenmemesi bir simetriyi gösteriyorsa (dönme simetrisi), süreçlerin bu parçacıkların değiş-tokuşundan etkilenmemesi de bir simetriyi gösterir, teknik nedenlerden ötürü bu simetriye *ayar simetrisi* adı verilir. Bunun derin sonuçları vardır. Bu parçacıklar ait oldukları kuvveti taşıdıkları için -bunlar, bu kuvvetlerin haberci parçacıklarıdır- bunların arasında simetri bulunması, kuvvetlerin de simet-

rik olduğu anlamına gelir. Bu yüzden, yeterince yüksek sıcaklıklarda, günümüzdeki Higgs alanı boşluğunu buharlaştıracak kadar yüksek sıcaklıklarda, zayıf nükleer kuvvetle elektromanyetik kuvvet arasında bir fark yoktur. Higgs okyanusunu buharlaştıracak kadar yüksek sıcaklıklarda zayıf nükleer kuvvetle elektromanyetik kuvvet arasındaki fark da buharlaşır.

Glashow, Weinberg ve Salam, elektromanyetik kuvvetle zayıf nükleer kuvvetin, aslında tek bir kuvvetin parçaları olduğunu göstererek Maxwell'in yüz yıllık keşfini genişlettiler. Bu iki kuvvetin tanımlarını, şimdi *elektrozayıf* kuvvet olarak bilinen bir tanım altında *birleştirdiler*.

Elektromanyetik ve zayıf kuvvetler arasındaki simetri günümüzde pek fark edilmez, çünkü evren soğudukça Higgs okyanusu oluştu ve -burası önemli- fotonlarla W ve Z parçacıkları, yoğunlaşan Higgs alanıyla farklı şekilde etkileşirler. Fotonlar Higgs okyanusundan ünlü olmayan kişilerin paparazziler arasından geçtiği kolaylıkta geçerler ve dolayısı ile kütsesiz kalırlar. Ama W ve Z parçacıkları Bill Clinton ve Madonna gibi zorlukla geçeceklerinden, sırasıyla protonun 86 ve 97 katı kütleyle sahiptirler. (Not: Bu benzetme ölçekli değildir). Etrafımızdaki dünyada elektromanyetik ve zayıf nükleer kuvvetlerin bu kadar farklı görünmesinin nedeni budur. Bunların arasındaki simetri, Higgs okyanusu (Higgs çökeleği) tarafından "kırılmıştır" ya da gizlenmiştir.

Bu gerçekten nefes kesici bir sonuçtur. Günümüz sıcaklıklarında çok farklı görünen iki kuvvet -elektromanyetik kuvvet ışıktan, elektrikten ve mıknatısın çekmesinden; zayıf nükleer kuvvet ise radyoaktif bozunmadan sorumludur- esas olarak aynı kuvvetin parçaları olup, yalnızca sıfırdan farklı Higgs alanı aralarındaki simetriyi gizlediğinden farklı görünmektedirler. Bu nedenle normalde uzay boşluğu -yokluk, hiçlik- olarak düşündüğümüz şey, dünyadaki her şeyin, olduğu gibi görünmesinde önemli bir rol oynar. Yalnızca boşluğu buharlaştıracak, sıcaklığı Higgs alanının buharlaşacağı kadar yükselterek -yani uzaydaki ortalama değerini sıfır yaparak- doğa yasalarının altında yatan tam simetri ortaya çıkarılabilir.

Glashow, Weinberg ve Salam bu düşünceleri geliştirirken, W ve Z parçacıkları daha deneysel olarak keşfedilmemişti. Bu fizikçilere ilerlemeleri için güven veren, kuramın gücüne ve simetrisinin güzelliğine duydukları kuvvetli sadakattir. Onların cesareti, temelsiz olmadığını gösterdi. Geçen zaman içinde W ve Z parçacıkları keşfedildi ve elektrozayıf kuram deneysel olarak doğrulandı. Glashow, Weinberg ve Salam, doğanın dört kuvvetinden ikisini birbirine bağlayan derin ve fark edilmesi güç simetriyi ortaya çıkarmak için yüzeysel görüntünün ötesine -hiçliği gizleyen sisin içine doğru- bakmışlardı. Zayıf nükleer kuvvet ve elektromanyetizmayı başarılı bir şekilde birleştirdikleri için 1979'da Nobel Ödülünü aldılar.

Büyük Birleşim

Ben üniversite birinci sınıfta iken, her fırsatta danışmanım olan fizikçi Howard Georgi'nin yanına uğradım. Aslında hiçbir zaman söyleyecek çok fazla şeyim olmazdı ama bunun bir önemi yoktu. Georgi'nin her zaman ilgili öğrencilerle heyecanla paylaşacağı bir şeyler olurdu. Bir keresinde Georgi özel olarak heyecanlıydı, bir saatten fazla ateşli bir şekilde konuştu, tahtayı birkaç kere semboller ve denklemlerle doldurdu. Bütün bu süre boyunca ilgili bir şekilde başımı sallayıp durdum. Ama dürüst olmak gerekirse, bir kelime bile anlamamıştım. Yıllar sonra, Georgi'nin bana *büyük birleşme* adı verilen keşfini sınamak üzere yaptığı planları anlatmış olduğunu fark ettim.

Büyük birleşme, elektrozayıf birleşmenin başarısından sonra doğal olarak sorulması gereken soruyu ortaya atar: Eğer doğanın iki kuvveti, evrenin ilk dönemlerinde birleşik bir bütünün parçaları idiye, daha yüksek sıcaklıklarda ve evrenin daha da erken dönemlerinde üç ya da olasılıkla dört kuvvetin tümü arasındaki farklar benzer şekilde buharlaşarak daha büyük bir simetriyi ortaya koymuş olmaz mı? Bu, aslında doğanın tek bir temel kuvveti olduğu, bir dizi kozmolojik faz geçişiyle, bu kuvvetin şimdi haberdar olduğumuz, görünüşte farklı olan dört kuvvet şeklinde kristalleşmiş olma olasılığını ortaya atar. 1974'te Georgi

ve Glashow, bu tam birleştirme amacına yönelik ilk kuramı ileri sürdüler. Onların *büyük birleşik kuramı*, Georgi, Helen Quinn, Weinberg'in sonraki görüşleriyle birlikte, sıcaklığın Güneş'in merkezindeki sıcaklığın bin kere milyar kere milyar kat üstünde olduğu, Büyük Patlama'dan 10^{-35} saniye sonrasına kadarki uç koşullarda, dört kuvvetten üçünün -güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetler- tek bir birleşik kuvvetin parçaları olduğunu ileri sürüyordu. Bu fizikçiler, bu sıcaklığın üzerinde fotonların, W ve Z parçacıklarının ve gluonların hepsinin, herhangi bir gözlelenebilir sonuç olmaksızın, serbestçe birbirleriyle değış-tokuş ediliyor olabileceklerini -elektrozayıf kuraminkinden daha sağlam ve güçlü bir ayar simetrisi- ileri sürdüler. Georgi ve Glashovv böylece bu yüksek enerji ve sıcaklıklarda kütleçekimsel olmayan üç kuvvet parçacıkları arasında, bu yüzden de kütleçekimsel olmayan üç kuvvet arasında tam bir simetri olduğunu ortaya attılar.¹¹

Glashovv ve Georgi'nin büyük birleşik kuramı, bu simetriyi çevremizde görmediğimizi -proton ve nötronları çekirdekte bir arada tutan güçlü nükleer kuvvet, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerden tamamıyla farklı görünür- çünkü sıcaklık 10^{28} derecenin altına düştüğünde Higgs alanının bir başka türünün öyküye girdiğini söyleyerek devam etti. Bu Higgs alanı *büyük birleşik Higgs* olarak adlandırılır. (Karışabilecekleri durumlarda elektrozayıf birleşimle ilişkili olan Higgs alanına *elektrozayıf Higgs* adı verilir.) Elektrozayıf akrabasına benzer şekilde büyük birleşik Higgs, 10^{28} derecenin üzerinde şiddetle salınıyordu ama hesaplamalar onun, evrenin sıcaklığı bu derecenin altına düştüğünde sıfırdan farklı bir değere yoğunlaştığını gösterdi. Elektrozayıf Higgs'de olduğu gibi, bu büyük birleşik Higgs okyanusu oluştuğunda, evren bir faz geçişi yaşadı ve buna simetrideki bir azalma eşlik etti. Bu durumda, büyük birleşik Higgs okyanusunun gluonlar üzerindeki etkisi, diğer kuvvet parçacıkları üzerindeki etkilerinden farklı olduğu için, güçlü nükleer kuvvet elektrozayıf kuvvetten ayrılarak, daha önce tek olan kuvvet yerine kütleçekimsel olmayan iki farklı kuvvete yol açtı. Saniyenin bir

kesri kadar ve sıcaklığın milyarlarca ve milyarlarca derece düşmesinden sonra, elektrozayıf Higgs yoğunlaşarak zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin de ayrılmasına yol açtı.

Güzel bir fikir olmakla birlikte büyük birleşme (elektrozayıf birleşme doğrulanmıştı) deneysel olarak doğrulanmadı. Tersine, Georgi ve Glashow'un özgün önerisi, evrenin ilk dönemlerindeki simetrisinin bir kalıntısının, protonların ara sıra başka parçacıklara (karşı-elektron ve pion gibi)dönüşmelerine olanak tanıyan ve bugün gözlenmesi gereken bir kalıntısının varlığını öngörmüştü. Ama yer altı deneyleriyle -Georgi'nin yıllar önce ofisinde bana heyecanla anlattığı deney- böylesi *proton bozunmalarını* bulmaya çalışan ve yıllar süren araştırmalardan sonra, böyle bir bozunma bulunmadı; bu da Georgi ve Glashow'un önerisini geçersiz hale getirdi. Bununla birlikte, fizikçiler o zamandan beri bu özgün model üzerinde deneylerce geçersiz kılınmayan çeşitlemeler geliştiriyorlarsa da, şimdiye kadar bu seçenek kuramlardan hiçbirisi henüz doğrulanmadı.

Büyük birleşmenin fizikteki en büyük ama henüz gerçekleştirilmemiş fikirlerden biri olduğu yolunda fizikçiler arasında bir fikir birliği vardır. Birleşme ve kozmolojik faz geçişlerinin, elektromanyetizma ve zayıf nükleer kuvvet için öylesine etkili oldukları kanıtlanmıştır ki, birçokları diğer kuvvetlerin de bu birleşik yapıya katılmasının yalnızca bir zaman sorunu olduğunu düşünüyorlar. Bölüm 12'de göreceğimiz gibi, bu yönde son zamanlarda, ilk defa, aralarında kütleçekimi de olmak üzere *bütün* kuvvetleri birleşik bir kuramda bir araya getiren, ama bu kitabın yazıldığı zaman bile hâlâ gelişmekte olan farklı bir yaklaşım -*siipersicim kuramı*- kullanılarak büyük adımlar atılmıştır. Ama yalnız elektrozayıf kuram göz önüne alınsa bile, şimdi gördüğümüz evrenin, ilk dönemlerdeki görkemli simetrisinin kalıntılarını sergilediği açıktır.

Esir'in Dönüşü

Simetri kırılması kavramı ve bunun elektrozayıf Higgs alanı yoluyla gerçekleşmesinin parçacık fiziğinde ve kozmolojide çok

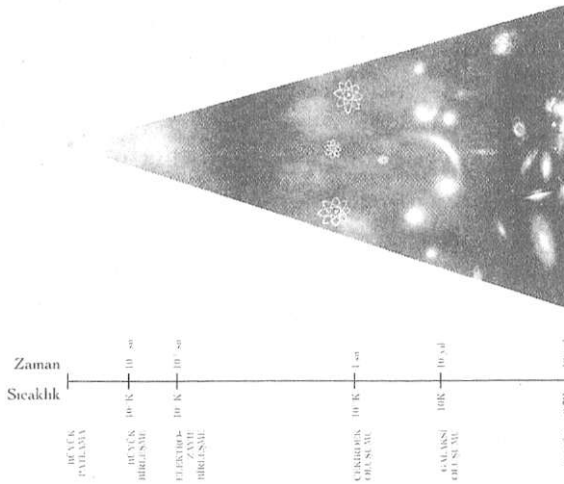
önemli bir rol oynadığı açıktır. Ama tartışma, şunu merak etmenize yol açmış olabilir: Eğer bir Higgs okyanusu, normalde boş uzay olarak düşündüğümüz yeri dolduran, görünmez bir şeyse, bu, uzun süre önce gözden düşmüş bir kavram olan esirin yeniden canlanması anlamına gelmez mi? Cevap: Hem evet, Hem hayır. Açıklama: Aslında evet, bazı bakımlardan Higgs okyanusu esirin bir çeşnisidir. Tıpkı esir gibi çökelmiş Higgs alanı da uzayı doldurur, hepimizi sarar, maddesel her şeyin içine sızar ve uzayın yok edilemez bir özelliği olarak (evreni yeniden 10^{15} derecenin üzerine kadar ısıtmadıkça, ki bunu gerçekte yapamayız) hiçlik kavramımızı yeniden tanımlar. Oysa ses dalgalarını taşıyan hava gibi ışık dalgalarını taşıyan bir ortam olarak ileri sürülen özgün esirin tersine, Higgs okyanusunun ışığın hareketiyle uzaktan yakından ilgisi yoktur. Işığın hızını herhangi bir şekilde etkilemez, bu yüzden de yirminci yüzyılın başında ışığın hareketini inceleyerek esiri bertaraf eden deneylerin Higgs okyanusuna karşı belirli bir tavrı yoktur.

Üstelik, Higgs okyanusunun sabit hızla hareket eden herhangi bir şey üzerinde bir etkisi olmadığından, esirde olduğu gibi özel bir gözlemsel bakış açısı seçmez. Higgs okyanusunun içinde sabit hızla hareket eden tüm gözlemciler birbirleriyle eşittirler, bu yüzden Higgs okyanusunun varlığı özel görelilikle çelişmez. Elbette bu gözlemler Higgs okyanusunun varlığını kanıtlamaz; daha çok, esirle belirli bazı benzerlikleri olsa bile, Higgs alanlarının herhangi bir kuram veya deneyle çelişkili olmadığını gösterirler.

Eğer bir Higgs alanı okyanusu varsa, gelecek birkaç yıl içinde deneysel olarak sıranabilir sonuçlara yol açmalıdır. En önemli örnek olarak, nasıl elektromanyetik alan fotonlardan oluşuyorsa, Higgs alanı da, şaşırtıcı olmayacak bir şekilde *Higgs parçacıkları* adı verilen parçacıklardan oluşmaktadır. Kuramsal hesaplamalar, eğer uzayı kaplayan bir Higgs okyanusu varsa, İsviçre'nin Cenevre kentindeki Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi'nde (Centre Europeene pour la Recherche Nuclaire) (CERN) yapım halinde olan ve 2008 baharında işlemeye başla-

yacak olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) adı verilen atom çarpıştırıcısında yer alacak yüksek enerjili çarpışmalarda ortaya çıkacak parçacıklar arasında Higgs parçacıklarının da olması gerektiğini göstermiştir. Tahminen, son derece yüksek enerjili protonlar arasında kafa kafaya gerçekleşecek çarpışmalar Higgs okyanusundan bir Higgs parçacığını fırlatabilir, tıpkı su altındaki yüksek enerjili çarpışmaların H_2O moleküllerini Atlas okyanusundan fırlatabileceği gibi. Bu arada, bu deneyler bize, esirin bu modern biçiminin var olup olmadığı konusunda bir fikir verecektir. Bu, bir karara bağlanması gereken kritik bir sorudur, çünkü görmüş olduğumuz gibi, Higgs alanlarının yoğunlaşması, temel fiziğin çağdaş formülleştirilmesinde derin ve merkezi bir rol oynamaktadır.

Eğer Higgs okyanusu bulunamazsa, otuz yıldır yerli yerinde olan kuramsal yapının yeniden gözden geçirilmesi gerekecektir. Ama bulunursa, bu olay kuramsal fiziğin bir utkusu olacaktır: Bilinmeyene doğru giderken kullandığımız matematiksel düşünce mantığını doğru biçimde şekillendiren simetrinin gücünü kanıtlayacaktır. Bunun ötesinde, Higgs okyanusunun varlığının



Şekil 9.2 Kozmolojideki standart Büyük Patlama modelini şematik olarak gösteren bir zaman çizgisi

doğrulanması, iki şey daha yapacaktır: Birincisi, günümüz evreninde birbirinden ayrı görünen özelliklerin, simetrik bir bütünün parçaları olduğu çok eski bir dönemin varlığının doğru-
dan kanıtlarını verecektir, ikincisi, sezgisel uzay boşluğu kavramımızın -bir bölgeden her şeyi çıkararak enerji ve sıcaklığının olabildiğince düşürülmesinin sonucunda ortaya çıkan şey-
çok uzun zamandır sergilediğimiz bir safdillik olduğunu kanıtlayacaktır.

Uzay boşluğunun en boşu bile mutlak bir hiçlik durumunu içermek zorunda değildir. Bu nedenle, uzay ve zamanı anlamak için yürüttüğümüz bilimsel arayışta Henry More'un düşüncelerini tinsel hiçbir kavramın yardımı olmaksızın (Bölüm 2) tazeleyebiliriz. More'a göre, uzay her zaman tanrısal bir ruhla dolu olduğu için, olağan boş uzay kavramı anlamsızdı. Bize göre ise, boş uzay her zaman bir Higgs alanı okyanusu ile dolu olabileceğinden olağan boş uzay kavramı benzer şekilde ele geçmez olabilir.

Entropi ve Zaman

Şekil 9.2'deki zaman çizgisi, incelediğimiz faz geçişlerini tarihsel bağlama yerleştirir ve böylece evrenin Büyük Patlama'dan mutfak tezgâhınızın üzerindeki yumurtaya kadar geçirdiği olaylar dizisi konusunda daha net bir fikir edinmemize yardımcı olur. Ama hayati bilgi hâlâ bulanık bölgede gizlidir. Hatırlayın, her şeyin nasıl başladığını bilmek -*Savaş ve Barış*ın yapraklarının istiflenmesindeki sıra, kola şişesindeki basınçlı karbon dioksit molekülleri, Büyük Patlama da evrenin durumu- evrimin nasıl devam edeceğini anlamakta esastır. Entropi, ancak artması için gerekli yer verilirse artabilir. Entropi, eğer düşük başlamışsa artabilir. Eğer *Savaş ve Barış* ın yaprakları adamakıllı karışıkça, yaprak istifini bir kere daha havaya fırlatmak, onu gene karışık halde bırakır, eğer evren oldukça düzensiz, yüksek-entropili bir durumda başlamışsa, kozmik evrim bu düzensizliği yalnızca devam ettirebilir.

Şekil 9.2'de gösterilen geçmiş, açık bir şekilde; sonsuz, değişmez bir düzensizliğin kaydı değildir. Kozmik faz geçişlerinde

bazı özel simetriler kaybolmuş olsa bile, evrenin toplam entropisi artmaya devam etmiştir. Bu nedenle, başlangıçta, evren son derece düzenli olmalıdır. Bu gerçek, zamanda "ileri" yönünü, entropinin arttığı yönle ilişkilendirmemize izin verir, ama hâlâ yeni doğmuş olan evrenin son derece düşük entropili durumu-na -son derece yüksek birörneklik durumuna- bir açıklama bulmak zorundayız. Bu da, şimdiye kadar gidebildiğimizden daha da gerilere giderek başlangıçta -Şekil 9.2'deki bulanık bölgede-ne olup bittiğini anlamaya çalışmamızı gerektirir. Şimdi bu konuya geliyoruz.

X. Bölüm

Patlama'nın Çözülmesi

Patlayan Neydi?

Büyük Patlama'nın, kozmik başlangıç hakkında bir kuram sağladığı yolunda yaygın bir yanlış anlama vardır. Sağlamaz. Kısmen son iki bölümde anlatılan Büyük Patlama, evreni ortaya çıkaran şey her ne idiye, ondan bir saniyenin küçük bir kesri kadar kısa bir süre sonra kozmik evrimin portresini yapmaya başlar ama *sıfır zamanının kendisi hakkında hiçbir şey söylemez*. İşte bu yüzden, Büyük Patlama kuramına göre, Büyük Patlama başlangıçta olmuş olması gereken şeydir. Büyük Patlama, patlamanın kendisini dışarıda bırakır. Bizze neyin patladığını, neden patladığını, nasıl patladığını veya dü-rüst olmak gerekirse gerçekten patlayıp patlamadığını bile söylemez.¹ Aslında, bir an düşünecek olursanız, Büyük Patlama'nın bizi bir bilmece ile karşı karşıya bıraktığını fark edersiniz. Evrenin ilk dönemlerindeki çok yoğun ve yüksek enerjili ortamında kütleçekimi, uzak ara en baskın kuvvetti. Ancak kiitleçekimi-

mi çekici bir kuvvettir. Her şeyi bir araya gelmeye zorlar. O zaman, acaba uzayı *dışarı doğru* genişlemeye zorlayan kuvvetten sorumlu olan neydi? Büyük Patlama anında güçlü bir itici kuvvet kritik bir rol oynamış gibi duruyor, ama bu, doğadaki kuvvetlerden hangisi olabilir?

Kozmolojiye ilişkin soruların bu en temel olanı, on yıllar boyunca cevapsız kaldı. Sonra, 1980'lerin sonunda, Einstein'm eski bir gözlemi, pırıl pırıl parlayan yepyeni bir biçimde canlanarak şişme kozmolojisi adı verilen kuramın yolunu açtı. Bu yeni keşifle, Büyük Patlama dan sorumlu olmanın şerefi, sonunda onu hak eden kuvvete verildi: *Kütleçekimi*. Bu, şaşırtıcı olabilir ama fizikçiler, uygun koşullar altında kütleçekiminin itici olabileceğini ve kurama göre, kozmik tarihin ilk anlarında bu uygun koşulların bulunduğunu anladılar. Yanında nanosaniyenin bile sonsuzluk gibi kalacağı, çok kısa bir zaman aralığında genç evren, kütleçekiminin, itici yanını adamakıllı göstererek, uzayın her bölgesini diğerlerinden amansız bir şiddetle uzaklaştırdığı bir arena hazırlamıştı. Kütleçekiminin itmesi o kadar güçlüydü ki, yalnızca patlama saptanmakla kalmadı, herkesin varsaydığından daha büyük -çok daha büyük- olduğu ortaya çıktı. Şişme yapısında genç evren, standart Büyük Patlama kuramının öngördüğüyle karşılaştırıldığında, göz kamaştırıcı ölçüde devasa bir faktörle genişlemiş ve kozmolojik manzaramızı, geçen yüzyıldaki, bizim galaksimizin yüz milyarlarca galaksiden yalnızca biri oluşunun fark edildiği kavrayışı bile cüce bırakacak ölçüde genişletmiştir.²

Bu bölümde ve gelecek bölümde, şişme kozmolojisini inceleyeceğiz. Göreceğiz ki bu, standart Büyük Patlama modeli için bir "ön kenar" oluşturmaktadır ve evrenin ilk anlarındaki olaylar hakkında standart kuramın iddialarında kritik değişiklikler önermektedir. Bunu yaparken de şişme kozmolojisi, standart Büyük Patlama kuramının erişiminin ötesindeki sorunları giderir, bir kısmı deneysel olarak sınanmış, bir kısmı da yakın gelecekte sınanmaya devam edecek olan bazı öngörülerde bulunur ve belki de en çarpıcısı, kuantum süreçlerinin kozmik genişleme

yoluyla uzayın dokusundaki minik kırıksıklıkları ütüleyerek nasıl gece gökyüzünde görülebilen parmak izlerini bıraktıklarını gösterir. Bu kazanmaların ötesinde, şişme kozmolojisi, genç evrenin, sergilediği olağanüstü düşük entropiye nasıl sahip olmuş olabileceği ve bizi nasıl zamanın okunun açıklamasına şimdiye kadar olmadığı biçimde yaklaştırdığı konularında da önemli görüşler ileri sürer.

Einstein ve İtimsel Kütleçekimi

1915'te genel göreliliğin son rötuşlarını yaptıktan sonra Einstein, kütleçekimine ilişkin bu yeni denklemleri bir dizi problemle uyguladı. Bunlardan biri, uzun zamandır çözülemeyen, Merkür'ün yörüngesinin günberi noktasının Newton denklemleriyle açıklanamayan presesyonu -Merkür Güneş çevresindeki her turunda aynı yörüngeyi izlemez: Her yörünge, bir öncekine göre hafifçe kayar- bilmecesiydi. Yörünge hesaplarını yeni denklemlerle yapan Einstein, gözlenen günberi presesyonunu hassas bir biçimde buldu. Çok heyecanlandıran bu sonuç karşısında Einstein'ın kalp çarpıntısı hissettiği biliniyor.³ Einstein genel göreliliği, uzak bir yıldızdan Dünyaya doğru gelen ışığın yörüngesinin, Güneş yakınından geçerken uzay-zamandaki eğrilik nedeniyle ne kadar sapacağı problemine de uyguladı. 1919'da biri Afrika'nın batı kıyısının açıklarındaki Principe adasında, diğeri ise Brezilya'da bulunan iki grup astronom, Güneş tutulması sırasında, Güneş diskinin kenarından ilk görünen yıldız ışığı (bunlar Güneş'in varlığından en çok etkilenen ışınlar olup yalnızca Güneş tutulması sırasında görülebilirler) gözlemlerini karşılaştırarak genel göreliliğin bu konudaki öngörüsünü sınadılar. Güneş'in kütleçekiminin yıldızdan gelen ışık ışını üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, Dünya yörüngesinde dolanırken tam aynı yıldızlarla Güneş arasındayken fotoğraflar çekildi. Karşılaştırmalar, ışık ışınlarının bükülme miktarı konusunda bir kere daha Einstein'ın hesaplarını doğruladı. Basın bu haberi duyar duymaz Einstein bir gecede bütün dünyanın tanıdığı bir şöhret oldu. Einstein, genel görelilikle gümbür gümbür geliyordu.

Ama, genel göreliliğin olağanüstü başarılarına rağmen, denklemlerini ilk kez sınavların en zoruna -bütün evreni anlamaya- uyguladıktan sonra Einstein, yıllarca hesaplardan ortaya çıkan sonucu kabul etmeyi kesinlikle reddetti. Friedmann ve Lemaitre'in Bölüm 8'de incelenen çalışmalarından önce Einstein da genel görelilik denklemlerinin, evrenin durağan olamayacağını gösterdiğinin farkındaydı; uzayın dokusu gerilip büzülebilirdi, ama aynı boyutta kalmayı sürdüremezdi. Bu durum, evrenin dokusunun en çok büzölmüş olduğu, belirli bir başlangıcı olabileceğini ve hatta belirli bir sonu olabileceğine işaret ediyordu. Einstein genel göreliliğin bu sonucu karşısında inatçı bir şekilde durdu ve ilerlemeyi reddetti, çünkü o ve herkes evrenin sonsuz olduğuna, en büyük ölçeklerde sabit ve değişmez olduğuna "emindi". Bu yüzden, genel göreliliğin güzelliği ve başarısına rağmen Einstein defterini yeniden açtı ve denklemlerde, hâkim olan önyargıya izin verecek bir değişiklik yapıp yapamayacağını aramaya başladı. Bu arayış çok uzun sürmedi. 1917 de genel görelilik denklemlerine yeni bir kavram sokarak amacına ulaştı: *Kozmolojik sabit*.⁴

Einstein'ın bu değişikliği yapmaktaki stratejisini anlamak zor değildir, iki nesne arasındaki kütleçekimi kuvveti; bunlar ister beyzbol toplan olsun isterse gezegenler veya yıldızlar, çekicidir; sonuçta kütleçekimi, nesneleri birbirlerine doğru çekmeye çalışır. Dünya ile yukarıya doğru sıçrayan bir dansçı arasındaki kütleçekimi, dansçının yavaşlamasına, en yüksek noktasına ulaştıktan sonra da geriye, Dünyaya doğru düşmesine neden olur. Eğer bir koreograf, dansçının havada durduğu bir gösteri planlamak isterse, Dünya ile dansçı arasında, ikisinin arasındaki kütleçekimi kuvvetini tam olarak dengeleyen bir itme kuvveti olması gerekir: Bu durum ancak çekme ve itme kuvvetleri arasında tam bir denge varsa gerçekleşebilir. Einstein aynı mantığın bütün evren için de geçerli olduğunu anlamıştı. Kütleçekimi kuvveti nasıl dansçının yükselmesini yavaşlatıyorsa, uzayın genişlemesini de yavaşlatırdı. Kütleçekimini dengeleyen itici bir kuvvet olmaksızın nasıl dansçı havada duramazsa, evren de sa-

bit bir boyutta kalamazdı. Einstein kozmolojik sabiti ortaya attı, çünkü bu terim denklemlere girdiği zaman, kütleçekiminin böyle itici bir kuvvet sağladığını bulmuştu.

Acaba bu matematiksel terimin fiziksel anlamı nedir? Kozmolojik sabit nedir, yapısı nasıldır, normal kütleçekimine karşı koyarak itici bir kuvvet uygulamayı nasıl başarır? Einstein'ın çalışmasının modern metni -Lemaitre'a kadar giden bir metin- kozmolojik sabiti, birörnek ve türdeş olarak bütün uzayı dolduran, egzotik bir enerji türü olarak yorumluyor. "Egzotik" diyorum çünkü Einstein'ın çözümlemesi bu enerjinin nereden gelebileceğini belirlemiyor ve kısa bir süre sonra göreceğimiz gibi, kullanılan argümanların matematiksel tanımları, bunun proton, nötron, elektron ya da toton gibi tanıdık parçacıklardan oluşmayacağını kesinlikle belirtiyor. Einstein'ın kozmolojik sabitinin anlamını tartışırken günümüzün fizikçileri "uzayın kendi enerjisi" veya "karanlık enerji" deyimlerini kullanıyorlar, çünkü eğer bir kozmolojik sabit olsaydı; uzay, doğrudan göremeyeceğimiz, saydam ve amorf bir şeyle dolu olurdu; kozmolojik sabitle dolu olan uzay, hâlâ karanlık görünürdü. (Bu, eskinin esir kavramını ve uzayda sıfırdan farklı bir değer alan, dahayeni Higgs alanı kavramını andırıyor. Kozmolojik sabitle Higgs alanları arasında yakında inceleyeceğimiz yakın bir bağlantı olduğundan, bu ikinci benzerlik yalnızca raslantı olamaz.) Yine de, kozmolojik sabitin kaynağını ve kimliğini belirlemeden bile, Einstein bunun kütleçekimsel sonuçlarını ortaya koyabildi ve çok önemli bir sonuca ulaştı.

Bu sonucu anlamak için, genel göreliliğin henüz üzerinde durmadığımız bir özelliğinden haberdar olmanız gerekir. Kütleçekimine Newton'un yaklaşımında iki cisim arasındaki kuvvet yalnızca iki şeye bağlıdır: Kütleleri ve aralarındaki uzaklık. Cisimler ne kadar büyük kütleli ve birbirine yakınsa, aralarındaki kütleçekimi kuvveti de o kadar büyüktür. Genel görelilikteki durum da çok benzerdir ama Einstein'ın denklemleri, Newton'un kütleyle odaklanmasının çok sınırlı olduğunu gösteriyor. Genel göreliliğe göre, kütleçekimi alanının şiddetine katkıda bulunan

faktör, yalnızca cisimlerin kütlesi (ve aralarındaki uzaklık) değildir. *Enerji* ve *basıncın* da katkıları vardır. Bu, önemli olduğundan bir an durup ne anlama geldiğini anlamaya çalışalım.

Yirmibeşinci yüzyılda olduğunuzu ve beyaz-yakalı suçluları disiplin altında tutmaya yönelik olarak beceriye dayalı bir yaklaşımı deneyen, en yeni Düzeltmeler Bölümü'nün, Akıl Salonu adı verilen deney odasında tutulduğunuzu varsayın. Mahkûmların yeniden özgürlüklerine kavuşmalarının tek yolu, kendilerine verilen bulmacaları çözmek. Komşu hücredeki mahkûm, *Gilligan Adası'nın* yeni versiyonlarının neden yirmi ikinci yüzyılda sürpriz bir şekilde geri geldiğini ve o zamandan beri çok popüler olduğunu bulmaya çalışıyor. Bu yüzden burada daha epeyce kalacak gibi. Sizin bulmacanızsa daha basit. Size iki tane altın küp verilmiş. Boyutları aynı olan bu küpler tam olarak aynı miktarda altından yapılmış. Sizin yapmanız istenen şey, bunları çok hassas bir teraziye koyduğunuzda farklı ağırlıkta olmalarını sağlamak. Küplerdeki altın miktarını değiştirmenize kesinlikle izin yok, o nedenle kazıma, yontma, lehimleme gibi işlemler yapamazsınız. Eğer bu bulmacayı Newton a sormuş olsaydınız, anında bir çözümü olmadığını söylerdi. Newton yasalarına göre, aynı altın miktarları aynı kütlelere karşılık gelir. Her iki küp de aynı terazinin üzerinde olduğundan, üzerlerine etki eden kütleçekimi kuvveti aynı olacaktır. Newton, bu durumda küplerin ağırlığının aynı olduğu sonucuna varacaktır. Bunda herhangi bir "eğer", "ve", "ama" olamaz.

Ama siz, yirmi beşinci yüzyıl lise genel görelilik bilginizle bir çıkış yolu buluyorsunuz. Genel görelilik, iki cismin arasındaki kütleçekimi kuvvetinin yalnızca cisimlerin kütlesine⁵ (ve aralarındaki uzaklığa) değil, her iki cismin toplam *enerjisine* olan bütün katkılara da bağlı olduğunu göstermiştir. Şimdiye kadar altın küplerin sıcaklığından hiç söz etmedik. Sıcaklık, ortalama olarak, her küpü oluşturan altın atomlarının ne kadar hızla sağa-sola hareket ettiklerinin -atomların ne kadar enerjik olduklarının- bir ölçüsüdür (atomların *kinetik* enerjilerini verir). Bu nedenle, eğer küplerden birini ısıtırsanız, atomları daha enerjik

olacağı için, soğuk küpe oranla biraz daha ağır geleceğini fark ediyorsunuz. Bu, Newton'un haberdar olmadığı bir gerçektir (sıcaklıkta 10 derece Celsius'luk bir artış, 1 kilogramlık bir küpün kütlesini bir kilogramın milyon kere milyarda biri kadar artırır, yani artış çok küçüktür), bu çözümle özgürlüğünüze kavuşuyorsunuz.

Yani, neredeyse kavuşuyordunuz. Sizin suçunuz biraz ağırcı olduğundan, son dakikada kurul sizin ikinci bir bulmaca çözmeniz gerektiğine karar veriyor. Size birbirinin eşi olan iki tane eski moda, kapağı açılınca içinden yaya bağlı bir bebek fırlayan kutu veriliyor. Şimdi de yapmanız gereken, bu ikisinin ağırlıklarının farklı olması için bir yol bulmak. Ama bu sefer, hem nesnelerdeki madde miktarını değiştirmeniz yasak, hem de her ikisini tam olarak aynı sıcaklıkta tutmak zorundasınız. Eğer Newton'a bu bulmaca verilmiş olsaydı, ömrünün sonuna kadar burada kalırdı. Oyuncakların kütlesi aynı olduğu için, ağırlıklarının da aynı olacağı ve bulmacanın çözümsüz olduğu sonucuna varırdı. Ama genel görelilik bilginiz bir kere daha imdadınıza yetişiyor: Oyuncaklardan birindeki yayı sıkıştırarak bebeği kutuya sokuyor, diğerinde ise yayı gevşek, bebeğiye dışarıda bırakıyorsunuz. Neden? Elbette sıkıştırılmış yay sıkıştırılmamış olana oranla daha fazla enerjiye sahiptir; yayı sıkıştırmak için kuvvet uygulamak zorundasınız ve sıkıştırılmış yayın kutunun kapağına basınç yaparak kapağı hafifçe yukarı doğru kaldırması harcadığınız çabanın bir kanıtıdır. Gene, Einstein'a göre, fazladan *herhangi* bir miktar enerji, kütleçekimini etkiler ve fazladan ağırlık yapar. Bu yüzden yayı sıkıştırılmış durumda olan kapağı kapalı oyuncak, yayı gevşek ve kapağı açık oyuncığa göre biraz daha ağır gelir. Newton bunu fark edemezdi. Sonunda gerçekten özgürlüğünüze kavuşuyorsunuz.

İkinci bulmacanın çözümü, genel göreliliğin peşinde olduğumuz, zor fark edilen ama kritik bir özelliğinin ipucunu verir. Genel göreliliği anlattığı makalesinde Einstein, matematiksel olarak kütleçekiminin yalnızca kütle ve yalnızca enerjiye (ısı gibi) değil, uygulanabilecek herhangi bir *basınca* da bağlı olduğu

nu göstermişti. Eğer kozmolojik sabiti anlamak istiyorsak, ihtiyacımız olan temel fizik işte budur. Nedeni şöyle. Sıkıştırılmış yayın uyguladığı gibi dışarı doğru yönelmiş olan basınca *pozitif basınç* denir. Pozitif basınç, doğal olarak, kütleçekimine pozitif katkı yapar. Ama kritik nokta şudur ki, bir bölgedeki basıncın, kütle ve toplam enerjiden farklı olarak *negatif* olduğu durumlar vardır, yani basınç dışarı doğru itmek yerine içeri doğru emer. Her ne kadar kulağa özel olarak egzotik gibi geliyorsa da, negatif basınç, genel göreliliğin bakış açısından olağanüstü bir şeyle sonuçlanır: *Pozitif basınç, bildiğimiz çekici kütleçekimine katkıda bulunurken, negatif basınç "negatif kütleçekimine yani itici kütleçekimine katkıda bulunur!"*⁶

Bu sersemletici kavrayış, kütleçekiminin her zaman çekici bir kuvvet olduğu yolundaki iki yüz yıldan daha eski inançta bir yara açtı. Gezegenler, yıldızlar ve galaksiler, elbette Newton'un doğru bir biçimde gösterdiği gibi çekici kütleçekimi uygularlar. Ama basınç önemli olduğunda (gündelik koşullar altındaki sıradan maddede basıncın kütleçekimine katkısı ihmal edilebilir düzeydedir) ve özellikle basınç negatif olduğunda (proton ve elektronlardan oluşan normal maddede basınç pozitifdir, kozmolojik sabitin bildiğimiz bir şeyden oluşamamasının nedeni budur) kütleçekimine Newton'a şok geçirtebilecek bir katkı yapar, iticidir.

Bu sonuç, bundan sonra anlatılacakların çoğu için çok önemli olduğu ve kolaylıkla yanlış anlaşılabilceği için, bir temel noktayı vurgulamak isterim. Kütleçekimi ve basınç, bu öyküde birbirleri ile ilişkili ama farklı iki karakterdir. Basınçlar, ya da daha doğru bir deyişle basınç farkları, kütleçekimsel olmayan kendi kuvvetlerini uygulayabilirler. Suyu daldığınızda kulak zarlarınız dışarıdan iten suyla içeriden iten havanın basınçları arasındaki farkı algılayabilir. Bu tümüyle doğrudur. Ama şimdi kütleçekimi ve basınç hakkında söyleyeceklerimiz bunlardan çok farklıdır. Genel göreliliğe göre, basınç dolaylı yoldan bir kuvvet daha uygulayabilir -kütleçekimi kuvveti uygulayabilir- çünkü basınç kütleçekimi alanına katkıda bulunur. Basınç da madde ve enerji gibi bir kütleçekimi kaynağıdır. Önemli olan şu ki, eğer bir böl-

gede basınç negatifse, bölgeyi kaplayan kütleçekimi alanına çekme yönünde değil de, *itme* yönünde katkıda bulunur.

Bunun anlamı da basınç negatif olduğunda normal kütle ve enerjiden kaynaklanan çekici kütleçekimi ile negatif basınçtan kaynaklanan egzotik, itici kütleçekimi arasında bir rekabetin ortaya çıkacağıdır. Eğer bir bölgedeki negatif basınç yeterince negatifse, itici kütleçekimi üstün gelecektir; her şeyi birbirine doğru çekmek yerine birbirinden uzaklaştırmak için itecektir. İşte kozmolojik sabitin öyküye girdiği yer burasıdır. Einstein'ın genel görelilik denklemlerine eklediği kozmolojik terim, uzayın bir örnek enerjiyle dolu olduğu anlamına gelir ama çok önemli olarak, denklemler bu enerjinin bir örnek, negatif bir basınca sahip olduğunu gösterirler. Dahası, kozmolojik sabitin negatif basıncının kütleçekimsel itmesi, pozitif enerjisinden gelen kütleçekimsel çekmeyi yener ve böylece itici kütleçekimi bu rekabetten üstün çıkar: *Kozmolojik sabit itici kütleçekimi kuvveti uygular.'*

Bu, Einstein'ın tam da istediği şeydi. Evrene dağılmış halde bulunan sıradan madde ve ışınım, çekici kütleçekimi kuvveti uygulayarak uzayın her bölgesinin diğerlerini çekmesine neden olur. Einstein'ın evrene bir örnek dağıldığını düşündüğü yeni kozmolojik terim itici kütleçekimi uygulayarak uzayın her bölgesinin diğer bölgeleri *itmesine* neden olur. Einstein, yeni terimin boyutunu dikkatlice seçerek normal, çekici kütleçekimi ile yeni keşfedilen itici kütleçekimini çok hassas bir şekilde dengeleyebileceğini ve ortaya durağan bir evren çıkarabileceğini buldu.

Üstelik yeni, itici kütleçekimi uzayın kendisinin enerji ve basıncından kaynaklandığı için Einstein bunun şiddetinin birikici olduğunu buldu; büyük uzaysal uzaklıklarda bu kuvvet daha güçlenir, çünkü arada daha büyük bir uzay bölgesinin bulunması, daha fazla itme demektir. Einstein, Dünyamızın ve bütün Güneş sisteminin uzaklık ölçeklerinde bu yeni itici kütleçekimi kuvvetinin çok küçük olduğunu gösterdi. Bu yeni kuvvet, ancak çok büyük kozmolojik uzaklıklarda önemli hale gelir, böylece yakın çevreye uygulandığında hem Newton kuramı hem de Einstein'ın genel görelilik kuramı başarılı olmayı sürdürür. Kı-

sacası, Einstein'ın bu konudaki başarısı katmerli oldu: Hem genel göreliliğin cazip ve deneylerce doğrulanmış olan özelliklerinin korunmasını sağladı, hem de hiç genişlemeyen ve büzülmeyen, değişmeyen bir evrenin ebedi huzurunun keyfini çıkarması mümkün hale geldi.

Bu sonuçla hiç kuşkusuz Einstein derin bir nefes almış olmalı. Eğer genel göreliliğin formülleştirilmesine adanmış ve on yıl süren yorucu araştırmaların, gece gökyüzüne bakan birinin çok açık olarak gördüğü durağan evrenle tutarlı olmadığı ortaya çıksaydı, bu son derece üzücü olurdu. Ama görmüş olduğumuz gibi, hikâye on yıl sonra bambaşka bir şekil aldı. 1929'da Hubble üstünkörü gece gözlemlerinin yanıltıcı olabileceğini gösterdi. Hubble'ın sistematik gözlemleri evrenin durağan *olmadığını*, genişlediğini ortaya koydu. Eğer Einstein genel göreliliğin özgün denklemlerine güvenmiş olsaydı, evrenin genişlemekte olduğunu, gözlemsel olarak keşfedilmesinden on yıldan daha uzun bir zaman önce kuramsal olarak bulmuş olacaktı. Elbette bu, tüm zamanların en büyük keşiflerinden biri -hatta en büyük keşfi- olabilirdi. Hubble'ın elde ettiği sonuçları öğrendikten sonra Einstein, kozmolojik sabiti düşündüğü gün için pişman oldu ve bu sabiti genel görelilik denklemlerinden büyük bir dikkatle çıkardı. Herkesin bu hazin olayı unutmasını diledi ve on yıllar boyunca herkes unuttu da.

Ama 1980'lerde kozmolojik sabit şaşırtıcı, yepyeni bir biçimde geri dönüş yaptı ve insanların kozmolojiyle ilk uğraşmaya başladığı günden beri, kozmoloji düşüncesindeki en büyük altüst oluşun habercisi oldu.

Sıçrayan Kurbağalar ve Süper Soğuma Üzerine

Eğer yukarıya doğru yükselmekte olan bir beyzbol topu görüyorsanız, Newton'un kütleçekimi yasasını (veya Einstein'ın daha rafine denklemlerini) kullanarak topun daha sonraki yörüngesini belirleyebilirsiniz. Eğer gerekli hesapları yaparsanız, topun hareketini son derece somut bir şekilde kavrarınız. Ama geriye hâlâ cevaplanmamış bir soru kalır: Her şeyden önce bu

topu yukarıya fırlatan kimdir veya nedir? Sonraki gelişimini matematiksel olarak değerlendirdiğiniz, yukarı doğru olan bu hareketi top başlangıçta nasıl kazanmıştır? Bu örnekte, cevabı bulmak için gereken şey, birazcık daha araştırmaktır (tutkulu büyük-lig oyuncuları biraz önce vurdukları topun, park halindeki bir Mercedes'in ön camına doğru gittiğini anlamadıkları sürece). Ama bu sorunun daha zor bir benzeri, genel göreliliğin evrenin genişlemesine getirdiği açıklamayı zor durumda bırakır.

Özgün olarak Einstein, Hollandalı fizikçi Willem de Sitter ve daha sonraları Friedmann ve Lemaître tarafından gösterildiği gibi, genel göreliliğin denklemleri evrenin genişlemesini mümkün kılar. Ama tıpkı Newton denklemlerinin topun yukarı doğru olan hareketinin nasıl başladığı konusunda hiçbir ipucu vermemesi gibi, Einstein'ın denklemleri de evrenin nasıl genişlemeye başladığı konusunda bir ipucu vermez. Kozmologlar yıllar boyunca uzayın başlangıçtaki genişlemesini, açıklanamayan bir veri olarak aldılar ve denklemleri oradan başlayarak uyguladılar. Diha önce Büyük Patlama'nın, patlamanın kendisi konusunda sessiz kaldığını söylerken bunu kastetmiştim.

1979 Aralık ayında, her şeyin değiştiği o geceye kadar durum böyleydi. O gece, Stanford Doğrusal İvmelendirici Merkezi'nde (Stanford Linear Accelerator Center) fizik konusunda doktora sonrası çalışmaları yapan Alan Guth (şimdi MIT'de profesördür), bundan daha iyisinin yapılabileceğini gösterdi. Çok daha iyisinin yapılabileceğini. Her ne kadar bugün, neredeyse yirmi beş yıldan daha uzun bir süre sonra bile henüz tam olarak çözülmemiş olan ayrıntılar varsa da, Guth, Büyük Patlamaya herkesin beklediğinden daha büyük bir patlama sağlayarak kozmolojik sessizliğe bir son verdi.

Guth kozmoloji eğitimi almamıştı. Uzmanlık alanı parçacık fiziği idi ve 1970'lerin sonlarında Cornell Üniversitesi'nden Henry Tye ile birlikte büyük birleşik kuramlardaki Higgs alanlarının çeşitli özellikleri üzerinde çalışıyordu. Geçen bölümdeki, Higgs alanının değeri sıfırdan farklı, özel bir sayıya (potansiyel enerji kâsesinin ayrıntılı şekline bağlı olan bir sayı) oturduğun-

da, uzayın bir bölgesindeki olası en düşük enerji düzeyine katkıda bulunduğu, kendiliğinden simetri kırılması tartışmasını hatırlayın. Evrenin ilk anlarında, sıcaklık olağanüstü yüksekken, Higgs alanının değerinin, tıpkı sıcak bir kâsenin içine düştüğünde bacakları yandığı için can havliyle sıçrayan bir kurbağa gibi bir değerden diğerine şiddetle sıçradığını, ama evren soğurken Higgs'in de kâsenin dibine doğru kayarak enerjisini nasıl en düşük değere indirdiğini görmüştük.

Guth ve Tye, Higgs alanının en düşük enerjili duruma (Şekil 9.1c'deki kâsenin vadisi) ulaşmakta neden geç kalmış olabileceği sorusu üzerinde çalışıyorlardı. Eğer kurbağa benzetmesini Guth ve Tye'in sordukları soruya uyarlarsak şöyle olur: Eğer kâse soğumaya başlamadan önceki sıçramalarından birinde, kurbağa kendini merkezdeki düzlük üzerinde bulsaydı ne olurdu? Kâse soğumaya devam ederken kurbağa kâsedeki vadiye kaymak yerine merkezdeki düzlükte oturuyor (ve sakın bir şekilde kurtları yiyor) olsaydı ne olurdu? Veya fiziğin diliyle söylersek, dalgalanan Higgs alanının değeri, enerji kâsesinin merkezdeki düzlüğüne oturmuş olsaydı ve evren soğumaya devam ederken orada kalsaydı ne olurdu? Eğer bu olursa, fizikçiler Higgs alanının *süper soğumuş* olduğunu söylerler ki, bu da, evrenin sıcaklığı Higgs alanının düşük-enerjili vadiye yaklaşmasını beklediğiniz noktanın altına düşmüş bile olsa, daha yüksek-enerjili bir durumda yakalanmış olarak kaldığı anlamına gelir. (Bu, yüksek derecede saflaştırılmış suyun davranışına benzer. Sıfır derecenin altına süper soğutulursa saf su donmaz ve sıvı halde kalmayı sürdürür, çünkü buzun oluşması, çevresinde kristallerin büyüyeceği küçük safsızlıklar gerektirir.)

Guth ve Tye bu olasılıkla ilgileniyorlardı, çünkü hesapları bu olasılığın, araştırmacıların büyük birleşme konusundaki çeşitli girişimlerde karşılaştıkları bir problemle (*manyetik tek kutup problemi*⁸) ilgili olabileceğini gösteriyordu. Ama Guth ve Tye bunun başka bir sonucu olabileceğini fark ettiler ki çalışmalarını çok önemli kılan da bu oldu. Süper soğumuş Higgs alanıyla ilişkili olan enerjinin -hatırlarsanız, alanın yüksekliği enerjisini tem-

sil ediyordu, bu yüzden yalnızca değeri kâsenin vadisinde olduğunda alanın değeri sıfır oluyordu- evrenin genişlemesi üzerinde bir etkisi olabileceğinden kuşkulandılar. 1979 Aralığının ilk günlerinde Guth bu önsezisini izledi. Bulduğu şuydu.

Düzlükte kalmış olan bir Higgs alanı yalnızca uzayı enerjiyle doldurmakla kalmaz. Guth, hayati öneme sahip olacak şekilde bu alanın, birörnek bir *negatif basınca* katkıda bulunduğunu fark etti. Aslında, enerji ve basınç göz önüne alındığında, düzlükte kalmış olan bir Higgs alanının, kozmolojik sabit ile aynı özelliklere sahip olduğunu buldu: Böyle bir alan, uzayı enerji ve negatif basınçla doldurur ve bunu kozmolojik sabit ile aynı oranlarda yapar. Böylece, Guth süper soğumuş bir Higgs alanının uzayın genişlemesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koydu: Higgs alanı kozmolojik sabit gibi uzayı genişleten, itici bir kitleçekimi uygulard.⁹

Bu noktada, zaten negatif basınç ve itici kitleçekimini bildiğinizden, şöyle düşünebilirsiniz: Tamam, Guth'un Einstein'ın kozmolojik sabit rüyasını gerçekleştirmek için fiziksel bir mekanizma bulmuş olması güzel bir şey, ama ne olmuş yani? Bunun neresi büyük iş? Kozmolojik sabit kavramı uzun süre önce terkedilmişti. Fiziğe sokulması Einstein'ın bir utancıdır. Altmışıyl önce gözden düşmüş olan bir şeyin yeniden keşfedilmesi yüzünden duyulan bu heyecan neden?

Şişme

Nedeni şu. Her ne kadar süper soğumuş bir Higgs alanı, kozmolojik sabitle bazı özellikleri paylaşıyorsa da, Guth bunların tam olarak aynı olmadıklarını fark etti. Aralarında iki kilit fark vardı ve bunlar da fark yaratan farklardı.

Birincisi, kozmolojik sabit bir sabitken -zamanla değişmez, bu yüzden dışarı doğru değişmeyen bir itme oluşturur- süper soğumuş bir Higgs alanı sabit olmak zorunda değildir. Şekil 10.la daki tümsekte oturan bir kurbağa olduğunu varsayın. Kurbağa orada bir süre oturabilir ama er geç şu veya bu yöne doğru bir sıçrama -bu sıçrama kâse sıcak olduğu için yapılan bir

yişle, tam olarak Büyük Patlama kuramında olmayan şeyi buluruz: *Bir patlama* ve üstelik büyük bir patlama. Guth'ın keşfinin heyecan uyandıracak bir şey olmasının nedeni budur.¹²

Guth'ın büyük keşfinden sonra ortaya çıkan kozmoloji manzarası şöyleydi. Uzun zaman önce, evrenin yoğunluğu olağanüstü yüksekken, enerjisini taşıyan şey, potansiyel enerji kâsesinin en düşük noktasından uzak bir değerde kalmış olan bir Higgs alanıydı. Bu özel Higgs alanını diğerlerinden (bilinen parçacık türlerinin kütlelerinden sorumlu olan elektrozayıf Higgs alanı veya büyük birleşme kuramlarında¹³ ortaya çıkan Higgs alanları gibi) ayırt edebilmek için, bu alan genellikle *inflaton* (*şişme parçacığı*) alanı olarak adlandırılır.* Negatif basıncı nedeniyle inflaton alanı, uzayın her noktasını diğerlerinden uzağa doğru sürükleyen devasa bir kütleçekimsel itme yarattı; Guth'ın diliyle söylersek, inflaton evreni şişmeye zorladı. İtme yalnızca 10^{-35} saniye sürdü ama öylesine güçlüydü ki, bu kısacık anda evren dev bir oranda şişti. İnflaton alanının potansiyel enerjisinin tam şeklinin ayrıntılarına bağlı olarak evren, kolayca 110^{30} , 10^{50} veya 10^{100} kat genişlemiş olabilir.

Bunlar, akıllara durgunluk verici sayılardır. 10^{30} kat değerindeki bir genişleme faktörü -ki bu, tutucu bir tahmindir- bir DNA molekülünün yaklaşık olarak Samanyolu galaksisinin boyutlarına gelmesi demektir ve bu genişleme, bir göz kırpma süresinin milyar kere milyar kere milyarda birinden daha kısa bir zamanda gerçekleşmiştir. Bir karşılaştırma yapmak istersek, bu tutucu genişleme faktörü bile, standart Büyük Patlama kuramına göre aynı sürede ortaya çıkan genişlemeden milyarlarca ve milyarlarca kat daha büyüktür ve sonraki 14 milyar yılda ortaya birikici bir biçimde çıkan toplam genişleme faktörünü de geçer! Hesaplanan genişleme faktörünün 10^{30} dan daha büyük olduğu pek çok şişme modelinde ortaya çıkan uzaysal genişleme o kadar büyüktür ki, en güçlü teleskoplarla bile olsa görebildiği-

Şişme (inflation) sözcüğünün son hecesindeki "i" harfini unutmuş olduğumu düşünebilirsiniz ama unutmadım. Fizikçiler alan adları olarak, örneğin foton veya gluon gibi "on" ekiyle biten kelimeler seçer.

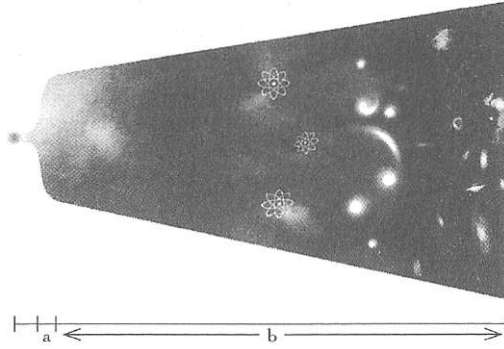
miz evren, tüm evrenin yalnızca çok küçük bir bölümüdür. Bu modellere göre evrenin çok büyük çoğunluğundan yayılan ışınlar henüz bize ulaşmış olamaz, çoğu da Güneş ve Dünya'nın ölümlerinin çok çok sonrasına kadar ulaşamayacaktır. Eğer bütün evren Dünya'nın boyutlarına kadar küçültülebilseydi, bizim ulaşabileceğimiz bölgenin boyutları bir kum tanesinininkini geçmezdi.

Patlamanın başlamasından kabaca 10^{-35} saniye sonra alan tümsekten kaydı ve uzaydaki değeri kâsenin dibine ulaşarak itici kuvveti durdurdu. İnflaton değeri aşağıya kayarken, hapso- lan enerjisi de genişleyen uzayı birörnek dolduran, sıradan madde parçacıkları ve ışınım -otların üzerinde yoğunlaşarak sabah şebnemine dönüşen puslu sis gibi- üretimine gitti.¹⁴ Bu noktadan sonra öykü, esas olarak standart Büyük Patlama kuramınıninki ile aynıdır: Patlamanın yan etkisi olarak uzay genişlemeye ve soğumaya devam etmiş, parçacıklar da kümelenerek galaksi, yıldız, gezegen gibi yapılara dönüşmüş ve Şekil 10.3'te gösterildiği gibi, şimdi gördüğümüz evren ortaya çıkmıştır.

Guth'ın keşfi -şişme kozmolojisi- Linde, Albrecht ve Steinhardt'ın önemli katkılarıyla uzayı neyin genişlettiği sorusuna bir cevap vermiştir. Sıfır enerjisinin üzerinde bir değere yerleşen bir Higgs alanı, uzayın şişmesine neden olan patlamayı tetikleyebilir. Guth, Büyük Patlama'nın patlamasını ortaya çıkarmıştır.

Şişmesel Formülasyon

Guth'ın keşfi hızla, büyük bir ilerleme olarak kabul gördü ve kozmoloji araştırmalarının en büyük demirbaşı haline geldi. Ama bu keşifte iki şeye dikkat etmek gerekir. Birincisi, standart büyük patlama modelinde patlamanın sıfır anında, evrenin en başlangıcında gerçekleştiği varsayılır, bu yüzden de ona "yaratılan olay" gözüyle bakılır. Ama nasıl bir dinamit çubuğu, fitilli ancak uygun bir biçimde tutuşturulduğu zaman patlarsa, şişme kozmolojisinde de patlama, koşullar uygun hale geldiğinde -değeri, itici kütleçekiminin dışarı doğru patlamasını tetikleyen enerji ve negatif basıncı sağlayan bir inflaton alanı olduğunda-



Şekil 10.3 (a) Şişme kozmolojisi evren tarihinin ilk dönemlerine hızlı, devasa bir genişleme patlaması ekler, (b) Bu hızlı genişlemeden sonra evrenin evrimi, Büyük Patlama modelinin öngördüğü standart evrime dönüşür.

ortaya çıkmıştır ve evrenin "yaratılması" ile çakışıyor olmak zorunda değildir. Bu nedenle, şişme patlamasının mutlaka evreni yaratan olay olmak zorunda olmadığını, önceden var olan bir evrende gerçekleşmiş olduğunu düşünmek daha doğrudur. Bunu Şekil 10.3'te gösterdik. Asıl kaynak konusunda hâlâ sürmekte olan bilgisizliğimizi simgelemek üzere: Özellikle, eğer şişme kozmolojisi doğru ise, neden bir inflaton alanının var olduğunu, neden potansiyel enerji kâsesinin şişmenin ortaya çıkması için uygun şekle sahip olduğunu, neden tüm bu tartışmaların içinde yer aldığı uzay ve zamanın var olduğunu ve Leibniz'in deyiimiyle neden hiçbir şey yerine birşeyler olduğunu bilmediğimiz için, Şekil 9.2'deki bulanık alanın bir bölümünü koruduk.

Bununla ilgili ikinci bir gözlem de, şişme kozmolojisinin tek ve benzersiz bir kuram olmadığıdır. Şişme kozmolojisi, kütleçekiminin itici olabileceği ve böylece uzayı genişletebileceği kavrayışının çevresine inşa edilmiş olan kozmolojik bir yapıdır. Patlamanın kesin ayrıntıları -ne zaman oldu, ne kadar sürdü, itmenin şiddeti, patlama sırasında evrenin genişleme faktörü, patlama yaklaştığında şişmenin bilinen maddeye depoladığı enerji miktarı vb.- inflaton alanının potansiyel enerjisinin, şu anda yalnızca kuramsal yaklaşımlarla bilebileceğimizin ötesinde olan boyutu ve şeklinin ayrıntılarına bağlıdır. Bu yüzden yıllar boyunca

ca fizikçiler her olasılığı incelediler -potansiyel enerjinin çeşitli şekilleri, birbiri ardı sıra işleyen inflaton alam değerleri vb.- ve hangi seçimlerin astronomi gözlemleri ile tutarlı kuramlar ortaya çıkardığını belirlediler. Önemli olan, şişme kozmolojisi kuramlarının, ayrıntıların üstüne çıkan ve bu yüzden de esas olarak her kavrayışta ortak olan özelliklerinin var olmasıdır. Patlamanın kendisi, tanım gereği böyle bir özelliktir ve bütün şişme kuramları patlama içerir. Ama standart Büyük Patlama kozmolojisine meydan okuyan önemli problemleri çözdükleri için, bütün şişme modellerinde ortak olan bir dizi başka, hayati özellik daha vardır.

Şişme ve Ufuk Problemi

Bu problemlerden *ufuk problemi* olarak bilinen biri, daha önce rastlamış olduğumuz mikrodalga fon ışınlamının birörnekliliği ile ilgilidir. Bize uzayda herhangi bir yönden ulaşan mikrodalga ışınlamının sıcaklığının, bir başka yönden gelenle olağanüstü bir hassasiyetle (bir derecenin binde birinden daha küçük) aynı olduğunu hatırlayın. Bu gözlemsel gerçeklik çok önemlidir, çünkü uzaydaki türdeşliği kanıtlayarak evrenin kuramsal modellerinde inanılmaz bir basitleştirme olanağı sağlar. Daha önceki bölümlerde bu türdeşliği, uzayın olası şekillerinin sayısını azaltmak ve birörnek kozmik zamanı tartışmak amacıyla kullanmıştık. Problem, uzayın *nasıl* bu kadar birörnek olduğunu açıklamaya çalıştığımızda ortaya çıkar. Uzayın birbirinden bu kadar uzak bölgeleri kendilerini nasıl sıcaklıkları böylesine aynı olacak şekilde ayarlamış olabilirler?

Eğer geride, Bölüm 4'te anlatılanları düşünürseniz, olasılıklardan biri, tıpkı yerel olmayan bir kuantum bağlantısının, birbirinden çok uzakta bulunan parçacıkların spinlerini birbirlerine uydurduğu gibi, belki birbirinden çok uzak uzay bölgelerinin sıcaklıklarını da birbirine uydurmuş olması olabilir. Bu ilginç bir öneri olsa da, o bölümün sonunda tartışıldığı gibi, en kontrollü ortamların dışındakilerde bağlantının olağandışı zayıflaması, bunu olanaksız hale getirir. Tamam, belki de daha basit bir açıkla-

ma vardır. Nasıl aralarındaki kapı bir süre açık tutulduğunda sıcak bir mutfakla serin bir oturma odası aynı sıcaklığa geliyorsa, çok eskiden bu bölgeler birbirine çok yakinken sıcaklıkları yakın temas sonucunda da eşitlenmiş olabilir. Ama standart Büyük Patlama kuramında bu açıklama da başarısız oluyor. Bu konuda aşağıdaki gibi düşünülebilir.

Başlangıcından bugüne kadar kozmik evrimin tamamını gösteren bir film izlediğinizi varsayın. Filmi rasgele bir zamanda durdurun ve kendinize şunu sorun: Uzayda iki farklı bölge, tıpkı mutfak ve oturma odası gibi, birbirinin sıcaklığını etkilemiş olabilir mi? Aralarında ışık ve ısı alışverişi yapmış olabilirler mi? Cevap, iki şeye bağlıdır: Bu bölgelerin arasındaki uzaklık ve patlamadan o ana kadar geçmiş olan zaman. Eğer aralarındaki uzaklık ışığın Büyük Patlama'dan o ana kadar geçen süre içinde katetmiş olabileceğinden azsa, bu bölgeler birbirlerini etkilemiş olabilir; fazlaysa, olamaz. Şimdi, gözlenebilir evrendeki *bütün* bölgelerin başlangıcın hemen sonrasında birbirleri ile etkileştiğini düşünebilirsiniz, çünkü filmi ne kadar geriye sararsak bölgeler birbirine o kadar yaklaşır ve etkileşimleri de o kadar kolay olur. Ama bu çok acele verilmiş bir hükümdür; bu bölgelerin birbirine yakın olmakla birlikte, haberleşebilecekleri zamanın da daha az olduğu gerçeğini göz önüne almaz.

Gerçek bir çözümleme yapabilmek için, kozmik filmi geriye doğru oynatırken şu anda gözlenebilir evrenin birbirlerine çok uzak yerlerindeki iki bölgeye -birbirlerine şu anda etkileşiyor olamayacakları kadar uzak iki bölgeye- odaklandığınızı varsayın. Bu bölgelerin arasındaki uzaklığı yarıya düşürebilmek için, filmi başlangıca doğru yarıdan çok sarmak zorundayız, o zaman bu uzay bölgeleri birbirine daha yakın olmakla birlikte aralarındaki haberleşme gene de olanaksız olurdu: Uzaklıkları yarıya inerdi ama Büyük Patlama'dan o ana kadar geçen süre de günümüze kadar geçen sürenin yarısından *daha* az olurdu, ışık da şimdiye kadar aldığı yolun yarısından *daha* azyol alırdı. Benzer biçimde, filmdeki bu noktadan başlangıca doğru yarıdan daha fazla geriye sararak bu bölgeler arasında-

ki uzaklığı yeniden yarıya indirdiğimizde, haberleşmeleri daha da güçleşir. Bu tür bir kozmik evrimle, bölgeler geçmişte birbirine daha yakın olsa bile, sıcaklıklarını bir şekilde eşitlemiş olmaları daha fazla -daha az değil- şaşırtıcı hale geliyor. Bu bölgeleri zamanda gittikçe daha fazla geriye doğru izlediğimizde, ışığın katedebildiği yola göre, bölgelerin haberleşmesi git gide olanaksız hale geliyor.

Standart Büyük Patlama kuramında olup biten tam olarak budur. Standart Büyük Patlama da kütleçekimi yalnızca çekici bir kuvvet olarak davranır, bu yüzden başlangıçtan beri uzayın genişlemesini yavaşlatmaktadır. Şimdi, bir şey eğer yavaşlıyorsa, belirli bir uzaklığı katetmesi için gereken zaman uzayacaktır. Örneğin, bir yarış atının çok hızlı çıkış yaparak yarış parkurunun ilk yarısını iki dakikada tamamladığını ama iyi gününde olmadığı için yarışın ikinci yarısında önemli oranda yavaşlayarak bitirmesinin üç dakika daha aldığını varsayın. Yarışın filmi ni tersten izlerken, atı yarış parkurunun yarısını gösteren işareti geçerken görmek için filmi yarıdan daha fazla geriye doğru izlememiz gerekir (beş dakikalık filmi ikinci dakikaya kadar geri oynatmamız gerekir). Benzer biçimde, standart Büyük Patlama kuramında kütleçekimi uzayın genişlemesini yavaşlattığı için, iki bölge arasındaki uzaklığı yarıya düşürmek için, kozmik filmdeki herhangi bir noktadan geriye doğru yarıdan fazla sarmak zorundayız. Yukarıda olduğu gibi, uzaydaki bölgeler daha önceki dönemlerde birbirlerine daha yakın olsalar da, birbirlerini etkilemeleri daha zordu. Bu nedenle bir şekilde aynı sıcaklığa ulaşmış olmaları daha şaşırtıcıdır.

Fizikçiler bir bölgenin *kozmik utkunu* (veya kısaca *utkunu*) verilen bölgeyle Büyük Patlama'dan bugüne kadar ışık alışverişinde bulunmuş olabilecek olan, çevredeki en uzak uzay bölgeleri olarak tanımlarlar. Yeryüzünde belirli bir noktadan görebileceğimiz en uzak yerler olarak tanımlanabilecek olan ufukla kozmik ufuk arasında böyle bir benzerlik vardır.¹⁵ Bu durumda gözlemlerin ayrılmaz bir parçası olan *ufuk problemi*, ufukları her zaman birbirinden ayrı olmuş olan bölgelerin -birbirleriyle asla

etkileşmiş, haberleşmiş veya birbirleri üzerine bir etki uygulamış olamayacak olan bölgelerin- nasıl olup da hemen hemen aynı sıcaklıklara gelmiş olduğu bilmecesidir.

Ufuk problemi standart Büyük Patlama modelinin yanlış olduğunu göstermez, ama bir açıklama ister. Şişme kozmolojisi de bir açıklama sunar.

Şişme kozmolojisinde kütleçekiminin itici olduğu ve bunun uzayı gittikçe daha hızlı genişlemeye zorladığı kısa bir dönem vardı. Kozmik filmin bu döneminde uzayın iki bölgesi arasındaki uzaklığı yarıya düşürmek için filmi yarıdan *daha az* geriye sarmak zorundasınızdır. Biraz önceki yarış atımızın yarış parkurunun yarısını iki dakikada koştuğunu ama hayatının yarısını çıkararak hızlanıp, parkurun ikinci yarısını bir dakikada koştuğunu düşünün. Atın parkurun yarısını gösteren işaretten geçişini görüntülemek için, üç dakikalık yarış filminin yalnızca üçte birini, yani yarısından azını geriye sarmak zorunda kalırsınız. Benzer şekilde, şişmeden kaynaklanan genişleme sırasında, uzayın iki bölgesinin birbirinden uzaklaşmalarının giderek hızlanması, kozmik filmde bunların arasındaki uzaklığın yarıya düşürülmesi için geriye sarılması gereken film miktarının yarıdan az -çok daha az- olduğunu gösterir. Bu yüzden, zamanda geriye doğru gittikçe iki bölgenin birbirini etkilemesi *kolaylaşır*, çünkü orantılı olarak, haberleşebilecekleri daha fazla zaman kalır. Hesaplar, eğer şişmeden kaynaklanan genişleme evresi uzayı 10^{30} kattan daha fazla genişletmişse, ki bu şişme kaynaklı genişlemenin belirli gerçekleştirmelerinde zaten elde edilmiş olan bir miktardır, uzayın şu anda görmekte olduğumuz bütün bölgelerinin -uzaydaki sıcaklığını ölçtüğümüz bütün bölgelerin- yan yana olan mutfak ve oturma odası kadar kolay haberleşebildiğini ve bu yüzden evrenin ilk dönemlerinde son derece etkili bir biçimde aynı sıcaklığa ulaşabildiğini göstermektedir.¹⁶ Özet olarak, uzay başlangıçta birörnek sıcaklık dağılımına ulaşacak şekilde yavaşça genişler ve sonra, patlamadan kaynaklanan hızlı bir genişlemeyle evren ağır ağır başlangıcını yaparak birbirine yakın bölgeleri uzaklara fırlatır.

Şişme kozmolojisi, uzayı dolduran mikrodalga fonunun gizemli birörnekliliğini işte böyle açıklar.

Şişme ve Düzlük Problemi

Şişme kozmolojisinin karşılaştığı ikinci problem uzayın şekliyle ilgilidir. Bölüm 8'de birörnek uzaysal simetri ölçütünü koymuş ve uzayın dokusunun üç şekilde bükülebileceğini görmüştük. İki boyutlu benzetmelere geri dönersek, olasılıklar pozitif eğrilik (bir topun yüzeyi gibi), negatif eğrilik (bir eyer yüzeyi gibi) ve sıfır eğrilikti (sınırsız bir masa yüzeyi veya sınırlı-boyutlu video oyun ekranı gibi). Genel göreliliğin ilk günlerinden beri, fizikçiler uzayın her hacmindeki toplam madde ve enerjinin *-madde/enerji yoğunluğu-* uzayın eğriliğini belirlediğini anlamışlardı. Eğer madde/enerji yoğunluğu yüksekse, uzay kendini çekerek bir küre şekline kapanacaktır, yani eğrilik pozitif olacaktır. Eğer madde/enerji yoğunluğu düşükse, uzay bir eyer şeklinde açılacak, yani eğrilik negatif olacaktır. Veya son bölümde söz edildiği gibi, madde/enerji yoğunluğunun özel bir değeri için *-uzayın her metre küpünde beş hidrojen atomuna (yaklaşık 10^{-23} gram) eşit olan kritik yoğunluk-* uzay, bu iki ucun arasında bulunacak ve son derece düz olacaktır: Yani eğrilik sıfır olacaktır.

Şimdi bilmeceye geelim.

Standart Büyük Patlama modelinin temelinde yer alan genel görelilik denklemleri, eğer ilk dönemlerdeki madde/enerji yoğunluğu *tam olarak* kritik yoğunluğa eşit olsaydı, evren genişlerken kritik yoğunluğa eşit kalacağını gösteriyor.¹⁷ Ama eğer madde/enerji yoğunluğu kritik yoğunluktan biraz küçük veya biraz büyük idiyse, sonraki genişleme bu yoğunluğu kritik değerinden çok uzaklaştıracaktı. Sayılar konusunda bir fikir edinmek için, eğer patlamadan sonra evrenin yoğunluğu kritik yoğunluğun yüzde 99,99'u kadar olsa, hesaplar, sonraki genişlemenin bu yoğunluğu kritik değerin ,00000000001'ine kadar düşüreceğini gösteriyor. Bu, bir dağcının, her iki tarafı da uçurum olan bıçağı keskinliğinde bir sırtta yürümesine benziyor. Eğer tam yerine basarsa hedefine ulaşabilir. Ama yanlış yöne çok küçük bir

adım, çok farklı sonuçlara yol açabilir. (Ve aşırı benzetme yapmış olma riskini göze alarak, standart Büyük Patlama modelinin bu özelliği bana yıllar önce üniversite yurdundaki duşu hatırlattı: Eğer musluğu tam olarak ayarlarsanız normal sıcaklıktaki suyla rahat bir duş yapabiliirdiniz. Ama musluk bu ayarın birazcık aşağısı veya yukarısında kalmışsa, ya haşlanır veya donardınız. Bazı öğrenciler bu yüzden duş yapmaktan tümünden vazgeçmişti.)

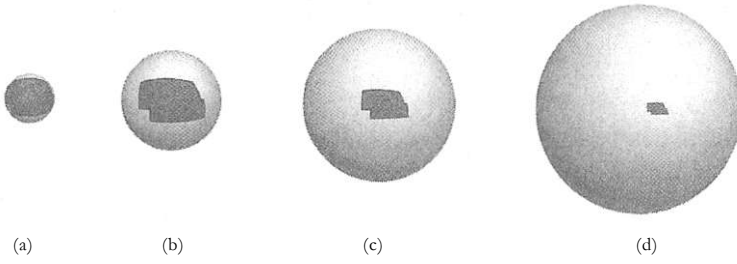
On yıllar boyunca fizikçiler evrendeki madde/enerji yoğunluğunu ölçmeye çalışmışlardır. 1980'lerde, her ne kadar ölçümler tam olmaktan uzak olsa da, kesin olan bir şey vardı: Evrendeki madde/enerji yoğunluğu, kritik yoğunluktan binlerce ve binlerce defa küçük ya da büyük değildi; bunun sonucunda da uzay ne pozitif, ne de negatif yönde fazla eğiydi. Bunun anlaşılması standart Büyük Patlama modelinin üzerine pek de kullanışlı olmayan bir ışık tutabilir. Bu, standart Büyük Patlama modelinin gözlemlerle uyumlu olması için, bir mekanizmanın -kimsenin bilmediği ve açıklayamadığı bir mekanizmanın- evrenin ilk dönemlerindeki madde/enerji yoğunluğunu, kritik yoğunluğa *olağanüstü* yakın olacak şekilde ayarlamış olduğunu gösteriyordu. Örneğin, hesaplar patlamadan bir saniye sonra evrendeki madde/enerji yoğunluğunun, kritik yoğunluğa, onun değerinin *yüzde birinin milyon kere milyonda birinden* daha yakın olması gerektiğini gösteriyor. Eğer madde/enerji yoğunluğu bu kritik değerden çok az daha büyük bir sapma bile yapsa, standart Büyük Patlama modeli bugünkü madde/enerji yoğunluğunun, gözlediğimizden çok farklı olacağını öngörüyor. O zaman, standart Büyük Patlama modeline göre, evren ilk dönemlerinde, tıpkı tepenin üzerinde yürüyen dağcı gibi, çok dar bir sırtta kalmış olmalı. Milyarlarca yıl önceki koşullarda minik bir sapma, günümüzde astronomların gözlemlerinin ortaya koyduğu evrenden çok farklı bir evrenin ortaya çıkmasıyla sonuçlanabilirdi. Bu, *düzlük problemi* olarak bilinir.

Her ne kadar buraya kadar olan tartışmamız temel fikri açıklamış olsa da, düzlük probleminin hangi anlamda bir problem

olduğunu anlamak önemlidir. Düzlük problemi hiçbir şekilde standart Büyük Patlama modelinin yanlışı olduğunu göstermez. Sadık bir inananın, düzlük problemine tepkisi, evrenin ilk dönemlerindeki -standart Büyük Patlama kuramının gözlemleri doğrulayan öngörülere yol açması için gerektirdiği- iyi ayarlanmış madde/enerji yoğunluğunu açıklanamayan bir veri olarak alıp, omuzlarını silkerek, kısa ve sertçe "O zamanlar öyleydi" şeklinde olur. Ama bu cevap çoğu fizikçiyi tiksindirir. Fizikçiler, eğer bir kuramın başarısı bazı özelliklerin açıklayamadığımız ayarlanma şekillerine son derece bağlı ise, o kuramın doğal olmadığını kabul ederler. Evrenin ilk dönemlerindeki madde/enerji yoğunluğunun niçin kabul edilebilir bir değere bu kadar hassas bir şekilde ayarlanmış olduğunun nedenini açıklamadığından, birçok fizikçi standart Büyük Patlama modelinin yüksek ölçüde kurmaca olduğunu düşündü. Bu nedenle, düzlük problemi, standart Büyük Patlama modelinin, üzerinde çok az bilgi sahibi olduğumuz, uzak geçmişteki koşullara olan olağanüstü hassasiyetine dikkat çekiyor; kuramın işlemesi için nasıl evreni *olduğu gibi* varsayması gerektiğini gösteriyor.

Tersine, fizikçiler öngörülleri çok uzun zaman önce her şeyin nasıl olduğu gibi bilinmeyen niceliklere bağlı olmayan kuramlardan hoşlanırlar. Böyle kuramlar sağlıklı ve doğal hissi verirler, çünkü öngörülleri belirlenmesi çok zor, hatta olanaksız olan ayrıntılara bağlı değildir. Şişme kozmolojisinin kuramı, böyle bir kuramdır ve düzlük problemine gösterdiği çözüm bunun nedenini ortaya koyar.

Temel gözlem, çekici kütleçekimi kritik madde/enerji yoğunluğundan herhangi bir küçük sapmayı büyütürken, şişme kuramındaki itici kütleçekiminin, bunun tersini yaptığı yolundadır: Kritik yoğunluktan herhangi bir sapmayı *küçültür*. Bunun neden böyle olduğunu anlamak için en kolayı evrenin madde/enerji yoğunluğuyla, eğriliği arasındaki sıkı ilişkiyi geometrik açıdan tartışmaktır. Özellikle, dikkat ederseniz, ilk dönemlerde evrenin şekli önemli ölçüde eğri olmuş olsa bile, şişmeye bağlı genişlemeden sonra, günümüzün gözlenebilir evrenini kaplayabilecek



Şekil 10.4 Sabit boyutlu bir şekil, örneğin Nebraska eyaleti, gittikçe daha büyük çaplı küreler üzerine oturtulduğunda gittikçe daha düz görünür. Bu benzetmede küre bütün evreni, Nebraska ise gözlenebilir evreni -bizim kozmik ufkumuzun içindeki evreni- simgeliyor.

kadar büyük bir uzay bölgesi hemen hemen düz görünüyordu. Bu, geometrinin hepimizin bildiği bir özelliğidir: Bir basket topunun yüzeyinin eğri olduğu açıkça görülür ama Dünyanın yüzeyinin eğri olduğunu herkesin kabul etmesi için çok zaman geçmesi ve birçok düşünürün çabası gerekmiştir. Bunun nedeni, diğer her şey eşit olduğunda, bir şey büyüdüğü zaman algılanabilir eğriliğin azalması ve yüzeydeki belirli bir bölgenin daha düz görünmesidir. Eğer Nebraska eyaletini Şekil 10.4a'daki gibi birkaç yüz kilometre çaplı bir kürenin yüzeyine oturtmaya çalışırsanız, eğri görünür, ama Dünya yüzeyinde, bütün Nebraska'lıların fikir birliği içinde olacağı şekilde, düz görünür. Eğer Nebraska'yı çapı Dünyanınkinin bir milyar katı olan bir kürenin yüzeyine oturtursanız, daha da düz görünür.

Şişme kozmolojisinde uzay öylesine devasa bir faktörle gerilmiştir ki, görebildiğimiz kısım, dev evrenin yalnızca küçük bir parçasıdır. Bu yüzden, Şekil 10.4b'de görüldüğü üzere, dev bir kürenin yüzeyine oturtulmuş olan Nebraska gibi, evrenin tamamı eğri olsa bile, *gözlenebilir evren* hemen hemen düz görünür.¹⁸

Bu sanki dar sırtta yürüyen dağcının botlarına ve sırtın hemen altına farklı kutupta mıknatıslar yerleştirilmiş olması gibidir. Dağcının adımı sırttan tehlikeli şekilde uzaklaşsa bile, mıknatıslar arasındaki güçlü çekim botun güvenli bir şekilde sırta basmasını sağlar. Benzer biçimde, evren ilk dönemlerinde kritik madde/enerji yoğunluğundan birazcık uzaklaşmış olduğu için

düz olmaktan uzak olsa da, şişmeden kaynaklanan genişleme, uzayın ulaşabildiğimiz (görebildiğimiz) bölgelerinin düz şekil *almasını* ve ölçebildiğimiz madde/enerji yoğunluğunun kritik değere *yaklaşmasını* sağlar.

İlerleme ve Öngörü

Şişme kozmolojisinin ufuk ve düzlük problemleriyle ilgili görüşleri müthiş bir ilerlemeyi temsil eder. Kozmolojik evrimin madde/enerji yoğunluğu bugün gözlediğimiz evreninkine yakın olan, türdeş bir evren ortaya çıkarabilmesi için, standart Büyük Patlama modeli, evrenin ilk dönemlerindeki koşullarda kesin, açıklanamayan, neredeyse esrarengiz bir hassas ayar olmasını gerektirir. Bu ayar, standart Büyük Patlama'nın sadık savunucularının yaptığı gibi varsayılabilir ama bir açıklamanın olmayışı kuramın yapay görünmesine neden oluyor. Tersine, evrenin ilk dönemlerindeki madde/enerji yoğunluğundan bağımsız olarak, şişme kozmolojik evrimi, görebildiğimiz kısmın hemen hemen düz olması gerektiğini öngörür; yani, gözlediğimiz madde/enerji yoğunluğunun, kritik yoğunluğun neredeyse yüzde 100'üne yakın olması gerektiğini öngörür.

Evrenin ilk dönemlerindeki ayrıntılı koşullara bağlı olmamak şişme kuramının harika bir özelliğidir, çünkü bu durum çok önceki koşullar hakkındaki bilgisizliğimizden bağımsız olarak tanımlayıcı öngörülerde bulunabilmemizi sağlar. Ama şimdi sormamız gerekir: Bu öngörüler, ayrıntılı gözlemlere nasıl karşı koyuyor? Veriler şişme kozmolojisinin madde/enerjide kritik yoğunluğa sahip olan, düz bir evren görmemiz gerektiği yolundaki öngörüsünü destekliyor mu?

Yıllar boyunca cevap "Tam değil" gibi görünmüştü. Birçok astronomi araştırmasında evrende görülebilen madde/enerji miktarı dikkatlice ölçülmüş ve cevap, kritik yoğunluğun yaklaşık yüzde 5'i olarak ortaya çıkmıştı. Bu, standart Büyük Patlama kuramının doğal olarak -yapay ayarlamalar olmaksızın- yol açtığı çok büyük ya da çok küçük yoğunluklardan uzaktır ve daha önce, gözlemlerin evrendeki madde/enerji yoğunluğunun kri-

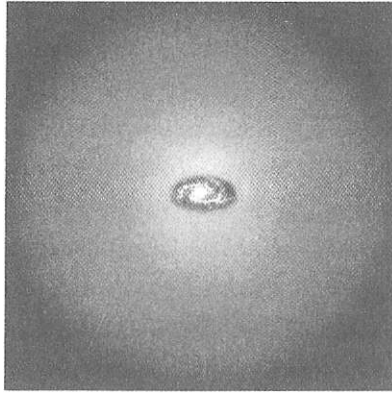
tik değerdan binlerce kat büyük veya küçük olmadığını gösterdiğinden söz ederken kısaca söz etmiş olduğum şey budur. Böyle olsa bile yüzde 5, şişmenin öngördüğü yüzde 100'den epeyce küçük kalıyor. Ama fizikçiler verilerin değerlendirilmesinde çok dikkatli olunması gereğinin uzun süredir farkındalar. Yüzde 5 değerdinin bulunduğı astronomi araştırmalarının çoğı, yalnızca ışık veren ve bu yüzden astronomların teleskoplarıyla görülebilen madde ve enerjiyi kapsar. On yıllar boyunca, hatta şişme kozmolojisinin keşfinden önce bile, evrenin önemli bir karanlık tarafı olduğu yolunda çok fazla kanıt vardı.

Karanlık Öngörüsü

1930'ların başında, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde astromoni profesörü olan Fritz Zwicky (simetri konusundaki takdiri arkadaşlarına küresel piçler demesine yol açmış olan ve bunu "nereden bakarsanız bakın, piç gibi görünüyorlar" diye açıklayan, iğneleyiciliğı ile ünlü bilim insanı¹⁹⁾), Dünyadan 370 milyon ışık yılı uzaklıktaki binlerce galaksiden oluşan Coma kümesinin dış bölgelerindeki galaksilerin, ışık yayan maddenin yaratılabileceğı kütleçekimi ile açıklanamayacak kadar hızlı hareket ettiklerini fark etti. Zwicky'nin çözümlemesi, tıpkı hızla dönen bir bisiklet lastiğinden etrafa sıçrayan su damlaları gibi, en hızlı hareket eden galaksilerin kümeden dışarıya fırlamaları gerektiğini gösterdi. Ama hiçbirini fırlamıyordu. Zwicky, kümede ışık yaymayan ama kümeyi bir arada tutmak için gerekli olan kütleçekimini sağlayan fazladan madde olabileceğini tahmin etti. Hesapları da, eğer bu açıklama doğru ise, kümenin kütesinin büyük çoğunluğunun bu ışık saçmayan madde olması gerektiğini gösterdi. 1936'da Mount Wilson gözlemevinde Başak (Virgo) kümesini inceleyen ve benzer bir sonuca ulaşan Sinclair Smith tarafından destekleyici kanıt bulundu. Ama her iki bilim insanının ve sonraki birkaçının da gözlemleri çeşitli belirsizlikler içerdiğinden, birçok kimse, kütleçekimi galaksi gruplarını bir arada tutan, görülemeyen büyük miktarda maddenin varlığı konusunda ikna olmadı.

Sonraki otuz yıl boyunca, ışık yaymayan madde konusundaki kanıtlar birikmeye devam etti,²⁰ ama bu konuyu kökünden halleden Washington'daki Carnegie Enstitüsü'nden Vera Rubin ile birlikte Kent Ford ve diğerlerinin çalışmaları oldu. Rubin ve çalışma arkadaşları birçok dönen galaksideki yıldızların hareketlerini incelediler ve eğer gördükleri madde orada bulunanın tümü ise, birçok galaksideki yıldızların düzenli olarak dışarıya doğru fırlatılmaları gerektiği sonucuna vardılar. Gözlemleri, galaksilerdeki görülebilen maddenin, en hızlı hareket eden yıldızların galaksiden kurtulmasını engelleyebilecek kütleçekimini üretmeyeceğini net bir biçimde ortaya koyuyordu. Bununla birlikte, yaptıkları ayrıntılı çözümlemeler, içlerinde bulundukları galaksilerin de, kütleleri galaksinin ışık yayan maddesinin kat kat üzerinde olan, dev bir ışık yaymayan madde topunun içinde olmaları durumunda (Şekil 10.5'te görüldüğü gibi) bu yıldızların kütleçekimsel olarak galaksilere bağlı kalabileceğini de gösterdi. Böylece, tıpkı seyircilerin aydınlatılmamış bir sahnede yalnızca beyaz eldivenli eller gördüğü halde siyah giysili bir insanın var olduğu sonucunu çıkarması gibi, astronomlar da evrenin *karanlık madde* ile -bir araya gelip kümelenerek yıldız oluşturmayan, ışık yaymayan ama görünmeden kütleçekimi kuvveti uygulayan madde ile- dolu olması gerektiği sonucuna vardılar. Evrenin ışık yayan bileşenleri -yıldızlar- dev karanlık madde okyanusundaki deniz fenerleri gibiydiler.

Ama eğer yıldızların ve galaksilerin gözlenen hareketlerine karanlık madde neden oluyorsa, bu maddenin yapısı nedir? Şu ana kadar, bunu kimse bilmiyor. Her ne kadar astronomlar ve fizikçiler çeşitli egzotik parçacıklardan kozmik mini kara delikler denizine kadar pek çok olası bileşenin varlığını önermiş olsalar da, karanlık maddenin kimliği temel, hayaletimsi bir gizem olarak kalmaya devam ediyor. Ama yapısını belirlemeden bile, kütleçekimsel etkilerini yakından inceleyen astronomlar, evrende dağılmış olarak ne kadar karanlık maddenin var olduğunu büyük bir kesinlikle belirlemeyi başardılar. Buldukları cevap, kritik yoğunluğun yaklaşık yüzde 25'ine kadar ulaşıyor-



Şekil 10.5 Bir karanlık madde topunun içine gömülü olan bir galaksi (şekilde görülmesini sağlamak için karanlık madde yapay olarak ışıklandırılmıştır)

du.²¹ Böylece, görünen maddedeki yüzde 5 ile birlikte karanlık madde, şişme kozmolojisinin öngördüğü miktarın yüzde 30'unu açıklıyor.

Bu elbette bir ilerlemedir, ama uzun bir süre boyunca bilim insanları, eğer şişme kozmolojisi doğru ise, bulunmayı bekleyen yüzde 70 maddeden neyin sorumlu olduğunu düşünerek kafalarını kaşıdılar. Ama sonra, 1998'de iki grup astronom aynı şoke edici sonuca vardılar ki, bu da bizi başladığımız yere, Albert Einstein'ın önsezilerine geri götürüyordu.

Kaçak Evren

Nasıl tıbbi bir tanıyı doğrulamak için bir başka doktordan ikinci bir görüş almaya çalışırsanız, fizikçiler de veriler ve kuram şaşırtıcı bir sonucu işaret ettiği zaman başka görüşler de almaya çalışırlar. Bu başka görüşler arasında en ikna edici olanlar, olaya özgün çözümleme ile çok farklı bir bakış açısından bakarak aynı sonuca ulaşanlardır. Çözüm okları farklı açılardan aynı noktaya yöneldiği zaman, hepsinin bilimsel olarak hedefin tam ortasına yönelmiş olma olasılığı çok yüksektir. Doğal olarak, o zaman, şişme kozmolojisi güçlü bir şekilde tamamiyle garip bir şey -evrenin madde/enerjisinin yüzde 70'inin henüz tanımlanmadığı ve ölçülemediği gibi- önerdiği için, fizikçiler bağımsız bir

doğrulama arayışına girdiler. *Yavaşlama parametresinin* ölçümünün bu işe yarayabileceği uzun süredir biliniyordu.

Şişme patlamasının hemen sonrasında beri bildiğimiz çekici kütleçekimi evrenin genişlemesini yavaşlatmaktadır. Bu yavaşlamanın oranı yavaşlama parametresi olarak adlandırılır. Bu parametrenin kesin ölçümü evrendeki toplam madde miktarı konusunda bağımsız bir görüş ortaya koyar: Işık yaymakta olsun veya olmasın daha fazla madde, daha büyük kütleçekimi ve uzayın genişlemesinde daha belirgin bir yavaşlama anlamına gelir.

On yıllar boyunca astronomlar evrenin genişlemesindeki yavaşlamayı ölçmeye çalışmışlardır, ama bu her ne kadar kuramsal olarak kolay olsa da pratikte zordur. Galaksiler veya kuasarlar gibi uzak gök cisimlerini gözlediğimiz zaman, onları çok eskiden oldukları gibi görürüz: Ne kadar uzağa bakarsak, zamanda da o kadar geçmişe bakıyoruz demektir. Bu yüzden, eğer bizden hangi hızla uzaklaşmakta olduklarını ölçebilirsek, evrenin uzak geçmişte hangi hızla genişlediğini ölçebiliyoruz demektir. Üstelik eğer bu ölçümleri çeşitli uzaklıklardaki gök cisimleri için yapabilirsek, geçmişteki çeşitli zamanlarda evrenin genişleme hızını ölçmüş oluruz. Bu genişleme hızlarını karşılaştırarak uzayın genişlemesinin zamanla nasıl yavaşladığını ve buradan da yavaşlama parametresini bulabiliriz.

Yavaşlama parametresini ölçmek için bu stratejiyi kullanmak, bu nedenle iki şeyi gerektirir: Verilen bir gök cisminin uzaklığını saptamak için bir yöntem (ki zamanda ne kadar geriye baktığımızı bilebilelim) ve cismin bizden hangi hızla uzaklaştığını saptamak için bir yöntem (ki böylece, geçmişte o anda uzayın genişleme hızını bulabiliriz). Bunlardan ikincisini bulmak kolaydır. Nasıl bir polis aracının sireni, bizden uzaklaşırken daha pes tonlara kayarsa, bir gök cisminin yaydığı ışığın frekansı da, cisim bizden uzaklaşıyorsa, azalır. Yıldızların, galaksilerin ve kuasarların bileşenleri olan hidrojen, helyum ve oksijen atomlarının yaydıkları ışıklar, laboratuvar koşullarında çok dikkatli bir biçimde incelendiklerinden, aldığımız ışığı laboratuvarda görülenle karşılaştırarak gök cisminin kesin hızı bulunabilir.

Ama ilkini, yani gök cisminin tam olarak ne kadar uzakta olduğunu belirlenmesinin, astronomların baş ağrısı olduğu kanıtlanmıştır. Bir şey ne kadar uzaktaysa o kadar sönük görünmesini beklersiniz ama bu basit gözlemi nicel bir ölçüme dönüştürmek zordur. Bir cismin uzaklığını, görünür parlaklığını kullanarak ölçmek için, onun gerçek parlaklığını -hemen yanınızda olsa ne kadar parlak olacağını- bilmek zorundasınız. Milyarlarca ışık yılı uzaklıktaki bir cismin gerçek parlaklığını saptamak zordur. Genel strateji, temel astrofiziksel nedenlerle her zaman aynı, güvenilir parlaklıkta olan gök cismi türlerini aramaktır. Eğer uzayda çeşitli uzaklıklarda parlayan 100 wattlık elektrik ampulleri olsaydı, işimiz kolay olurdu, çünkü verilen bir ampulün parlaklığını, ne kadar sönük görüldüğüne bakarak kolayca bulabilirdik (her ne kadar 100 wattlık bir ampulü oldukça büyük uzaklıklardan görmek zor olsa da). Ama uzay böyle değil, o zaman, standart parlaklıktaki ampullerin yerini ne tutabilir, ya da astronomi diliyle konuşacak olursak, *standart ışık kaynaklarının* yerini ne tutabilir? Yıllar boyunca astronomlar çeşitli olasılıkları incelediler ama şimdiye kadar bulunan en başarılı aday, süpernova patlamalarının belirli bir türüdür.

Yıldızlar nükleer yakıtlarını bitirdikleri zaman, dışarıya doğru olan ve yıldızın çekirdeğindeki nükleer füzyondan kaynaklanan basınç azalır ve yıldız kendi ağırlığı altında çökmeye başlar. Yıldızın çekirdeği kendi kendini ezerken sıcaklığı ani olarak yükselir, bu da kimi zaman yıldızın dış katmanlarını parlak bir göksel havai fişek gösterisiyle dışarı püskürten devasa bir patlamayla sonuçlanır. Böylesi bir patlama süpernova patlaması olarak bilinir; patlayan tek bir yıldız, haftalar süresince bir milyar güneş parlaklığında ışık verir. Bu, gerçekten akıllara durgunluk vericidir: Hemen hemen tüm bir galaksi parlaklığında ışık veren tek bir yıldız! Farklı yıldız türleri -farklı boyutlarda, farklı atom bolluklarında vb.- farklı süpernova türlerine yol açabilir ama yıllar boyunca astronomlar belirli bazı süpernova patlamalarının her zaman aynı gerçek parlaklıkla ışıdığını fark ettiler. Bunlar *Ia türü* süpernova patlamalarıdır.

Ia türü süpernovada, bir beyaz cüce yıldız -nükleer yakıt stoğunu bitirmiş olan ama kendi süpernova patlamasını başlatamayacak kadar küçük kütleli olan bir yıldız-yakınındaki yoldaş yıldızından kendine madde çeker. Cüce yıldızın kütlesi özel bir kritik değere, Güneş'in kütlesinin 1.4 katına ulaştığında, yıldız süpernovaya dönüştüren kaçak bir nükleer reaksiyon başlar. Böyle süpernova patlamaları, beyaz cüce aynı kritik değere ulaştığı zaman ortaya çıktığından, patlamanın karakteristiği, tüm parlaklığı da dahil olmak üzere, bir olaydan diğerine aynıdır. Üstelik 100 wattlık ampullerin tersine süpernovalar öylesine güçlüdürler ki, yalnızca standart, güvenilir parlaklıklara sahip olmakla kalmazlar, onları evrenin her tarafında görebilirsiniz. Bu yüzden standart ışık kaynaklarının en önemli adaylarıdır.²²

1990'Iarda, biri Lawrence Berkeley Ulusal Laboratuvarı'ndan Saul Perlmutter, diğeri ise Avustralya Ulusal Üniversitesi'nden Brian Schmidt tarafından yönetilen iki grup astronom, Ia türü süpernovaların uzaklaşma hızlarını ölçmek yoluyla evrenin yavaşlamasını -ve böylece evrendeki toplam madde/enerjiyi- belirleyebilmek için çalışmaya başladılar. Patlamalarıyla ortaya çıkan ışığın şiddeti önce hızla artıp daha sonra yavaş yavaş azalarak belirgin bir fark sergilediği için, bir süpernovanın Ia türü olduğunun belirlenmesi oldukça kolaydır. Ama Ia türü bir süpernovayı gerçekten patlama sırasında yakalamak çok büyük bir olaydır, çünkü bu tür süpernovalar tipik bir galakside birkaç yüz yılda bir patlarlar. Buna rağmen, binlerce galaksinin aynı anda gözlelenebilmesini sağlayan geniş açılı ve yüksek teknoloji ürünü olan teleskoplar sayesinde bu gruplar, Dünya'dan çeşitli uzaklıklarda elli kadar Ia türü süpernova bulmayı başardılar. Uzun uğraşlar sonucu her birinin uzaklığının ve uzaklaşma hızının belirlenmesinden sonra, her iki grup da tam anlamıyla hiç beklenmedik bir sonuca ulaştı: Evrenin yaklaşık 7 milyar yaşında olduğu zamandan günümüze kadar, genişleme hızı *azalmıyordu*. Tam tersine, genişleme hızı *artıyordu*.

Gruplar, tıpkı otoyol gişelerine yaklaşan bir aracın yavaşlaması gibi, evrenin genişleme hızının ilk patlamadan sonraki 7

milyar yıl boyunca azaldığı sonucuna vardılar. Bu beklenen bir şeydi. Ama veriler, otoyol gişesinden geçen sürücünün gaza basarak hızlanması gibi, evrenin genişlemesinin de o zamandan günümüze kadar hızlandığını ortaya koydu. Uzayın patlamadan 7 milyar yıl sonraki genişleme hızı, 8 milyar yıl öncekinden, o da 9 milyar yıl önceki genişleme hızından *daha azdı* vb. Bunların tümü de günümüzdeki genişleme hızından *daha azdı*. Uzayın genişlemesinde beklenen yavaşlama, beklenmedik bir *ivmelenmeye* dönüşmüştü.

Ama bu nasıl olabilirdi? İşte cevap, fizikçilerin bulmaya çalıştığı, eksik olan yüzde 70'lik kütle/enerjiye ilişkin, o destekleyici ikinci görüşü ortaya koymaktadır.

Kayıp Yüzde 70

Eğer zihinsel olarak geriye, 1917 yılına ve Einstein'ın kozmolojik sabiti ortaya atmasına giderseniz, evrenin nasıl ivmelenmekte olduğu konusunda bir öneride bulunmak için yeterli bilginiz var demektir. Bildiğimiz madde ve enerji uzaysal genişlemeyi yavaşlatan, çekici kütleçekimine yol açar. Ama evren genişleyip her şey giderek birbirinden uzaklaşmaya başlayınca, bu kozmik kütleçekimi, genişlemeyi hâlâ yavaşlatmakta olsa da, zayıflar. Bu da bizi, beklenmedik bir durumla karşı karşıya getirir. Eğer evrende bir kozmolojik sabit varsa -ve bunun değeri, küçük ve tam olması gerektiği kadar ise- patlamadan 7 milyar yıl sonrasına kadar patlamanın kütleçekimsel itmesi bildiğimiz maddenin çekici kütleçekimi tarafından yenilir ve bu da verilerle tam bir uyum içinde, genişlemede net bir yavaşlamaya yol açar. Ama daha sonra, bildiğimiz madde dağılıp kütleçekimi zayıflayınca, kozmolojik sabitin itmesi (ki bunun gücü maddenin dağılmasıyla zayıflamaz), yavaş yavaş üstün gelir ve *uzayın yavaşlayan genişleme dönemi,yerini ivmelenen genişleme dönemine bırakır*.

1990'ların sonunda, bu düşünüş mantığı ve verilerin derinlemesine çözümlenmesi, hem Perlmutter grubunun hem de Schmidt grubunun, 80 yıl kadar önce Einstein'ın kütleçekimsel

denklemlere kozmolojik sabiti sokarken haksız olmadığı sonucuna varmalarına yol açtı. Bu gruplar, evrende bir kozmolojik sabitin *bulunduğunu* ileri sürdüler.²³ Kozmolojik sabitin değeri Einstein'ın bulduğu gibi değildir, çünkü Einstein kütleçekimsel çekmenin itmeyle birbirlerini dengelediği, durağan bir evrenin peşindeydi. Bu araştırmacılar milyarlarca yıl boyunca itmenin daha üstün olduğunu buldular. Ama bu ayrıntı bir yana, eğer bu grupların keşifleri, dikkatli incelemeler ve halen yolda olan izleyici çalışmalardan sonra da doğru kalmaya devam ederse, o zaman Einstein bir kez daha evrenin temel bir özelliğini, bu kez deneysel olarak kanıtlanmasından 80 yıl önce görmüş olacak.

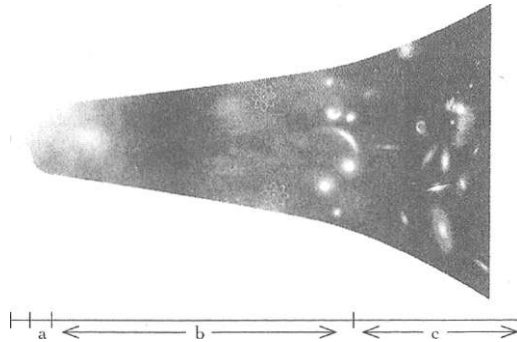
Bir süpernovanın yavaşlama hızı, bildiğimiz maddenin kütleçekimsel çekmesi ile kozmolojik sabitin sağladığı "karanlık enerjinin" kütleçekimsel itmesi arasındaki farka bağlıdır. Hem görülen hem de karanlık maddenin toplam miktarını kritik yoğunluğun yaklaşık yüzde 30'u kadar alan süpernova araştırmacıları, gözledikleri ivmeli genişlemenin, karanlık enerjisi kritik yoğunluğun yüzde 70'i kadar katkı yapan bir kozmolojik sabitin dışarı doğru itmesini gerektirdiği sonucuna vardılar.

Bu, önemli bir sayıdır. Eğer doğru ise, o zaman, bildiğimiz madde -protonlar, nötronlar, elektronlar- evrendeki kütle/enerjinin yalnızca yüzde 5 gibi önemsiz bir miktarını ve karanlık maddenin son zamanlarda tanımlanan bazı türleri bunun en azından *beş katını* oluşturuyor olmakla kalmaz, evrendeki madde/enerjinin çoğunluğuna uzayda dağılmış bulunan, tamamiyle farklı ve oldukça gizemli bir karanlık enerji türünün katkısı var demektir. Eğer bu fikirler doğru ise, o zaman Kopernik devrimini dramatik bir şekilde devam ettirmektedirler: Yalnızca evrenin merkezinde olmamakla kalmıyoruz, oluştuğumuz madde de kozmik okyanusta yüzen bir eşya gibidir. Eğer proton, nötron ve elektronlar büyük yapının dışında bırakılsalar bile, evrendeki toplam madde/enerji neredeyse hiç azalmaz.

Ama yüzde 70'in önemli bir sayı olmasının bunun kadar önemli, ikinci bir nedeni var. Kritik yoğunluğun yüzde 70'i kadar katkıda bulunan bir kozmolojik sabit, bildiğimiz madde ve

karanlık maddeden gelen diğer yüzde 30'la birlikte, evrendeki toplam madde/enerjiyi şişme kozmolojisinin öngördüğü yüzde 100'e ulaştırır. Bu yüzden, süpernova verilerinin gösterdiği dışarı doğru itiş, şişme kozmologlarının başlarını kaşıyarak aramakta oldukları evrenin görünmeyen yüzde 70'inden sorumlu olan, tam doğru miktardaki karanlık enerji ile açıklanabilir. Süpernova ölçümleri ve şişme kozmolojisi birbirlerini harikulade bir biçimde tamamlarlar. Birbirlerini doğrularlar. Her biri, diğeri için destekleyici bir ikincigörüş oluşturur.²⁴

Süpernova gözlemlerinin sonuçlarını şişmenin kuramsal görüşleriyle birleştirerek, kozmik evrim hakkında Şekil 10.6'da özetlenen şöyle bir şemaya ulaşırız. İlk dönemlerde evrenin enerjisi, kendi en düşük enerji düzeyinden uzakta bulunan bir inflaton alanı tarafından taşınıyordu. Ama sahip olduğu negatif basınç yüzünden, inflaton alanı bir şişme genişleme patlaması başlattı. 10^{-35} saniye sonra, inflaton alanı potansiyel enerji kâsesinin dibine kayınca, genişleme patlaması bitti ve şişme, hapsolmuş olan enerjisini, bildiğimiz madde ve enerji üretimi için serbest bıraktı. Milyarlarca yıl boyunca evrenin bu bilindik bileşenleri, uzaysal genişlemeyi yavaşlatan, çekici kütleçekimsel kuvvetler uyguladılar. Ama evren genişleyip seyreldikçe kütleçekimi azaldı. Yaklaşık 7 milyar yıl önce, bildiğimiz kütleçekimi kuvveti, evrenin kozmolojik sabitten gelen kütleçekimsel itmesinden



Şekil 10.6 Kozmik evrimin zaman çizgisi (a) Şişme patlaması (b) Standart Büyük Patlama evrimi (c) İvmeli genişleme dönemi

daha zayıf hale geldi ve o zamandan günümüze kadar da uzaysal genişleme sürekli olarak hızlanıyor.

Günümüzden yaklaşık 100 milyar yıl kadar sonra, birbirlerine en yakın olanların dışındaki galaksiler, şişen uzayla birlikte ışık hızını aşan hızlarla uzaklaşacakları için ne kadar güçlü teleskoplar kullanırsak kullanalım, onları görmemiz olanaksız hale gelecek. Eğer bu görüşler doğru ise, uzak bir gelecekle evren devasa, boş ve yalnız bir yer olacak.

Bilmeceler ve İlerleme

Bu keşiflerle, sonunda kozmoloji bilmecesinin parçalan açığa yerlerine oturmaya başlamış gibi görünüyor. Standart Büyük Patlama kuramının cevapsız bıraktığı sorular -Uzayın dışarı doğru şişmesini başlatan nedir? Fon ışınlamının sıcaklığı neden böylesine birörnek? Uzay neden düz bir şekle sahipmiş gibi görünüyor?- şişme kuramı tarafından ele alındı. Bu durumda bile, temel kökene ilişkin zor sorular birikmeye devam etti: Şişme patlamasından önce de bir dönem var mıydı, varsa nasıldı? İnflaton alanını, şişme genişlemesini başlatmak üzere en düşük enerji durumundan çıkaran şey neydi? Ve bütün sorular arasında en yenisi, "evren neden böyle azar azar bileşenlerden -yüzde 5 bilindik madde, yüzde 25 karanlık madde, yüzde 70 karanlık enerji- oluşmuş gibi görünüyor?" sorusudur. Kozmik reçetenin, şişmenin evrenin kritik yoğunluğunun yüzde 100'üne sahip olması gerektiği yolundaki öngörüsüyle son derece güzel uyumuna rağmen ve her ne kadar süpernova çalışmaları sonucu bulunan ivmeli genişlemeyi eş zamanlı olarak açıklıyor olsa da, birçok fizikçi bu karmaşık kompozisyonu son derece itici buluyorlar. Birçoğu evrenin yapısının neden bu kadar karmaşık olduğunu soruyor. Neden görünüşe göre böyle rasgele bolluklarda bir avuç bileşen var? Kuramsal çalışmaların hâlâ ortaya çıkaramadığı, belli başlı, anlamlı bir plan var mı?

Bu sorulara hiç kimse ikna edici cevaplar ileri süremedi; bunlar modern kozmoloji araştırmalarının temel ve baskılayıcı araştırma problemleri arasında olup evrenin doğuşunu tam olarak

anladığımızı iddia etmeden önce çözmemiz gereken pek çok karışık düğüm olduğunu hatırlamamıza yardımcı olurlar. Ama hâlâ çözülememiş olan zorluklara rağmen şişme, çok ön saflarda yer alan bir kozmoloji kuramıdır. Fizikçilerin şişme kuramına olan inancı, elbette şimdiye kadar incelediğimiz başarılarından kaynaklanmaktadır. Ama şişme kozmolojisine duyulan güvenin kökleri çok daha derinlerdedir. Gelecek bölümde göreceğimiz gibi, bir dizi başka görüş -bunlar hem kuramsal hem de gözlemsel keşiflerden gelir- bu alanda çalışan pek çok fizikçiyi, şişme yapısının, bizim kuşağımızın kozmoloji bilimine olan en önemli ve en kalıcı katkısı olduğuna ikna etmiştir.

XI. Bölüm

Elmaslarla Bezeli Gökyüzündeki Kuantumlar

Şişme, Kuantum Titrenimleri ve
Zamanın Oku

Şişme yapısının keşfi kuantum araştırmalarında yeni bir dönem başlattı ve o zamandan günümüze kadar geçen on yıllar boyunca bu konu üzerinde binlerce makale yazıldı. Bilim insanları, kuramın aklınıza gelebilecek her köşe-bucağını, her gediğini yokladılar. Bu çalışmalardan çoğu teknik açıdan önemli ayrıntılara odaklanmışken, diğerleri daha ileri giderek, şişmenin standart Büyük Patlama kuramının erişiminin ötesindeki problemleri çözmekle kalmadığını, aynı zamanda eski sorulara nasıl güçlü, yeni yaklaşımlar getirdiğini gösterdiler. Bunlar arasında, içinde şişmenin önemli ve gösterişli bir şekilde yer aldığı -galaksi gibi kümeli yapıların oluşması; gördüğümüz evrenin ortaya çıkabilmesi için gereken enerji ve (öykümüzde büyük öneme sahip olan) zamanın okunun kökeni ile ilgili olanlar- üç gelişme vardır.

Bir göz atalım.

Gökyüzüne Yazılı Kuantum

Şişme kozmolojisinin ufuk ve düzlük problemlerine bulduğu çözümler, ona ün kazandıran ilk iddialardı ve bu ün haklı olarak kazanıldı. Görmüş olduğumuz gibi, bu çözümler önemli kazanımlardı. Ama o zamandan bu yana geçen yıllar içinde birçok fizikçi, şişme kuramının en önemli katkıları arasında önemli bir başarının daha olduğuna inanma noktasına geldiler.

Övgü alan bu başarı, şimdiye kadar üzerinde düşünmemenizi tavsiye ettiğim bir konuyla ilgilidir: Nasıl oluyor da evrende galaksiler yıldızlar, gezegenler ve diğer kümeli yapılar bulunuyor? Son üç bölümde astronominin incelediği büyük ölçekli yapılara odaklanmanızı istedim. Bu ölçekler, evrenin türdeş görüldüğü ölçeklerdi, evrenin kendisinin birörnek bir bardak su gibi, galaksilerinse H_2O molekülleri gibi düşünülebileceği ölçeklerdi. Ama er veya geç kozmoloji, evren daha "küçük" ölçeklerde incelendiği zaman, galaksiler gibi kümeli yapıların keşfedildiği gerçeğiyle yüzleşmek zorundaydı. Burada, bir kere daha, bu bilmeceyle karşılaşıyoruz.

Eğer evren gerçekten büyük ölçeklerde düzgün, birörnek ve türdeş ise -bunlar, bütün astronomi çözümlemelerinin temelinde yer alan ve gözlemlerce desteklenen özelliklerdir- o zaman, daha küçük-ölçekli kümelenmeler nereden geliyor olabilir? Standart Büyük Patlama'nın sadık taraftarları, bir kere daha, omuz silkerek topu evrenin ilk dönemlerindeki esrarengiz bir şekilde ayarlanmış, uygun koşullara atarlar: Böyle bir taraftar "Başlangıçtan hemen sonra her şey büyük ölçüde düzgün ve birörnekti ama *tam olarak* birörnek değildi. Koşullar nasıl böyle geliştii, bunu bilemem. O zamanlar öyleydi. Zamanla bu minik kümelenmeler büyüdü. Bunlar çevrelerinden daha yoğun olmaları yüzünden daha fazla kütleçekimi uyguladıkları için, giderek büyüdüler. Sonunda da yıldızları ve galaksileri oluşturacak kadar büyük kümelenmeler haline geldiler." Eğer iki eksiği olmasaydı, bu, inandırıcı bir öykü olabilirdi: Başlangıçtaki tam türdeşlik veya bu önemli, küçük birörneklik bozukluklarının tam bir açıklamasının olmaması. Şişme kozmolojisinin tatmin edici

bir ilerleme sağladığı yer işte burasıdır. Şişmenin büyük ölçekli birörneklige bir açıklama önerdiğini zaten görmüştük ve şimdi öğreneceğimiz gibi, kuramın açıklayıcı gücü daha da ileri gider. Şişme kozmolojisine göre, yıldızların ve galaksilerin oluşumuyla sonuçlanan, başlangıçtaki birörneklilik eksikliği *kuantum mekaniğinden* gelir.

Bu görkemli fikir, fiziğin görünüşe göre birbiriyle ilişkili olmayan iki farklı alanı arasındaki karşılıklı etkileşmeden kaynaklanır: Uzayın şişme sonucu genişlemesi ve kuantum belirsizlik ilkesi. Belirsizlik ilkesi, evrendeki birbirlerini tamamlayan çeşitli fiziksel niteliklerin ne kadar kesinlikle belirlenebileceği konusunda her zaman bazı sınırlar olduğunu söyler. En bilindik örnek (Bölüm 4'e bakınız) maddeyle ilgilidir: Bir parçacığın konumu ne kadar büyük bir kesinlikle belirlenirse, hızındaki belirsizlik de o kadar büyük olur. Ama belirsizlik ilkesi alanlara da uygulanır. Esas olarak parçacıklara uygulanırken kullandığımız aynı mantıkla, belirsizlik ilkesi bir alanın bir konumdaki değeri ne kadar büyük bir kesinlikle belirlenirse, alanın o konumdaki değişme hızındaki belirsizliğin de o kadar büyük olacağını söyler. (Bir parçacığın bir noktadaki konumu ve hızı, kuantum mekaniğinde, bir alanın bir konumdaki değeri ve değişimiyle benzer roller oynarlar.)

Belirsizlik ilkesini, kuantum mekaniğinin her şeyi titrenimli ve çalkantılı hale getirdiğini söyleyerek özetleyebiliriz. Eğer bir parçacığın hızı tam bir kesinlikle betimlenemiyorsa, parçacığın bir saniyenin kesri kadar kısa bir süre sonraki yerini de betimleyenleyiz, çünkü *sonraki* konumu belirleyen şimdiki hızdır. Bir anlamda, parçacık şu ya da bu hızı almakta ya da daha kesin bir dille konuşmak gerekirse, birçok farklı hızın bir karışımını almakta özgür olduğu için çılgınca titreşecek ve gelişigüzel olarak şuraya buraya gidecektir. Alanlar için de benzer bir durum söz konusudur. Eğer bir alanın değişme hızı tam olarak belirlenemezse, o zaman herhangi bir noktada, kısa bir süre sonra bile alanın değerini belirleyemeyiz. Bir anlamda, alan şu veya bu hızla yukarı-aşağı salınacak, daha doğrusu birçok farklı değişim

hızının bir karışımını alacağı için, değeri çığınca, bulanık bir titrenim gösterecektir.

Gündelik hayatta parçacıklar için olsun, alanlar için olsun, bu titrenimler atom-altı ölçeklerde gerçekleştikleri için bunlardan doğrudan haberdar olamayız. Ama işte tam burada şişme önemli bir etki yapar. Şişme genişlemesinin ani patlaması uzayı öylesine devasa bir faktörle büyüttü ki, önceleri mikroskopik olan her şey sonradan makroskopik hale geldi. Önemli bir örnek şunu verebiliriz: Şişme kozmolojisinin öncüleri¹, gelişigüzel kuantum çalkantıları yüzünden bir konumdaki enerji diğerinden biraz farklı olabileceği için, değişik uzaysal konumlardaki kuantum titrenimleri arasındaki rastgele farkların, mikroskopik ortamda küçük türdeşlik bozukluklarını yaratmış olabileceğini fark ettiler. O zaman, uzayın daha sonraki şişmesi sonucunda bu minik değişimler kuantum alanından çok daha büyük ölçeklere kadar gerilerek, tıpkı bir balonun üzerine çizilmiş olan dalgacıkların balon şişirildiğinde büyümesi gibi, küçük miktarlarda kümeliğe yol açmış olabilir. Fizikçiler, standart Büyük Patlama modelinin sadık destekleyicilerinin, kanıtlamadan, yalnızca "o zamanlar öyleydi" şeklinde, ifade etmekle yetindikleri kümeliğin kaynağının bu olduğuna inanıyorlar. Şişme kozmolojisi, kaçınılmaz kuantum salınımlarının devasa ölçülerde gerilmesi yolunda bir açıklama getirir: Şişme genişlemesi minik, türdeş olmayan kuantum titrenimlerini gererek gökyüzüne yayar.

Kısa şişme evresinin bitişini izleyen birkaç milyar yıl boyunca bu minik kümelenmeler, kütleçekimsel kümelenme yoluyla büyümeye devam ettiler. Standart Büyük Patlama kuramında olduğu gibi, kümeler çevreye göre biraz daha fazla kütleçekimine sahip olduğundan, yakındaki maddeyi çekerek daha da büyüdüler. Zamanla bu kümeler yıldızları ve onların içinde bulundukları galaksileri ortaya çıkardılar. Elbette minik bir madde kümesinden galaksiye gidene kadar *pek çok* ayrıntılı adım vardır ve bu adımların birçoğunun hâlâ tam bir açıklaması yoktur. Ama yapının bütünü açıktır: Bir kuantum dünyasında belirsizlik ilkesinin doğasından gelen titrenimlilik nedeniyle hiçbir şey tam

olarak birörnek değildir. Şişme genişlemesi geçirmiş bir kuantum dünyasında böylesi birörneklik bozuklukları mikro dünyadan çok daha büyük ölçeklere kadar gerilerek, galaksi gibi büyük astrofiziksel oluşumların tohumunu atmış olabilir.

Temel fikir budur, onun için isterseniz bu paragrafı atlayabilirsiniz. Ama ilgilenenler için, bu tartışmayı biraz daha netleştirmek isterim. İnflaton alanının değeri potansiyel enerji kâsesinin dibine kaydığına şişme genişlemesinin bitmiş olduğunu ve alanın bütün enerjisinin ve negatif basıncının serbest kalmış olduğunu hatırlayın. Bunu, uzayın her yerinde birörnek ortaya çıkmış olarak -inflaton değeri her yerde aynı olarak- tanımlamıştık. Denklemlerden doğal olarak çıkan buydu. Ama bu yalnızca kuantum mekaniğinin etkilerini gözardı ettiğimiz zaman tam olarak doğrudur. Eğimli bir yüzeyden aşağı doğru yuvarlanan bilye gibi basit bir cisimden beklenebileceği üzere, inflaton alanının değeri gerçekten *ortalama olarak* kâsenin dibine kaymıştır. Ama kuantum mekaniği, tıpkı kâsenin dibine doğru kaymakta iken sağa-sola sıçrayan ve huzursuzlanan bir kurbağa gibi, inflaton alanının da salındığını ve titreştiğini söyler. Aşağıya kayarken, alanın değeri aniden ortalamanın biraz üzerine çıkmış veya biraz altına düşmüş olabilir. Bu titrenim yüzünden inflaton, en düşük enerji değerine farklı yerlerde ve biraz farklı zamanlarda düşmüştür. Böylece şişme genişlemesi uzayın değişik yerlerinde, çok az farklı zamanlarda bitmiş, böylece de değişik konumlardaki uzaysal genişleme, çok az farklı değerler alarak, birörneklik bozukluklarına -kırıksıklıklara-yol açmıştır. Pizzacının hamurun bir yerini diğerinden fazla uzatarak orada nasıl bir tümsek oluşturduğunu gözünüzün önüne getirin. Şimdi, normal önsezi, kuantum mekaniğinden kaynaklanan titrenimlerin, astrofiziksel ölçeklerle bir ilgisi olamayacağı yolundadır. Ama şişme ile evren, boyutlarını her 10^{-37} saniyede iki katına çıkararak öylesine devasa ölçülerde genişlemiştir ki, birbirine yakın yerlerde şişme sürelerindeki çok küçük farklar önemli kırıksıklıklarla sonuçlanmıştır. Gerçekten belirli şişme hesapları, böyle ortaya çıkmış olan türdeşlik bozukluklarının çok büyük olmaya eğilimli olduk-

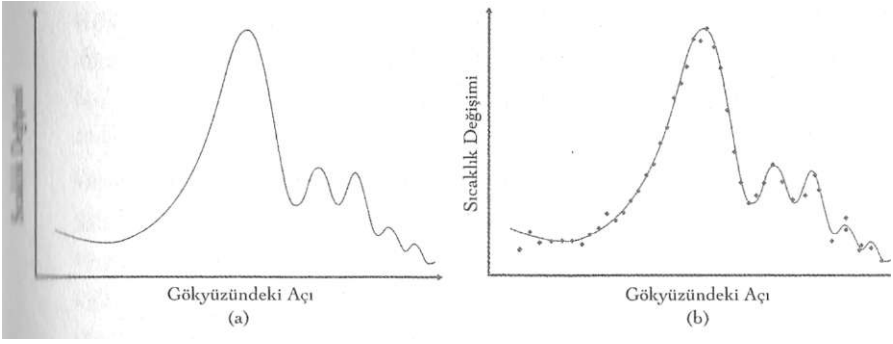
larını göstermiştir. Araştırmacılar, genellikle kuantum titrenimlerinin çok fazla kümeli bir evrene yol açmamalarını sağlamak için, verilen bir şişme modelindeki ayrıntıları (inflaton alanının potansiyel enerji kâsesinin tam şeklini) ayarlamak zorunda kalırlar. Böylece şişme kozmolojisi, en büyük ölçeklerde son derece türdeş gibi görünen bir evrende ortaya çıkmış olan yıldızlar ve galaksiler gibi kümeli yapılardan sorumlu olan küçük-ölçekli birörneklik bozukluklarını anlayabilmek için hazır bir mekanizma ortaya koymuştur.

Şişmeye göre, göksel mücevherler gibi gökyüzünde parlayan 100 milyardan fazla galaksi, kuantum mekaniğinin gökyüzüne yazdığı buyruktan başka bir şey değildir. Bana göre, bunun kavranması modern bilimsel çağın en harika olgularından biridir.

Kozmolojinin Altın Çağı

Mikrodalga fon ışıınının sıcaklığını ölçmek üzere yapılan tiz uydu gözlemleri, bu fikirleri destekleyen çok önemli kanıtlar sunar. Bu ışıınının sıcaklığının gökyüzünün her yerinde büyük ölçüde aynı olduğunu birkaç kere vurguladım. Ama farklı noktalardaki sıcaklığın, noktadan sonraki dördüncü basamaktan sonra *farklaştığından* henüz söz etmedim, ilk olarak 1992 yılında COBE (the Cosmic Background Explorer Satellite) ve daha yakın zamanlarda da WMAP (the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), uzaydaki bir noktada sıcaklığın 2,7249 Kelvin iken, başka bir noktada 2,7250 Kelvin, bir diğesinde ise 2,7251 Kelvin olduğunu buldu.

Harikulade olansa, bu son derece küçük sıcaklık değişimlerinin gökyüzünde galaksi oluşumlarının tohumunu attığı söylenen mekanizmayla açıklanabilecek olan bir desen sergiliyor olmasıdır: Şişmeyle gerilen kuantum titrenimleri. Temel fikir, minik kuantum titrenimleri uzaya yayıldığında bazı bölgelerin biraz daha sıcak, bazılarının ise biraz daha soğuk olmasına neden olduklarıdır (biraz daha yoğun bölgelerden gelen fotonlar, biraz daha güçlü olan kütleçekimi alanını yenebilmek için biraz daha fazla enerji harcarlar ve bu yüzden sıcaklıkları, daha az yo-



Şekil 11.1 (a) Şişme kozmolojisinin, gökyüzündeki bir noktadan diğerine mikrodalga fon ışınımının sıcaklık değişimleri tahmini (b) Bu tahminlerin uydu gözlemleriyle karşılaştırılması

ğün bölgelerden gelen fotonlara göre biraz daha düşük olur). Fizikçiler bu öneriyi temel alan hesaplamalar yapmış ve Şekil 11.1a'da görüldüğü gibi, mikrodalga ışınımının sıcaklığının gökyüzünde bir bölgeden diğerine nasıl değişmesi gerektiğini gösteren tahminlerde bulunmuşlardır. (Ayrıntılar önemli olmamakla birlikte, yatay eksen iki noktanın gökyüzündeki açısal uzaklığı ile, dikey eksense bunların sıcaklık farkı ile ilintilidir.) Şekil 11.1b'de bu tahminler, küçük dörtgenlerle gösterilen uydu gözlemleri ile karşılaştırılmıştır ve gördüğünüz gibi *mükemmel bir uyum* vardır.

Kuram ve gözlem arasındaki bu uyumun ayaklarınızı yerden kesmiş olduğunu umuyorum, çünkü eğer kesmediyse, sonucun tüm görkemini size aktaramamışım demektir. Bu yüzden, ne olur ne olmaz, burada ne olup bittiğini bir kere daha vurgulayayım: Uydulara yerleştirilen teleskoplar, son zamanlarda, neredeyse 14 milyaryıldır engellenmeden bize doğru gelen mikrodalga fotonlarının sıcaklıklarını ölçtüler. Uzayda farklı yönlerden gelen fotonların sıcaklığının birbirleri ile bir derecenin on hinde birinden daha büyük bir kesinlikle aynı olduğunu buldular. Üstelik gözlemler bu minik sıcaklık farklarının gökyüzünde, Şekil 11.1b'deki dörtgenlerin düzenli ilerlemelerinin gösterdiği özel bir desen oluşturduğunu gösterdi. Mucizelerin mucizesi, şişme yapısı kullanılarak bugün yapılan hesaplar, bu minik sı-

caklık değişimlerinin -neredeysse 14 milyar yıl önce ortaya çıkan farklılıklar- sergilediği desenleri *açıklayabiliyor* ve üstüne üstlük, bu açıklamanın anahtarı da kuantum belirsizliğinden kaynaklanan titrenimler. Vay canına.

Bu başarı birçok fizikçiyi şişme kuramının geçerliliği konusunda ikna etmiştir. Aynı derecede önemli olan bir başka şey de, ancak son yıllarda olası hale gelen hassas astronomi ölçümlerinin, kozmolojinin spekülasyon ve tahmine dayalı bir alan olmaktan, gözlemler üzerinde sağlam bir biçimde yükselen bir alan olmaya terfi etmesini sağlamasıdır. Bu durum, pek çok kimsenin içinde yaşadığımız dönemi kozmolojinin altın çağı olarak nitelemesine neden olmuştur.

Bir Evren Yaratmak

Bu ilerlemeler sonucunda fizikçiler şişme kozmolojisinin daha nereye kadar gidebileceğini görmek için harekete geçtiler. Örneğin bu kuram, Leibniz'in evrenin neden var olduğu yolundaki sorusuyla özetlenen nihai sırrı çözebilir mi? En azından şu andaki kavrayış düzeyimizle, bu çok fazla şey istemek olur. Eğer bir kozmoloji kuramı bu soru karşısında bir ilerleme sağlayabilse bile, neden özel olarak bu kuramın -onun varsayımlarının, bileşenlerinin, denklemlerinin- amaca uygun olduğunu sorabiliriz, böylece de köken sorusunu bir adım daha geriye atabiliriz. Eğer evrenin var olması ve benzersiz bileşenleri olan tek bir yasa takımıyla yönetiliyor olması için, bir şekilde gerekli olan şey yalnızca mantık olsaydı, belki o zaman inandırıcı bir öykümüz olurdu. Ama şimdiye kadar bu, boş bir umut olmanın ötesine geçmedi.

Bununla ilgili ama daha az tutkulu bir soru, çağlar boyunca farkı şekillerde sorulagelmiş olan bir soru da şudur: Evreni oluşturan bütün madde/enerji nereden geldi? Burada, her ne kadar şişme kozmolojisi tam cevabı vermiyor olsa da, bu soruyu, merak uyandırıcı, yeni bir ışık altında yeni bir şekle sokmuştur.

Nasıl olduğunu anlamak için, durmaksızın koşan ve zıplayan binlerce çocukla dolu olan dev boyutlu ama esnek bir kutu dü-

şünün. Kutunun duvarlarının geçirgen olmadığını, bu yüzden ısı ve enerjinin dışarı kaçamayacağını, ama duvarlar esnek olduğu için dışarı doğru hareket edebileceğini varsayın. Çocuklar durmaksızın kutunun duvarlarına çarptıklarından -her an yüzlercesi- kutu sürekli olarak genişler. Şimdi, kutunun duvarları geçirgen olmadığı için, çocukların enerjisinin tümüyle genişlemekte olan kutunun içinde kalacağını bekleyebilirsiniz. Sonuçta, çocukların enerjisi başka nereye gidebilir? Bu, mantıklı bir önerme olmakla birlikte tam olarak doğru değil. Enerjinin gidebileceği bir yer *var*. Çocuklar duvara her çarptıklarında enerji harcarlar ve bu enerjinin çoğu *duvarın hareketine* aktarılır. Kutunun genişlemesi çocukların enerjilerini soğurarak tüketir.

Her ne kadar uzayın duvarları yoksa da, evren genişledikçe benzer tür enerji aktarımları olur. Tıpkı hızla hareket eden çocukların, genişlerken duvarın içeri doğru uyguladığı kuvvette karşı iş yapmaları gibi, evrende hızla hareket eden parçacıklar da, uzayın genişlerken içeri doğru uyguladığı kuvvete karşı iş yaparlar: Kütleçekimine karşı iş yaparlar. Tıpkı kutu genişlerken sürekli olarak duvarların enerjisine aktarılmasından dolayı çocukların enerjisinin azalması gibi, evren genişlerken sürekli olarak *kütleçekimine aktarıldığı için* bildiğimiz parçacıklar tarafından taşınan madde ve ısı miktarı da azalır. Kısacası, kutunun duvarlarının içeri doğru uyguladığı kuvvetle kütleçekiminin içeri doğru uyguladığı kuvvet arasında bir benzerlik kurarak (bu, matematiksel olarak kurulabilecek bir benzerliktir), uzay şişerken kütleçekiminin de hızlı parçacıkların taşıdığı madde ve ışıınımdaki enerjiyi azalttığı sonucuna varırız. Kozmik genişlemeden ötürü hızlı hareket eden parçacıkların enerji kaybettiği, mikrodalga fon ışıınımları gözlemleriyle de doğrulanmıştır.*

* Evren genişlerken fotonların enerji kaybı doğrudan gözlemlenebilir çünkü dalgaboyları uzar -*kırmızıya kayar*- ve bir fotonun dalgaboyu ne kadar uzunsa, enerjisi de o kadar düşüktür. Mikrodalga fon fotonları böylesi bir kırmızıya kaymanın neredeyse 14 milyar yıldır etkisi altında ki bu da, bu fotonların uzun -mikrodalga- dalgaboylarını ve düşük sıcaklıklarını açıklıyor. Madde, benzer bir kinetik enerji (parçacıkların hareketlerinden gelen enerji) kaybının etkisi altındadır ama parçacıkların kütlelerinde bağlı olan toplam enerji (*durağan enerjileri*, parçacıklar hareketsizken kütlelerine eşdeğer olan enerji) sabit kalır.

Şimdi, uzay genişlerken inflaton alanının enerji değiş-tokuşu tarifimizi nasıl etkilediği konusunda bir fikir sahibi olmak için, benzetmemizi birazcık değiştirelim. Çocukların arasında bulunan birkaç şakacının, kutunun dışarı doğru hareket eden duvarlarına, karşılıklı olarak lastik bantlar tutturdıklarını varsayın. Lastik bantlar kutunun duvarlarına, çocukların uyguladığı dışarı doğru, pozitif basıncın tam tersi etki yapan, içeri doğru, negatif bir basınç uygularlar; kutunun genişlemesine enerji aktarmak yerine, bu lastik bantların negatif basıncı, genişlemeden enerji "çalar". Kutu genişledikçe lastik bantlar giderek gerginleşir ve bu da *bantlardaki* enerjinin arttığı anlamına gelir.

Bu değiştirilmiş senaryo kozmoloji ile ilişkilidir, çünkü öğrenmiş olduğumuz gibi, şakacıların lastik bantlarına benzer biçimde, birörnek bir inflaton alanı da genişleyen evrende negatif bir basınç uygular. Bu yüzden, tıpkı kutunun duvarlarından enerji aldıkları için, kutu genişledikçe lastik bantlardaki toplam enerjinin artması gibi, evren genişlerken inflaton alanında somutlaşan toplam enerji de artar çünkü *alan, kütleçekiminden enerji alır*.*

Özetleyecek olursak, *evren genişledikçe madde ve ışıınım enerji kaybeder, oysa inflaton alanı kütleçekiminden enerji kazanır*.

Bu gözlemlerin son derece önemli doğası; yıldızları, galaksileri ve evrendeki her şeyi oluşturan madde ve ışıının kökenini açıklamaya çalıştığımız zaman, açıkça ortaya çıkar. Standart Büyük Patlama kuramında madde ve ışıının taşıdığı kütle/enerji evren genişledikçe sürekli bir biçimde azalmıştır ve bu yüzden, evrenin ilk dönemlerindeki kütle/enerji, bugün gözlediğimizden çok daha fazladır. Böylece, standart Büyük Patlama,

* Yararlı olmakla birlikte lastik bant benzetmesi tam doğru değildir. Lastik bantların içeri doğru uyguladıkları negatif basınç kutunun genişlemesini engellerken inflaton alanının negatif basıncı uzayın genişlemesini destekler. Bu önemli fark, 278. sayfada vurgulanan açıklamayı örnekler: kozmolojide genişlemeyi yaratan şey, birörnek negatif basınç değildir (kuvveti oluşturan şey, basınç farkıdır, bu nedenle pozitif olsun, negatif olsun, birörnek basınç kuvvet oluşturmaz). Basınç, tıpkı kütle gibi kütleçekimi kuvveti yaratır. Negatif basınç, genişlemeye neden olan itici kütleçekimi yaratır. Bu, bizim vardığımız sonuçları etkilemez.

evrende şu anda bulunan madde/enerjinin kökenini açıklamaya yönelik bir öneride bulunmak yerine, bitmeyecek, zor bir savaşı sürdürür: Kuram ne kadar geriye bakarsa, o kadar çok kütle/enerjiyi bir şekilde açıklamak zorundadır.

Ama şişme kozmolojisinde çoğunlukla bunun tersi doğrudur. Şişme kuramının, madde ve ışıının, şişme evresinin sonunda, potansiyel enerji kâsesinin dibine kayan inflaton alanının hap-solmuş olan enerjisinin serbest kalmasıyla oluştuğunu öne sürdüğünü hatırlayın. Bu yüzden, şişme evresi sona ererken, kuramın günümüz evrenindeki madde ve ışıını ortaya çıkarmak için gerekli olan *hayret uyandırıcı* madde/enerji miktarında somutlaşan inflaton alanını açıklayıp açıklamadığı sorusu daha uygun bir sorudur.

Bu sorunun cevabı, kuramın neredeyse hiç zorlanmadan bunu yapabileceğidir. Biraz önce açıkladığımız gibi, inflaton alanı kütleçekiminin asalağıdır -ondan beslenir- ve bu yüzden, uzay genişledikçe inflaton alanının taşıdığı toplam enerji artar. Daha doğrusu matematiksel çözümleme, inflaton alanının enerji yoğunluğunun hızlı genişleme şeklinde ortaya çıkan şişme evresi süresince sabit kaldığını gösterir ki bu da, inflaton alanında somutlaşan toplam enerjinin, doldurduğu uzay hacmiyle orantılı olarak arttığı anlamına gelir. Bir önceki bölümde, şişme sırasında evrenin boyutunun en azından 10^{30} kat arttığını görmüştük ki bu, evrenin hacminin de $(10^{30})^3 = 10^{90}$ kat büyümesi demektir. Sonuç olarak, inflaton alanında somutlaşan enerji de aynı oranda artmıştır. Şişme evresi biterken, yani başlamasından yalnızca 10^{-35} saniye sonra, inflaton alanının taşıdığı enerji en azından 10^{90} kat artmıştır. *Bunun anlamı, devasa genişleme taşıdığı enerjiyi çok büyük oranda artırdığı için, şişmenin başlangıcında inflaton alanının çok fazla enerjiye ihtiyacının olmadığıdır.* Basit bir hesap, birörnek inflaton alanıyla dolu olan -ve yaklaşık on kilogram gelen- 10^{-26} santimetre çapındaki minik bir külçenin, sonradan gelen şişme genişlemesi sırasında evrende şimdi gördüğümüz bütün enerjiyi açıklayabilecek kadar enerji kazanacağını gösterir.²

Böylece, evrenin ilk dönemlerindeki toplam madde/enerjisinin devasa boyutlarda olduğunu savunan standart Büyük Patlama kuramıyla katı bir çelişki içinde olan şişme kozmolojisi, evrendeki bütün bilindik madde ve ışıınımı, kütleçekimini "işleyerek", inflaton alanıyla dolu olan 10 kilogramlık bir külçeden üretebilir. Bu, hiçbir şekilde Leibniz'in sorduğu neden hiçbir şey yerine her şey var sorusuna cevap vermez, çünkü henüz neden inflaton olduğunu, hatta neden onun kapladığı bir uzay oluşunu açıklayamadık. Ama açıklama gerektiren şey her neyse, köpeğim Rocky'den daha hafiftir ve bu da standart Büyük Patlama'da düşünülenden çok daha farklı bir başlangıç noktasıdır.*

Şişme, Pürüzsüzlük ve Zamanın Oku

Belki duyduğum coşku önyargımı gizliyor olabilir ama günümüzde bilimin elde ettiği bütün gelişmeler ve kozmolojideki bütün ilerlemeler içimi hayranlıkla karışık bir korku ve alçakgönüllülükle dolduruyor.Yıllar önce, genel göreliliğin temellerini okuyup uzay-zamandaki küçük köşemizde Einstein'ın kuramını uygulayarak bütün evrenin evrimini öğrenebileceğimizi fark ettiğim zaman hissetmiş olduğum aceleciliği hiç kaybetmedim. Şimdi, yirmi beş-otuz yıl sonra, teknolojideki ilerlemeler evrenin ilk anlarında nasıl davrandığıyla ilgili ve bir zamanlar soyut olan önerileri gözlemsel olarak sınıyor ve bu kuramlar *gerçekten işliyorlar*.

Ama kozmolojinin uzay ve zamanın öyküsüyle olan ilişkisinin yanı sıra, 6. ve 7. Bölümlerde evrenin ilk dönemlerinin tarihini incelerken belirgin bir amaca yönelmiş olduğumuzu unutmayın: Zamanın okunun kökenini bulmak. O bölümlerden hatırlayacağınız gibi, zamanın okunu açıklamak için bulabildiğimiz en

*Aralarında Alan Guth ve Eddie Farhi'nin de bulunduğu bazı araştırmacılar, birisinin varsayımsal olarak laboratuvarında bir inflaton alanı külçesi sentezleyerek, yeni bir evren yaratıp yaratamayacağını araştırdılar. İnflaton alanı gibi bir şeyin dencysel doğrulamasına hâlâ sahip olmadığımız gerçeğinin ötesinde, dikkat ederseniz, on kilogramlık inflaton alanı, çok küçük bir alana, kenarı 10^{-26} santimetre uzunluğundaki bir bölgeye sıkışmak zorunda olduğu için, yoğunluğu -atom çekirdeğinin yoğunluğunun 1067 katı- elde edebileceğimizin çok çok ötesindedir.

İnandırıcı yapı, evrenin ilk dönemlerinde son derece düzenli olması, yani, sahneyi gelecekteki entropi artışına hazırlamak üzere, evrendeki entropinin çok düşük olmasıydı. Nasıl *Savaş ve Barış*ın yapraklarının verilen bir anda düzenli olmadıkları sürece, gittikçe daha karışık olma gibi bir kapasiteleri yoksa, evren de ilk dönemlerinde son derece düzenli olmadıkça, giderek daha düzensiz olma -süt dökülür, yumurtalar kırılır, insanlar yaşlanır- kapasitesine sahip değildir. Karşı karşıya olduğumuz bilmece, bu son derece düzenli, düşük entropili başlangıç noktasının nasıl ortaya çıktığıdır.

Şişme kozmolojisi bu konuda çok büyük ilerleme kaydetti ama ilgili ayrıntıların aklınızda kalmamış olma olasılığına karşı önce size bilmeceyi tam olarak hatırlatayım.

Evrenin tarihinin ilk dönemlerinde, maddenin uzaya birörnek yayıldığı konusunda güçlü kanıtlar vardır ve bu konuda neredeyse hiç kuşku yoktur. Bu, genellikle yüksek entropili bir durum olarak nitelendirilir -kapağı açıldığında kola şişesinin içinden çıkıp bütün odaya birörnek yayılan karbondioksit molekülleri gibi- ve bu yüzden çok yaygın olup, bir açıklama gerektirmez. Ama bütün evreni göz önüne aldığımız zaman, yani işin içine kütleçekimi girdiğinde, birörnek madde dağılımı ender görülen, düşük entropili ve yüksek ölçüde düzenli bir durumdur, çünkü kütleçekimi maddeyi kümeleşmeye zorlar. Benzer biçimde, pürüzsüz ve birörnek bir uzaysal eğriliğin entropisi de çok düşüktür; inişli-çıkışlı, birörnek olmayan bir uzaysal eğrilikle kıyaslandığında, yüksek ölçüde düzenlidir. (Nasıl *Savaş ve Barış* ın yapraklarının düzensiz olmasının pek çok şekli, düzenli olmasınını yalnız tek bir şekli varsa, uzayın da düzensiz, birörnek olmayan bir şekle sahip olmasının *birçok yolu* varken, tam olarak düzenli, pürüzsüz ve birörnek olmasının çok az yolu vardır.) Bilmece şudur: Neden evrenin ilk dönemlerinde madde dağınık kara delikler gibi yüksek entropili (yüksek ölçüde düzensiz) kümeli bir dağılım yerine, düşük entropili (yüksek ölçüde düzenli) birörnek bir dağılım sergiliyordu? Uzayın eğriliği için kara deliklerin yol açtığına benzer büyük çarpılmalar ve cid-

di eğrilmeler göstermek yerine büyük ölçüde pürüzsüz, düzenli ve birörnekti?

İlk olarak Paul Davies ve Don Page³ tarafından ayrıntılı olarak incelendiği gibi, şişme kozmolojisi bu konularda önemli görüşlere sahiptir. Bunun nasıl olduğunu görmek için, bilmecenin temel varsayımının şunlar olduğunu aklınızda tutun: Herhangi bir yerde bir kümelenme ortaya çıktığında, oradaki daha yüksek kütleçekimi alanı daha fazla madde çeker ve kümelenmeyi büyütür. Benzer şekilde uzayda herhangi bir yerde bir kırışıklık ortaya çıktığında, orada daha büyük olan kütleçekimi, kırışıklığı daha da artırır ve düzensiz, son derece birörnek olmayan bir uzaysal eğrilik ortaya çıkarır. İşin içine kütleçekimi girdiği zaman, sıradan, önemsiz, yüksek entropili durumlar kümeli ve yumruludur.

Ama şuna dikkat edin: Bu düşünüş mantığı tümüyle bildiğimiz kütleçekiminin çekici doğasına dayanır. Küme ve yumrular büyür çünkü bunlar çevredeki maddeyi çekerek kendilerine katarlar. Ama kısa şişme evresi süresince, kütleçekimi *iticiydi* ve bu her şeyi değiştirdi. Uzayın şeklini ele alalım. İtici kütleçekiminin dışarı doğru devasa itmesi uzayı o kadar hızla şişirdi ki, tıpkı buruşuk bir balonun şişirildiği zaman yüzeyindeki kırışıklıkların gerilerek kaybolması gibi, başlangıçtaki yumru ve çarpıklıklar pürüzsüzce gerildi.* Dahası, uzayın hacmi, bu kısa şişme döneminde devasa bir faktörle büyüdüğü için, tıpkı akvaryumunuzun hacmini olimpiк yüzme havuzu kadar büyütmeniz sonucunda balık yoğunluğunun azalması gibi, madde kümelerinin yoğunluğu da azaldı. Bu nedenle, her ne kadar çekici kütleçekimi maddenin kümelenmesine ve uzaydaki kırışıklıkların büyümesine yol açmaktaysa da, itici kütleçekimi bunun tersini yapar: Kümeleri ve kırışıklıkları küçülterek daha pürüzsüz, daha birörnek bir sonucun ortaya çıkmasını sağlar.

*Burada akımız karışmasın: Son bölümde incelenen, kuantum titrenimlerinin şişme sonucunda gerilmesi, yaklaşık 100.000'de bir ölçeğinde minik, kaçınılmaz birörneklik bozuklukları ortaya çıkardı. Ama bu minik birörneklik bozuklukları pürüzsüz evrene yayıldılar. Biz şimdi bu ikincinin -alttaki, pürüzsüz birörneklik- nasıl olduğunu anlamaya çalışıyoruz.

Böylece, şişme patlamasının sonunda, evrenin boyutu devasa bir şekilde büyümüş, uzayın eğrilğinde var olan birörneklik bozuklukları gerilerek giderilmiş ve başlangıçtaki kümelerin tamamı dağılmıştı. Üstelik inflaton alanı potansiyel enerji kâsesinin dibine kayarken şişme dönemini kapatmış, hapsolmuş enerjisi ise uzayı birörnek dolduran, bildiğimiz parçacıklardan oluşan bir denize dönüşmüştü (kuantum titreniminden kaynaklanan minik ama kritik derecede önemli türdeşlik bozukluklarına kadar birörnek). Toplamda bu, kulağa büyük bir ilerlemeymiş gibi geliyor. Şişme yoluyla ulaştığımız sonuç *-neredeyse madde- nin birörnek dağılımının gözleendiği pürüzsüz, birörnek uzaysal genişleme-* tam olarak açıklamaya çalıştığımız şeydi. Tam olarak zamanın okunu açıklayabilmemiz için gerekli olan düşük-entropili durumdu.

Entropi ve Şişme

Gerçekten, bu anlamlı bir süreçtir. Ama geriye iki önemli konu kalıyor.

Birincisi, şişme patlamasının her şeyi pürüzsüzleştirerek toplam entropiyi azaltması gibi termodinamiğin ikinci yasasını ihlal ettiği izlenimi veren bir fiziksel süreci -yalnızca istatistiksel bir çalkantı değil- andıran bir sonuca ulaşmışız gibi görünüyor. Durum böyle olsaydı, ya ikinci yasayı kavrayışımız, ya da şimdiki mantığımız hatalı olurdu. Gerçekte ise, bu iki seçenekten biriyle karşı karşıya kalmak durumunda değiliz çünkü şişmenin sonucu olarak entropi azalmaz. Şişme patlaması sırasında aslında entropi artar ama *artabilecek olduğu miktardan çok daha az artar*. Gördüğünüz gibi, şişme döneminin sonunda uzay pürüzsüzce gerilmişti ve bu yüzden entropiye -uzayın olası kümeli, düzensiz, birörnek olmayan yapısı ile ilgili olan entropi- olan kütleçekimsel katkısı çok azdı. Bununla birlikte, inflaton alanı enerji kâsesinin dibine kayarak hapsolmuş olan enerjisi serbest kalınca, tahminen 10^{80} parçacık ve ısıtım üretmiştir. Böylesi devasa sayıdaki parçacık, tıpkı devasa sayıda sayfaya sahip bir kitap gibi, devasa miktarda entropi barındırır. Bu yüzden, kütleçekim-

sel entropi azalmış olsa bile, bütün bu parçacıkların üretilmesinden kaynaklanan entropi artışı, karşılanacak gibi değildir. İkinci yasadan beklediğimiz gibi, toplam entropi artmıştır.

Ama, ki bu önemli bir noktadır, şişme patlaması uzayı pürüzsüzleştirerek ve türdeş, birörnek, düşük entropili bir kütleçekimi alanı sağlayarak, kütleçekiminin yaptığı katkıyla yapabileceği arasında çok büyük bir *boşluk* yarattı. Şişme sırasında toplam entropi arttı ama artmış *olabileceği* miktarla kıyaslandığında önemsiz denebilecek bir miktarda arttı. İşte bu anlamda şişme düşük entropili bir evren ortaya çıkarmıştır: Şişme sonunda entropi artmıştı ama bu artış hiçbir yerde uzaysal genişlemenin arttığı oranda olmamıştı. Eğer entropi arazi vergisine benzetilecek olursa, bu New York kentiyle Büyük Sahra'nın karşılaştırılmasına benzer. Büyük sahrada toplanacak vergi daha çok olmakla birlikte, toplam alanın büyümesiyle kıyaslandığında çok az artmış olur.

Şişmenin bitmesinden bu yana, kütleçekimi entropi farkını kapamaya çalışıyor. Kütleçekiminin sonradan birörneklikten çıkardığı (kuantum titrenimi kökenli birörneklik bozukluğundan gelen) her küme -ister galaksi olsun, ister galakside bir yıldız veya bir gezegen ya da bir kara delik- entropiyi artırmıştır ve kütleçekimini entropi amacına bir adım daha yaklaştırmıştır. O zaman, bu anlamda şişme, göreceli olarak düşük entropili, büyük bir evrenle sonuçlanmış olan bir mekanizmadır ve bu yolla sahneyi, sonuçlarına şimdi tanık olduğumuz, milyarlarca yıllık kütleçekimsel kümelenme için hazırlamıştır. Böylece şişme kozmolojisi zamanın okuna, son derece düşük kütleçekimsel entropili bir geçmiş yaratarak bir yön vermiştir; gelecek, entropinin arttığı yöndür.⁴

İkinci konu Bölüm 6'da zamanın okunun bizi yönlendirmiş olduğu yolda yürümeye devam ettiğimizde görünür hale gelir. Bir yumurtadan onu yumurtlayan tavuğa, oradan tavuğun yemine, bitkiler alemine, Güneş'in ısı ve ışığına, Büyük Patlama'nın birörnek dağılmış ilkel gazlarına kadar, evrenin evrimini, git gide daha düzenli hale gelen geçmişe doğru izlemiş, her adımda

düşük entropi bilmecesini zamanda bir adım geriye ötelemiş-tik. Şişme genişlemesinin daha da erken bir döneminin, Büyük Patlama'nın pürüzsüz ve birörnek sonucunu doğal bir biçimde açıklayabileceğini ancak şimdi fark ettik. Amaya şişmenin kendisi? İzlediğimiz bu zincirin ilk halkasını açıklayabilir miyiz? Koşulların bir şişme patlamasının ortaya çıkması için neden uygun olduğunu açıklayabilir miyiz?

Bu konu çok önemlidir. Şişme kozmolojisi kuramsal olarak kaç tane bilmece çözmüş olursa olsun, bir şişme genişlemesi dönemi hiçbir zaman olmadıysa, bu yaklaşım ilgisiz olacaktır. Üstelik evrenin ilk dönemlerine geri dönüp şişmenin gerçekten olup olmadığını doğrudan belirleyemeyeceğimiz için, zamanın okunun yönünü seçerken gerçek bir ilerleme kaydedip etmediğimiz değeriendirilmesi, şişme patlaması için gerekli olan koşulların ortaya çıkmış olma *olasılığını* belirlememizi gerektirir. Yani standart Büyük Patlama'nın, gözlemsel olarak motive edici olmakla birlikte kuramsal olarak açıklanamayan, çok iyi ayarlanmış birörnek başlangıç koşullarına bağlı olması fizikçilerin tüylerini diken diken eder. Evrenin ilk dönemlerinin düşük-entropili bir durumda olduğunun basitçe varsayılması son derece rahatsız edicidir; zamanın okunun evrene bir açıklama olmadan, zorla uygulanması bir boşluk hissi doğurur. İlk bakışta şişme, Büyük Patlama'da standart olduğu varsayılan özelliklerin şişme evriminden kaynaklandığını göstererek bir ilerleme önerir. Ama eğer şişmenin başlatılması, çok özel, son derece düşük-entropili başka koşulların varlığını da gerektiriyorsa, o zaman başladığımız noktaya döneriz. Büyük Patlama'nın özel koşullarını, şişmeyi başlatmak için gerekli olan koşullarla değiş-tokuş etmiş oluruz ve zamanın oku bilmecesi, gizemini korumayı sürdürür.

Şişme için gerekli olan koşullar nelerdir? Şişmenin, inflaton alanının değerinin, bir an için potansiyel enerji kâsesinin ortasındaki yüksek-enerji düzlüğünde, minik bir bölgenin içinde tatkılmasının kaçınılmaz sonucu olduğunu görmüştük. Bu nedenle görevimiz, şişme için bu başlangıç durumunun gerçekten ne ka-

dar olası olduğunu belirlemektir. Eğer şişmeyi başlatmanın kolay olduğu ortaya çıkarsa, çok iyi bir durumda olacağız. Ama gerekli koşulların ortaya çıkma olasılığı son derece düşükse, zamanın oku sorusunu -topun yuvarlanmasını başlatan düşük-entropili inflaton alanı durumuna bir açıklama bulma görevini- zamanda bir adım geriye atmış olacağız.

Önce bu konu üzerindeki çağdaş düşünüş şeklini çok iyimser bir ışık altında betimleyecek, sonra da öykünün bulanık kalan temel öğelerine geri döneceğim.

Boltzmann'ın Dönüşü

Geçen bölümde söz edildiği gibi, şişme patlamasını, evrenin kendi yaratılışı olarak düşünmek yerine daha önceden var olan bir evrende yer alan bir olay olarak düşünmek daha doğrudur. Her ne kadar bu şişme-öncesi dönemde evrenin neye benzediği konusunda eleştirilemez bir kavrayışımız olmasa da, eğer her şeyin son derece sıradan, yüksek entropili bir durumda olduğunu varsayarsak, nereye kadar gidebileceğimizi bir görelim. Özel olarak, ilkel, şişme öncesi uzayın büzülme ve kabarıklıklarla delik-deşik olduğunu ve inflaton alanının son derece düzensiz, değerininse sıcak metal kâsenin içindeki kurbağa gibi ileri-geri sıçramakta olduğunu varsayalım.

Şimdi, tıpkı kollu bir kumar makinesinde yeterince sabır göstererek uzun süre oynadığımızda rastgele dönen göstergelerin er geç üç pencerede de mücevher resminde durmasını bekleyeceğimiz gibi, ilkel evrenin bu son derece yüksek enerjili, çalkantılı arenasında er geç ortaya çıkacak olan rastgele bir dalgalanmanın, uzayın minik bir külçesinde inflaton alanının değerinin doğru, birörnek değerine sıçramasına neden olarak şişme genişlemesinin dışarı doğru patlamasını başlatmasını bekleriz. Önceki alt bölümde açıklandığı gibi, hesaplar, şimdi gördüğümüz evrenden daha büyük boyutlara kadar gerilen kozmolojik bir genişlemeyi (şişme genişlemesini izleyen standart Büyük Patlama genişlemesi) ortaya çıkarmak için uzay külçesinin son derece minik -yaklaşık 10^{26} santimetre boyutlarında- olmasının yeterli ol-

duğunu gösteriyor. Bu yüzden, evrenin ilk dönemlerindeki koşulların, şişme genişlemesinin ortaya çıkması için uygun olduğunu varsaymak veya basit bir biçimde bildirmek yerine, bu düşünme şekline göre, sıradan, önemsiz bir düzensizlik ortamında oluşan ve yalnızca 10 kilogram gelen ultra mikroskopik bir dalgalanma, gerekli koşulları ortaya çıkarır.

Dahası, tıpkı kollu bir kumar makinesinin, kazandırmayan pek çok sonuç da ürettiği gibi, ilkel uzayın başka bölümlerinde başka tür inflaton alanı dalgalanmaları da ortaya çıkmış olabilir. Bunların çoğunda, ya dalgalanmalar doğru değere sahip değillerdi ya da şişme genişlemesinin ortaya çıkamayacağı kadar birörnektiler. (Yalnızca 10^{26} santimetre boyutlarındaki bir bölgede bile bir alan, çok farklı değerler alabilir.) Ama bizi ilgilendiren şey, düşük-entropi zincirinin ilk halkasını sağlayan ve sonuç olarak bildiğimiz evrenle sonuçlanan, uzay-pürüzsüzleştirici bir şişme patlamasına yol açmış olan bir külçenin bulunmasıydı. Yalnızca tek ve büyük evrenimizi gördüğümüz için, kozmik kumar makinesine yalnızca bir kere ödeme yapmak zorundayız.⁵

Evreni ilkel karmaşadaki istatistiksel dalgalanmaya kadar izlediğimiz için, zamanın okuna getirdiğimiz bu açıklama Boltzmann'ın özgün önerisiyle bazı ortak özelliklere sahiptir. Bölüm 6'dan Boltzmann'ın, şimdi gördüğümüz her şeyin, tam düzensizlikten ender ama ara sıra beklenebilecek bir dalgalanma sonucunda ortaya çıktığını ileri sürdüğünü hatırlayın. Ama Boltzmann'ın özgün formülleştirmesindeki sorun, rastgele bir dalganın nasıl olup da bu kadar ileri giderek, bildiğimiz kadarıyla hayatı ortaya çıkarmak için gerekli olandan bile çok daha fazla düzenli bir evren ortaya çıkardığını açıklayamamasıydı. Neden evren kestirmeden giderek birkaç tane, hatta tek bir galaksiye sahip olabilecekken, milyarlarca ve milyarlarca galaksiye, bu galaksilerin her birinde de milyarlarca ve milyarlarca yıldızla sahip olacak kadar büyüktür?

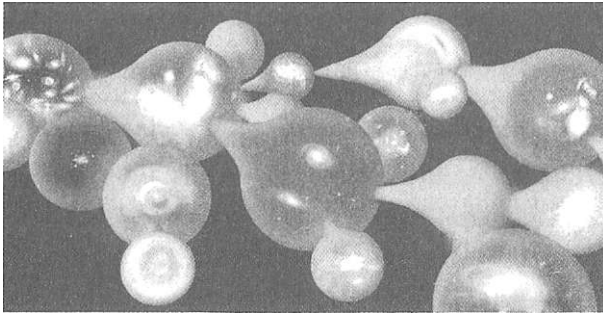
İstatistiksel bakış açısından, şimdi görmekte olduğumuz kadar değil de, biraz daha az bir düzen ortaya çıkaracak, daha mütevazı bir dalgalanmanın olasılığı çok daha yüksekti. Üstelik or-

talama olarak entropi yükselmekte olduğundan, Boltzmann'ın mantığı, *bugün* görmekte olduğumuz her şeyin, daha düşük entropiye istatistiksel bir sıçramanın sonucu olduğunu söyler. Bunun nedenini hatırlayın: Dalgalanma ne kadar eskiden olmuşsa, ulaşmış olması gereken entropi o kadar düşük olur (entropi, Şekil 6.4'te görüldüğü gibi, en düşük entropili noktadan sonrayükselmeye başlar, bu yüzden eğer dalgalanma dün olduysa, entropi dün en düşük noktasındadır, eğer dalgalanma bir milyar yıl önce olduysa, o dönemin en düşük entropi değerinde demektir). Bu nedenle, zamanda ne kadar geriye gidilirse, gereken dalgalanma o kadar şiddetli ve olasılığı da o kadar düşük olur. Böylece, sıçramanın yakında olmuş olmasının olasılığı çok yüksektir. Ama eğer bu sonucu kabul edersek, belleklere, kayıtlara ve tartışmanın kendisinin altında yatan fizik yasalarına güvenemeyiz ve bu, tam olarak hoş görülemez bir konum olur.

Boltzmann'ın fikrinin şişmedeki somut örneğinin büyük avantajı, ilk dönemlerdeki *küçük* bir dalgalanmanın -uzaydaki *minik* bir külçenin içinde, uygun koşullara doğru *mütevazı* bir sıçramanın- kaçınılmaz olarak, şu an gördüğümüz devasa boyutlardaki ve düzenli evrene yol açmasıdır. Şişme genişlemesi bir kere başladığında, küçük külçe *amansızca* en azman şimdi görmekte olduğumuz evren ölçeklerine kadar gerildi, işte bu yüzden ortada evrenin neden kestirmeden gitmediğine ilişkin bir sır yoktur; evrenin neden bu kadar büyük ve böylesine çok sayıda galaksi ile dolu olduğu bir sır değildir. Başlangıçtan bu yana, şişme evrene çok şey vermiştir. Uzaydaki minik bir külçenin içinde daha düşük entropiye doğru olan bir sıçrama, şişme genişlemesinin yarattığı kaldırma etkisiyle evrenin devasa uzaklıklarına dönüşmüştür. En önemlisi, şişme sonucu gerilme herhangi, eski bir evrene yol açmadı. *Bizim* büyük evrenimize yol açtı; şişme uzayın şeklini açıklar, büyük-ölçekli birörnekliliği açıklar, hatta galaksilerin varlığı ve fon ışınının sıcaklığındaki değişiklikler gibi "daha küçük-ölçekli" türdeşlik bozukluklarını da açıklar. Şişme, büyük bir açıklama ve tahmin gücünü, düşük entropiye doğru olan bir sıçramanın içinde ambalajlar.

Ve böylece belki de Boltzmann'ın haklı olabileceği ortaya çıkar. Görmekte olduğumuz her şey, son derece düzensiz olan ilkel karmaşadan rastlantısal bir dalgalanmayla ortaya çıkmış olabilir. Onun görüşlerinin bu kavrayışıyla kayıtlarımıza ve belleklerimizimize güvenebiliriz: Dalgalanma hemen biraz önce olmadı. Geçmiş, gerçekten vardı. Kayıtlarımız, gerçekleşmiş olan şeylerin kayıtlarıdır. Şişme genişlemesi evrenin ilk dönemlerinde var olan düzenli ve minik bir külçeyi büyüttü -evreni en düşük entropiyle dev bir büyüklüğe kadar "kurdu"- bu yüzden, sonraki 14 milyar yıl boyunca süren çözülme, galaksiler, yıldızlar ve gezegenler biçimindeki kümelenme artık bir bilmece olmaktan çıktı.

Aslında bu yaklaşım bize biraz daha fazla bir şeyler bile söyler. Tıpkı Bellagio'nun zemin katındaki birkaç kumar makinesinde birden, bir numara ile büyük ikramiyeyi kazanma olasılığının olması gibi, yüksek entropili ve tam bir karmaşa olan ilkel durumda, şişme genişlemesi için gerekli olan koşulların yalnızca tek bir uzaysal külçede bulunması için hiçbir neden yoktu. Andrei Linde, şuraya buraya saçılmış durumda bulunan birçok külçede birden uzay-pürüzsüzleştirici şişme-genişlemenin gerçekleşmiş olabileceğini ileri sürdü. Eğer durum böyle ise, evrenimiz, rasgele dalgalanmalar, koşulları Şekil 11.2'de gösterildiği gibi, şişme patlaması için uygun hale getirdiğinde tomurcuklanan -ve belki de tomurcuklanmayı sürdüren- pek çok evrenden yalnız-



Şekil 11.2 Şişme, eski evrenlerden yenilerini tomurcuklandırmak şeklinde tekrar tekrar ortaya çıkabilir.

ca biridir. Bu diğer evrenlerin sonsuza kadar bizim evrenimizden ayrı olma olasılığı yüksek olduğu için, bu "çoklu evren" resminin doğru olup olmadığını nasıl anlayabileceğimizi göz önüne getirmek zordur. Bununla birlikte, kavramsal bir yapı olarak hem zengin, hem de umut vericidir. Diğer şeylerin yanı sıra, kozmoloji hakkında nasıl düşüneceğimiz konusunda olası bir değişiklik önerir: Bölüm 10'da şişmeyi, standart Büyük Patlama kuramının, patlamanın hızlı bir genişleme ile tanımlandığı "ön ke-narı" olarak betimlemiştim. Ama eğer Şekil 11.2'deki her yeni evrenin şişme tomurcuklanmasını, kendi patlaması olarak düşünürsek, o zaman şişmenin kendisini gözde canlandırmanın en iyi yolu, bunları içlerinde Büyük Patlama benzeri evrimlerin olduğu, üst üste kapanan soğan kabuğu gibi kozmolojik yapılar olarak düşünmektir. Böylece, bu yaklaşımda şişmenin standart Büyük Patlamaya katılması değil, standart Büyük Patlama'nın şişmeye katılması söz konusudur.

Şişme ve Yumurtalar

O zaman neden bir yumurtanın kırıldığını görüyoruz da ya-pıştığını görmüyoruz? Hepimizin sonuçlarını gördüğü zamanın oku nereden geliyor? Bu yaklaşımın bizi getirdiği yer şu: Başlangıçtaki yüksek entropili durumdan, ender fakat zaman zaman beklenebilecek bir dalgalanma sonucunda, yaklaşık on kilogramlık minik bir uzay külçesi hızlı bir şişme genişlemesi için gerekli olan koşullara kavuştu. Dışarı doğru olan bu inanılmaz şişme, uzayın devasa boyutlarda gerilmesi ve pürüzsüzleşmesiyle sonuçlandı ve şişme biterken, inflaton alanı çok yükselmiş olan enerjisini serbest bırakarak uzayı hemen hemen birörnek madde ve ışınlımla doldurdu. İnflatonun itici kütleçekimi azalırken bildiğimiz, çekici kütleçekimi baskın hale geldi. Görmüş olduğumuz gibi, çekici kütleçekimi kuantum titrenimi sonucunda oluşan türdeşlik bozukluklarını kullanarak maddenin kümeleşmesine neden oldu, galaksileri, yıldızları ve sonunda Güneş'i, Dünyayı, güneş sisteminin kalanını ve gözlenebilir evrenin diğer özelliklerini ortaya çıkardı. (İncelediğimiz gibi, Büyük Patlama'dan 7

milyar yıl ya da biraz daha sonra, itici kütleçekimi bir kere daha baskın hale geldi ama bu kez en büyük kozmik ölçeklerle ilişkiliydi, bildiğimiz kütleçekiminin hâlâ egemen olduğu galaksi ve güneş sistemi gibi görelî olarak daha küçük sistemler üzerinde doğrudan hiç etkisi olmadı.) Dünya'daki düşük-entropili bitkiler ve hayvanlar Güneş'in görelî olarak düşük-entropili enerjisini kullanarak başka düşük-entropili hayat biçimleri ortaya çıkararak toplam entropiyi ısı ve atık üretimi yoluyla artırdılar. Sonunda bu zincir, yumurtayı yumurtlayan tavuğu ortaya çıkardı, öykünün gerisini zaten biliyorsunuz: Mutfak tezgâhının üzerinde yuvarlanarak evrenin daha yüksek entropiye doğru amansızca gidişinin bir parçası olarak yere düşüp kırıldı. Bütün sayfaları yerli yerinde, sıralı olan *Savaş ve Barış'a* benzeyen, şişmeye bağlı gerilme sonucu ortaya çıkan, uzayın düşük-entropili, yüksek ölçüde düzenli ve birörnek şekilde pürüzsüz olan dokusudur. İşte evreni sonraki, daha yüksek entropiye doğru evrime hazırlayan ve böylece hepimizin bildiği zamanın okunu ortaya koyan, bu ilk düzenli -ciddi yumruların, büzülmelerin ve dev kara deliklerin olmadığı- durumdur. Şu andaki kavrayışımızla zamanın okuna getirilmiş olan en tam açıklama budur.

Eksik Kalan Nokta?

Ben, bu şişme kozmolojisi ve zamanın oku öyküsünü çok güzel buluyorum. Vahşi ve enerjik ilkel karmaşa ortamında, ağırlığı uçak yolculuğunda izin verilen bagaj ağırlığından daha az olan birörnek inflaton alanının mikroskopik-ötesi bir salınımı ortaya çıktı. Bu, zamanın okunun yönünü belirleyen bir şişme genişlemesi başlattı. Gerisi tarihtir.

Ama bu öyküyü anlatırken, henüz doğrulanmamış olan çok önemli bir varsayım yaptık. Şişmenin başlamış olma olasılığını değerlendirirken, içinden şişme genişlemesinin çıktığını öne sürdüğümüz şişme-öncesi ortamın niteliklerini belirlemiş olmak zorundaydık. Zihnimizde canlandırdığımız özel ortam -vahşi, karmaşık, enerjik- kulağa mantıklı geliyor ama bu tanımını matematiksel bir kesinlikle tarif etmek zordur. Dahası, bu yalnızca bir

tahmin olur. Varlığı ileri sürülen şişme öncesi ortamdaki, yani Şekil 10.3'te görülen bulanık bölgedeki koşulların nasıl olduğunu bilmiyoruz. Bu bilgi olmaksızın şişmenin başlamış olma olasılığını inandırıcı bir şekilde değerlendiremeyiz; oysa herhangi bir olasılığın hesaplanması yaptığımız varsayımlara son derece hassas bir şekilde bağlıdır.⁶

Kavrayışımızdaki bu eksiklikle yapılabilecek en anlamlı özet şudur: Şişme, görünürde birbirleriyle bağlantısız problemleri -ufuk problemi, düzlük problemi, yapının kökeni problemi, evrenin ilk dönemlerindeki düşük-enerji problemi- bir araya getiren güçlü, açıklayıcı bir yapı ortaya koyar ve bunların hepsine ortak bir çözüm önerir. Bu, doğru olduğu duygusu uyandırıyor. Ama diğer adıma geçmek için, bulanık bölgenin karakteristiği olan uç koşullarla -çok yüksek sıcaklık ve yoğunluk- başa çıkabilecek bir kurama ihtiyacımız vardır. Ancak bu şekilde evrenin ilk dönemlerine ilişkin kesin ve kuşkusuz bir görüşe sahip olma şansımız olur.

Önümüzdeki bölümde öğreneceğimiz gibi, bu belki de son seksen yıldır kuramsal fiziğin karşılaştığı en büyük engeli, genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki temel çatışmayı gidebilecek bir kuramı gerektirir. Birçok araştırmacı, *süpersicim kuramı* adı verilen yeni yaklaşımın bunu başarmış olabileceğine inanıyor, ama eğer süpersicim kuramı doğru ise, evrenin dokusu kimsenin tahmin edemeyeceği kadar tuhaftır.

4 Kökenler ve Birleşme

XII. Bölüm

Bir Sicimin Üzerindeki Dünya

Sicim Kuramına Göre Doku

Anlamanız gereken her şeyi anladığınız bir dünyada yaşamakta olduğunuzu varsayın. Bir gezegenin neden bir yıldızın etrafında dolandığı, bir beyzbol topunun neden belirli bir yörüngede hareket ettiği, bir mıknaatıs ya da pilin nasıl çalıştığı, ışık ve kütleçekiminin nasıl işlediği konularında bir şey söylemek için -herhangi bir şey üzerinde herhangi bir şey söylemek için- en temel yasaları ortaya çıkarmanız ve bunların maddenin en küçük bileşenleri üzerinde nasıl etki yaptığını belirlemeniz gereken bir evren. Neyse ki bu evren bizim evrenimiz değil.

Eğer bizim evrenimiz böyle olsaydı, bilim herhangi bir ilerleme kaydedemezdi. Yüzyıllar boyunca ilerleme sağlayabilmiş olmamızın nedeni, küçük parçalar üzerinde çalışabiliyor olmamızdır; sırları, her yeni keşfin bir öncekinden daha derine indiği, adım adım çözme yeteneğimizdir. Newton'un hareket ve küt-

leçekimi konularında dev adımlar atmak için atomlar hakkında bir şey bilmesi gerekmemiştir. Maxwell'in güçlü bir elektromanyetizma kuramı geliştirebilmek için elektronlar ve diğer elektrik yüklü parçacıklar konusunda bilgi sahibi olmaya ihtiyacı yoktu. Uzay ve zamanın kütleçekiminin etkisi altında nasıl eğildiği konusunda bir kuram ortaya koyabilmek için Einstein'ın, bu kavramların en başta nasıl ortaya çıktığından haberdar olması gerekmemiştir. Bu keşiflerin ve modern evren kavrayışımızın altında yatan diğer keşiflerin her biri kaçınılmaz olarak arkalarında cevapsız sorular bırakarak sınırlı bir bağlamda ilerlemişti. Hiç kimse bilmecenin parçaları birleştiğinde ortaya çıkacak büyük resmin ne olduğunu bilmediği halde -hâlâ bilmiyoruz- her keşif bilmecenin bir parçasını daha yerine koyabiliyordu.

Bununla yakından bağlantılı bir gözlem, her ne kadar bilim bugün elli yıl öncekinden bile son derece farklı olsa da, bilimsel ilerlemenin her kuramın kendinden önce geleni çöpe atması olarak özetlemenin yüzeysel kalacağıdır. Daha doğru bir tanımlama, her yeni kuramın daha kesin ve daha geniş etkili bir yapı oluşturarak kendinden önce gelen kuramları rafine ettiğidir. Einstein'ın genel göreliliği Newton kuramını aşmıştır ama Newton kuramının yanlış olduğunu söylemek saflık olur. Işık hızına yakın hızlarda hareket etmeyen ve kara deliklerinki kadar güçlü kütleçekimi alanları üretmeyen cisimlerin dünyasında Newton kuramı son derece doğrudur. Ama bu, Einstein'ın kuramının Newton'ununkiye küçük bir değişiklik yapılmış bir hali olduğu anlamına gelmez; Newton'un kütleçekimine yaklaşımını geliştirirken Einstein uzay ve zaman kavramlarımızı kökten değiştiren, yepyeni kavramsal bir şema yaratmıştır. Ama Newton kuramının hedeflediği alandaki (gezegenlerin hareketi, genel uzaysal hareketler,vb.) gücü, kesinlikle sarsılmazdır.

Biz her yeni kuramın, bizi gerçek adını verdiğimiz elle tutulamaz amacımıza yaklaştırdığını düşünüyoruz ama, nihai bir kuramın -evrenin işleyişini olabilecek en derin düzeyde ortaya koyduğu için daha fazla rafine edilemeyen bir kuramın- bulunup bulunmadığı hiç kimsenin cevaplayamayacağı bir sorudur. Böyle

olsa bile, son üç yüz yıldaki keşiflerin izlediği desen, böyle bir kuramın geliştirilebileceği yolunda çarpıcı kanıtlar ortaya koyuyor. Aşağı yukarı her yeni atılım, daha geniş bir olaylar dizisini daha az sayıdaki kuramsal şemsiye altında açıklayabiliyor. Newton'un keşifleri gezegenlerin hareketlerini yöneten kuvvetlerin, Dünya yüzeyine düşmekte olan cisimlerin hareketlerini yönetenlerle aynı olduğunu ortaya koydu. Maxwell'in keşifleri elektrik ve manyetizmanın bir madeni paranın iki yüzü gibi olduğunu gösterdi. Einstein'ın keşifleri uzay ve zamanın, Midas'ın dokunuşu ve altın kadar ayrılamaz olduğunu gösterdi. Yirminci yüzyılın başlarında bir fizikçi kuşağının keşifleri, mikrofiziğin pek çok sırtının kuantum mekanığı kullanılarak tam olarak çözülebileceğini ortaya koydu. Çok daha yakın zamanlarda Sheldon, Glashow ve Salam'ın keşifleri elektromanyetik ve zayıf nükleer kuvvetlerin tek bir kuvvetin -elektrozayıf kuvvetin- iki ayrı görünümü olduğunu ve daha geniş bir sentezde güçlü nükleer kuvvetin de elektrozayıf kuvvete katılabileceği yolunda deneysel ve ayrıntılı kanıtlar bulunduğunu gösterdi.¹ Tüm bunları birleştirdiğimizde karmaşıklıktan basitliğe, çeşitlilikten tekliğe giden bir desen görüyoruz. Açıklayıcı oklar, doğadaki bütün kuvvetleri ve bütün maddeyi, bütün fiziksel olayları açıklama yeteneğine sahip olan, güçlü ama henüz keşfedilmemiş olan tek bir yapıda birleştirecek bir kurama doğru yönelmiş gibi duruyor.

30 yıldan daha uzun bir süre boyunca elektromanyetizma ile genel göreliliği tek bir kuram altında birleştirmeye çalışmış olan Einstein, haklı olarak çağdaş birleşik kuram araştırmalarının öncüsü sayılır. Bu yıllar boyunca uzun sürelerle Einstein, birleşik kuram konusundaki araştırmaları tek başına sürdürdü, bu arada tutkulu fakat yalnız mücadelesi onu fizik toplumunun geri kalanından kopardı. Aslında son yirmi yılda birleşik kuram araştırmalarında bir canlanma oldu; Einstein'ın yalnız rüyası tüm bir fizikçi kuşağının itici gücü haline gelmişti. Ama Einstein'ın zamanından günümüze doğru araştırmalarda bir odak kayması oldu. Henüz güçlü nükleer kuvvetle elektrozayıf kuvveti birleştiren başarılı bir kurama sahip olmasak bile, bu kuvvetlerin her

üçü de (elektromanyetik, zayıf, güçlü) kuantum mekaniğine dayanan tek ve birörnek bir dille tanımlanmıştır. Ama dördüncü kuvvetin en rafine kuramı olan genel görelilik, bu yapının dışında kalmıştır. Genel görelilik klasik bir kuramdır: Kuantum kuramının olasılık içeren kavramlarından herhangi biriyle işbirliği içine girmez. Bu yüzden modern birleşme programının en önemli hedeflerinden biri, genel göreliliği kuantum mekaniği ile birleştirmek ve dört kuvveti de kuantum mekaniğine özgü tek yapı içinde tanımlamaktır. Bunun da kuramsal fiziğin şimdiye kadar karşılaştığı en güç problemlerden biri olduğu kanıtlanmıştır.

Bunun neden böyle olduğunu görelim.

Kuantum Titrenimleri ve Boş Uzak

Eğer kuantum mekaniğinin en akılda kalıcı tek bir özelliğini seçmem gerekseydi, belirsizlik ilkesini seçerdim. Olasılıklar ve dalga fonksiyonları elbette yepyeni bir yapı ortaya koyarlar ama klasik fizikten kopuşu temsil eden kavram belirsizlik ilkesidir. Hatırlarsanız, on yedinci ve on sekizinci yüzyıllarda bilim insanları, fiziksel gerçekliğin tam olarak tanımlanmasının ancak evreni oluşturan maddenin her bileşeninin, her parçacığının konum ve hızının belirlenmesiyle mümkün olacağına inanıyorlardı. On dokuzuncu yüzyılda alan kavramının ortaya çıkması ve sonra da elektromanyetik ve kütleçekimi kuvvetlerine uygulanmasıyla birlikte bu görünüm, uzayın her noktasında her alanın değerini -yani her alanın şiddetini- ve gene her alanın değerinin değişim hızını kapsayacak şekilde zenginleşti. Ama 1930'larda belirsizlik ilkesi uzaydaki bir noktada bir parçacığın hem konumunu, hem de hızını ya da bir alanın hem değerini hem de değişim hızını aynı anda hiçbir zaman bilemeyeceğimizi göstererek bu yapıyı dağıttı. Kuantum belirsizliği bunu yasaklar.

Son bölümde tartıştığımız gibi, bu kuantum belirsizliği mikro dünyanın çalkantılı ve titrenimli bir gerçeklik olmasına neden olur. Daha önceleri inflaton alanı için belirsizlikten kaynaklanan kuantum tedirginlikleri üzerine odaklanmış olsak da, kuantum belirsizliği bütün alanlara uygulanır. Elektromanyetik alan,

güçlü ve zayıf elektromanyetik kuvvet alanları ve kütleçekimi alanlarının hepsi mikroskopik ölçeklerde çılgın kuantum titre-
nimlerine uğrarlar. Gerçekte, normal olarak boş olduğunu dü-
şündüğünüz uzayda, hiçbir madde veya alan içermiyor gibi gö-
rünen uzayda bile bu alan titreimleri vardır. Bu, kritik derece-
de önemli bir fikirdir, ama eğer daha önce bu fikirle hiç karşı-
laşmadıysanız, şaşırmanız doğaldır. Eğer bir uzay bölgesi hiç-
bir şey içermiyorsa -boşluksa- o zaman bu, titrenecek herhan-
gi bir şey olmayacağı anlamına gelmez mi? Hiçlik kavramının
tanımlanması zor bir kavram olduğunu zaten öğrenmiştik. Mo-
dern kuramın boş uzayı doldurduğunu öne sürdüğü Higgs ok-
yanusunu düşünün. Şimdi söz ettiğim kuantum titreimleri "hiç-
bir şey" kavramını daha da gizemli bir hale getirmeye yarıyor.
Şunu demek istiyorum.

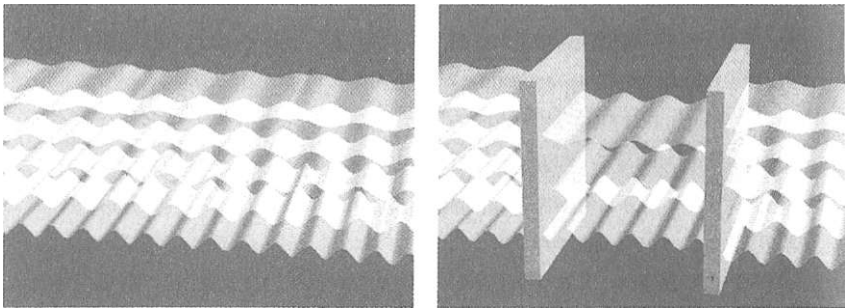
Kuantum öncesi (ve Higgs öncesi) fizikte uzayın bir bölgesi-
nin, ancak hiçbir parçacık içermiyorsa ve her alanın değeri bi-
rörnek olarak sıfırsa, tam olarak boş olduğunu kabul etmiştik.*
Şimdi klasik boşluk kavramı hakkında kuantum belirsizlik ilke-
si ışığında düşünelim. Eğer bir alan yok olan bir değere sahipse
ve bunu sürdürürse, o zaman bu alanın değerini -sıfır- ve deği-
şim hızını -o da sıfır- biliriz. Ama belirsizlik ilkesine göre bu iki
niteliğin birden belirli olması mümkün değildir. Eğer bir alanın
bir andaki değeri belirliyse, elimizdeki örnekte sıfır, belirsizlik
ilkesi bize bu alanın değişim hızının tümüyle rasgele olduğunu
söyler. Rasgele bir değişim hızı da, normal olarak boş olduğu-
nu düşündüğümüz uzayda bile, sonraki anlarda alanın değerinin
rasgele olarak yukarı-aşağı salınacağı anlamına gelir. O zaman,
içinde bütün alanların hem sıfır değerine sahip olduğu, hem de
bunu sürdürdüğü sezgisel boşluk kavramı kuantum mekaniğiyle
bağdaşmaz. *Bir alanın sıfır değeri etrafında titretilim sergileyebi-*

* Yazım kolaylığı açısından, yalnızca değerleri sıfır olduğunda en düşük enerjilerine ula-
şan alanları göz önüne alacağız. Diğer alanların -Higgs alanlarının- incelenmesi aynı şe-
kildedir. Tek fark, kuantum titretilimlerinin alanın *sıfırdan farklı*, en düşük enerji düzey-
leri çevresinde oluşmasıdır. Bir uzay bölgesinin yalnızca Hiçbir maddenin bulunmadığı
ve alan değerlerinin sıfır olduğu değil, hiçbir alanın *olmadığı* zaman boş olduğunu düşü-
nüyorsanız, notlar bölümüne bakınız.²

lir ama bir bölgedeki değeri, kısa bir an dışında birörnek olarak sıhr kalmaz.³ Teknik dille, fizikçiler alanların boşluk titrenimlerine maruz kaldığını söylerler.

Boşluk alan titrenimlerinin raslantısal doğası, en mikroskopik alanlar dışındaki bütün alanlarda ne kadar "yukarı" salınım varsa o kadar da "aşağı" salınım olmasını, böylece de ortalama değerin sıfır olmasını sağlar. Bu, tıpkı çıplak gözle son derece pürüzsüz görünen mermer bir yüzeyin elektron mikroskopuyla baktığı zaman girinti ve çıkıntılarla dolu olduğunun görülmesine benzer. Bununla birlikte, doğrudan göremiyor olsak da, kuantum alan titrenimlerinin gerçekliği yarım yüzyıldan daha uzun bir süre önce, boş uzayda bile, bir dizi basit ama esaslı keşide ortaya konmuştu.

1948'de Hollanda'lı fizikçi Hendrik Casimir elektromanyetik alanın boşluk titrenimlerinin deneysel olarak nasıl saptanabileceğini buldu. Kuantum kuramı boş uzaydaki elektromanyetik alan titrenimlerinin Şekil 12.1a'daki gibi değişik şekiller alacağını söyler.Casimir'ın atılımı, boş bir bölgeye Şekil 12.1b deki gibi iki tane sıradan metal plaka yerleştirerek, bu kuantum titrenimlerinin değişik bir türünü elde edebileceğini fark etmiş olmasıydı. Yani, kuantum denklemleri plakalar arasındaki bölgede daha az salınım olacağını gösteriyor (yalnızca her plakanın bulunduğu yerde değeri sıfıra giden elektromanyetik titrenimle-



(a)

(b)

Şekil 12.1 (a) Elektromanyetik alanın boşluk titrenimleri (b) İki plakanın arasındaki boşluk titrenimleri

re izin var). Casimir bu alan titrenimlerindeki azalmanın sonuçlarını çözümlledi ve olağandışı bir şey buldu. Tıpkı bir bölgedeki hava miktarındaki azalmanın bir basınç dengesizliği yaratması gibi (örneğin yüksek yerlerde *daha seyrelmiş olan havanın* kulak zarlarınıza dışarıdan daha az basınç uyguladığını fark edersiniz), plakalar arasında kuantum alan titrenimlerinin azalması da bir basınç dengesizliği yaratır: Plakalar arasındaki kuantum alan titrenimleri, plakaların dışındakilere oranla biraz daha zayıf kalır ve bu dengesizlik, *plakaların birbirine doğru çekilmesi-ne neden olur.*

Bunun ne kadar garip olduğunu bir düşünün. Uzayın *boş* bir bölgesine üzerlerinde elektrik yükü bulunmayan iki tane sıradan metal plakayı birbirlerine bakacak şekilde yerleştiriyorsunuz. Plakaların kütleleri çok minik olduğundan, aralarındaki kütleçekimi kuvveti tümüyle gözardı edilebilecek kadar küçüktür. Çevrede başka bir şey olmadığı için bu plakaların doğal olarak koyduğunuz yerde kalmalarını beklersiniz. Ama Casimir'in hesaplarının olacağını gösterdiği şey bu *değil*. Casimir, plakaların hayaletimsi boşluk alan titrenimleri tarafından etkilenerek yavaşça birbirlerine doğru hareket edecekleri sonucuna varmıştı.

Casimir bu kuramsal sonuçları ilk kez duyurduğunda, bu öngörülerini sınavacak hassaslıkta deneysel araçlar henüz yoktu. Ama on yıl içinde bir başka Hollanda'lı fizikçi olan Marcus Spaarnay, bu *Casimir kuvveti nin* ilk basit testlerine başlayabildi ve o zamandan günümüze kadar gittikçe daha hassas sınamalar gerçekleştirildi. Örneğin 1997'de o zamanlar Washington Üniversitesi'nde çalışan Steve Lamoreaux, Casimir'in hesaplarını yüzde 5'lik bir hata payıyla doğruladı.⁴ (Birbirlerinden santimetrenin on binde biri kadar uzağa yerleştirilen oyun kartı büyüklüğündeki plakaların arasındaki kuvvet, yaklaşık olarak tek bir gözyaşı damlasının ağırlığına eşittir. Bu da Casimir kuvvetini ölçmenin ne kadar zor olduğunu gösteriyor.) Şimdi artık sezgisel boş uzay kavramının durağan, sakin ve olaysız bir bölge olduğu yolunda bazı kuşkuvar. Kuantum belirsizliği nedeniyle boş uzay kuantum etkinliğiyle kaynıyor.

Bilim insanlarının elektromanyetik, güçlü ve zayıf nükleer kuvvetlerin böylesi kuantum etkinliklerini tanımlayacak matematiği tam olarak geliştirmeleri, yirminci yüzyılın büyük bir bölümünü aldı. Ama bütün çabalara değdi: Bu matematiksel yapı kullanılarak yapılan hesaplar deneysel bulgularla şimdiye kadar elde edilememiş büyük bir kesinlikle örtüşüyor (örneğin elektronların manyetik özelliklerindeki boşluk titrenimleri etkisi, deneysel sonuçlarla milyarda bir hata payıyla aynı).⁵

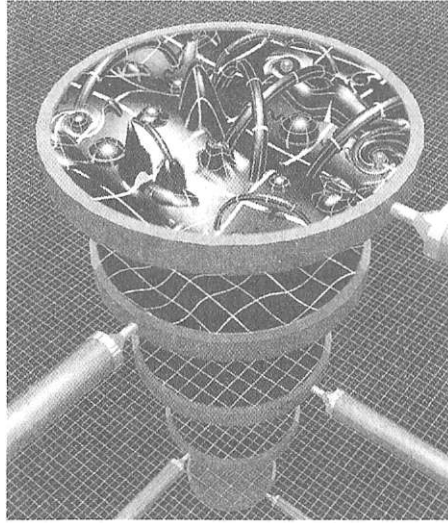
Ama bütün bu başarılarla rağmen, on yıllar boyunca fizikçiler kuantum titrenimlerinin fizik yasalarında bir hoşnutsuzluk ortaya çıkardığının da farkındaydılar.

Titrenimler ve Yarattıkları Hoşnutsuzluk⁶

Şimdiye kadar, yalnızca uzayın *içinde* var olan alanların kuantum titrenimlerini inceledik. Ya uzayın kendisinin kuantum titrenimleri? Bu kavram kulağa gizemli gibi geliyorsa da, aslında kuantum alan titrenimlerinin bir başka örneğidir, ama bu örneğin sorunlu olduğu biliniyor. Genel görelilik kuramında Einstein kütleçekimi kuvvetinin uzayın dokusundaki bazı eğrilmeler ve bükülmelerle tanımlanabileceğini kanıtlamış; kütleçekimi alanlarının kendilerini uzayın (ve daha genel olarak uzay-zamanın) şekli ya da geometrisi olarak ortaya koyduklarını göstermişti. Şimdi, tıpkı herhangi bir başka alan gibi kütleçekimi alanı da kuantum titrenimlerinin etkisi altındadır: Belirsizlik ilkesi minik uzaklık ölçeklerinde kütleçekimi alanının yukarı-aşağı salınmasına neden olur. Kütleçekimi alanı uzayın şekliyle aynı anlama geldiği için, böylesi kuantum titrenimleri uzayın şeklinin rasgele dalgalandığı anlamına gelir. Bütün diğer kuantum belirsizlik örneklerinde olduğu gibi, gündelik uzaklık ölçeklerinde de titrenimler doğrudan algılanamayacak kadar küçüktür ve çevredeki ortam pürüzsüz, sakın ve önceden hesaplanabilirmiş gibi görünür. Ama gözlem ölçeği küçüldükçe belirsizlik giderek büyür ve kuantum titrenimleri daha fırtınalı bir hal alır.

Şekil 12.2'de gösterilen bu durumda uzayın dokusunu git-tikçe büyüterek giderek daha küçük ölçeklerde yapısını ortaya

koyduk. Şekildeki en alt düzey, bilindik ölçeklerde uzaydaki kuantum salınımlarını gösteriyor ve kolaylıkla görebileceğiniz gibi, ortalıkta görülecek bir şey yok; salınımlar gözlenemeyecek kadar küçük olduğundan uzay sakın ve düz görünüyor. Ama bölgeyi büyüterek yaklaşıncı uzayın salınımlarının giderek arttığını görüyoruz. Uzayın dokusunu *Planck uzunluğundan (Planck mesafesinden)* -bir santimetrenin milyon kere milyar kere milyar kere milyarda biri (10^{-35})- daha küçük ölçeklerde gösteren şekildedeki en yukarıdaki düzeyde uzay fokurdayan, kaynayan titretilimlerle dolar. Bu şeklin açıkça gösterdiği gibi, olağan sağa/sola, ileri/geri, yukarı/aşağı kavramları mikroskopik ötesi karışıklıkta o kadar birbirlerine girerler ki, tümü de anlamını kaybeder. Uzay-zaman somunundan ardışık dilimler almakla açıklayageldiğimiz, olağan önce/sonra kavramları bile, Planck zamanından, yani yaklaşık bir saniyenin milyon kere trilyon kere trilyon kere trilyonda birinden (10^{-43}) (ki bu, ışığın Planck uzunluğunu kat



Şekil 12.2 Uzayın ardışık büyütmeleri, Planck uzunluğunun altında uzayın kuantum titretilimleri nedeniyle tanınamayacak kadar karmaşık olduğunu ortaya koyar. (Bunlar, her biri 10 milyon ile 100 milyon kez arasında büyütme sağlayan hayali büyütmeçlerdir.)

etmesi için gereken süredir) daha kısa zaman ölçeklerindeki kuantum titrenimleri tarafından anlamsız hale getirilir. Bulanık bir fotoğraf gibi, Şekil 12.2'deki vahşi titrenimler, aralarında Planck zamanından daha kısa süre olan zaman kesitlerini birbirlerinden hiç kuşkuyla yer bırakmayacak bir şekilde ayırabilmeyi olanaksız kılar. Sonuç, Planck uzunluğu ve zamanından daha kısa ölçeklerde kuantum belirsizliği uzayın dokusunu o kadar eğrilmiş ve bükülmüş hale getirir ki, artık olağan uzay ve zaman kavramları uygulanabilir olmaktan çıkar.

Ayrıntıda egzotik olsa da, Şekil 12.2'den genel olarak çıkacak ders, aslında bildiğimiz bir derstir: Bir ölçekle ilişkili kavram ve sonuçlar bütün ölçeklerde uygulanabilir olmayabilirler. Bu, fizikte kilit önemde bir ilke olup, daha yavan, düz bağlamlarda bile sık sık karşımıza çıkar. Bir bardak suyu ele alalım. Suyu gündelik ölçeklerde pürüzsüz, bir örnek bir sıvı olarak tanımlamak hem yararlı, hem de amaca uygundur ama eğer suyu mikroskopik altı bir hassasiyetle çözümlersek, bu bir yaklaşıtımdır. Mink ölçeklerde pürüzsüz görüntü, yerini birbirinden epeyce uzak molekül ve atomlardan oluşan, tamamiyle farklı bir yapıya bırakır. Benzer bir biçimde, Şekil 12.2'de Einstein'ın pürüzsüz, yumuşak bir şekilde eğrilen geometrik uzay ve zaman kavramı, her ne kadar evreni büyük ölçeklerde tanımlamakta güçlü ve kesin sonuçlar vermekle birlikte, evreni çok kısa uzaklık ve zaman ölçeklerinde çözümlmeye çalıştığımızda dağılır. Fizikçiler, su örneğinde olduğu gibi, uzay ve zamanın portresinin pürüzsüz olarak çizilmesinin de, mikroskobik-ötesi ölçeklerde incelendiğinde yerini çok daha temel olan bir başka yapıya bırakan bir yaklaşıtırdır olduğuna inanırlar. Bu yapının ne olduğu, uzay ve zamanın "moleküllerini" ve "atomlarını" neyin oluşturduğu, son zamanlarda cevabı büyük çabalar harcanarak aranan bir soru olup henüz çözülememiştir.

Bu durumda bile, Şekil 12.2'de açıkça ortaya çıkan şey, uzay ve zamanın genel görelilik tarafından ortaya konan pürüzsüz karakterinin, kuantum mekaniğinin titrenimli, salınındı yapısına dönüştüğüdür. Einstein'ın genel göreliliğinin, uzay ve zama-

nın yumuşakça bükülen bir geometrik şekil ortaya koyduğu yollardaki temel ilkesi, kuantum mekaniğinin en minik ölçeklerde fırtınalı ve çalkantılı bir ortam öngören temel ilkesiyle, belirsizlik ilkesiyle çatışır. Genel görelilik ve kuantum mekaniğinin temel ilkeleri arasındaki şiddetli çatışma, bu iki kuramı birleştirmeyi, fizikçilerin son seksen yılda karşılaştıkları en çetin görevlerden biri haline getirir.

Fark Eder mi?

Pratikte genel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki bağdaşmazlık, kendini çok özel bir şekilde gösterir. Eğer genel görelilik ve kuantum mekaniğinin birleşik denklemlerini kullanırsanız, hemen hemen her zaman aynı sonucu bulursunuz: Sonsuzluk. Zaten sorun da budur. Bu, saçmalıktır. Deneyciler hiçbir zaman hiçbir şeyin sonsuz bir miktarını ölçmezler, ibreler sonsuzu göstermez. Metreler hiçbir zaman sonsuza uzanmaz. Hesap makineleri sonsuzluğu almaz. Sonsuz cevabı hemen hemen her zaman anlamsızdır. Bize tüm anlattığı, genel görelilik ve kuantum mekaniği denklemlerinin birleştirildiklerinde zıvanadan çıktıklarıdır.

Dikkat ederseniz bu, Bölüm 4'te incelediğimiz kuantumun yerel olmayışı konusunda ortaya çıkan özel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki gerilime hiç benzemez. Orada, özel göreliliğin ilkeleriyle (özel olarak, sabit hızla hareket eden bütün gözlemciler arasındaki simetri) bağlantılı parçacıkların davranışlarını bağdaştırmanın, kuantum ölçüm probleminin o zamana kadar ulaşılandan daha geniş bir kavrayışına sahip olmayı gerektirdiğini görmüştük. Ama tam olarak çözüme kavuşturulmamış olan bu konu, matematiksel tutarsızlıklara veya anlamsız sonuçlar ortaya koyan denklemlere yol açmaz. Tersine, özel görelilik ve kuantum mekaniğinin birleşik denklemleri bilim tarihindeki en büyük kesinlikle doğrulanan hesapları yapmakta kullanılmıştı. Özel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki sessiz gerilim, kuramsal olarak daha çok geliştirilme ihtiyacındaki bir alanı işaret eder, ama bu gerilimin birleşik hesaplama gücü üzerinde ne-

redeyse hiç etkisi yoktur. Oysa genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki, bütün hesaplama gücünün kaybolduğu patlayıcı birliktelikte durum hiç de böyle değildir.

Bununla birlikte, yine de genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki bağdaşmazlığın gerçekten önemli olup olmadığını sorabilirsiniz. Birleşik denklemlerden saçmalık çıkıyor olabilir ama bu denklemleri bir arada kullanmaya gerçekten ne zaman ihtiyaç duyuyoruz? Yıllar süren astronomi gözlemleri genel göreliliğin yıldızların, galaksilerin ve hatta evrenin makro dünyasını etkileyici bir kesinlikle betimlediğini göstermiştir; on yıllarca süren deneylerde kuantum mekaniğinin aynı şeyi moleküllerin, atomların ve atom altı parçacıkların mikro dünyası için yaptığı bulunmuştur. Her iki kuram da kendi alanlarında harika bir şekilde işlediğine göre, neden bunları birleştirmeye çalışıyoruz? Onları neden birbirlerinden ayrı tutmuyoruz? Neden büyük boyutlu ve büyük kütleli cisimler için genel göreliliği, küçük ve hafif şeyler için kuantum mekaniğini kullanarak insanlığın birbirlerinden böylesine farklı olayları başarılı bir şekilde kavramış olmasının keyfini çıkarmıyoruz?

Aslına bakarsanız, yirminci yüzyılın başlarından beri pek çok fizikçinin yaptığı da bu ve bunun da verimli bir yaklaşım olduğunu kimse inkâr etmiyor. Bilimin bu birbirinden ayrı yapılar altında çalışarak elde etmiş olduğu ilerleme gerçekten etkileyicidir. Ama yine de genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki uzlaşmazlığın giderilmeye çalışılmasının bir dizi nedeni vardır. Bunlardan ikisi şöyledir.

Birincisi, temel düzeyde, evrenin en derinden kavranmasının birbirleriyle bağdaşmayan iki güçlü kuramsal yapının rahatsız, tedirgin bir birliğini gerektirdiğine inanmak güçtür. Evrende genel görelilikle uygun biçimde açıklanabilecek olaylarla kuantum mekaniğiyle uygun bir biçimde açıklanabilecek olaylar arasında kuma çizilmiş bir çizgiye benzer bir ayrım olması pek mantıklı görünmüyor. Evreni iki ayrı alana bölmek hem yapay hem de biçimsiz duruyor. Birçoklarına göre bu, genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki çatlağı kapatacak ve *her şeye* uygulanabile-

cek olan, daha derin ve birleşik bir kuramın olması gerektiğinin kanıtıdır. Tek bir evrenimiz olduğu için çoğu kimse tek bir kuramımız olması gerektiğine yürekten inanıyor.

İkincisi, her ne kadar cisimler ya büyük ve ağır ya da küçük ve hafif olduğu için genel görelilikle *veya* kuantum mekaniğiyle betimlenebilirse de, bu her şey için doğru değildir. Buna en iyi örnek kara deliklerdir. Genel göreliliğe göre, kara deliği oluşturan maddenin tamamı, kara deliğin merkezindeki minik bir noktaya sıkışmıştır.⁷ Bu da kara deliğin merkezinin hem devasa kütleli, hem de minik boyutlu olması demektir; bu yüzden de her iki kuramı birden ilgilendirir: Büyük kütle önemli bir kütleçekimi alanı yarattığı için genel göreliliği kullanmak zorundayız, ama bütün kütle minik bir noktaya sıkıştığı için aynı zamanda kuantum mekaniğini de kullanmamız gerekir. Ama birleştirildiğinde, denklemler çöker, bu nedenle hiç kimse bir kara deliğin merkezinde ne olup bittiğini tam olarak belirleyememiştir.

Bu iyi bir örnektir ama eğer gerçek bir kuşku cuysanız, bunun insanı gece uykusuz bırakması gereken bir şey olup olmadığını düşünebilirsiniz, içine atlamadığımız sürece bir kara deliğin içini göremeyeceğimiz için, üstelik görebilsek bile gözlemlerimizi dışarıdaki dünyaya bildiremeyeceğimiz için, kara deliklerin içi konusundaki eksik kavrayışımız size fazla endişe verici bir durum gibi görünmeyebilir. Ama fizikçiler için, bilinen fizik yasalarının çöktüğü bir ortamın varlığı -bu ortam ne kadar içine kapalı görünürse görünsün- kırmızı uyarı ışıklarının yanmasına neden olur. Eğer bilinen fizik yasaları herhangi bir koşulda çöküyorlarsa, bu, olası en derin kavrayışa henüz ulaşamamış olduğumuzun açık bir işaretidir. Sonuçta evren işliyor; bilebildiğimiz kadarıyla evren çökmüyor. Evrenin doğru kuramının da, en azından aynı standardı karşılaması gerekir.

Bu son derece mantıklı görünüyor. Ama genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki çatışmanın aciliyeti bir başka örneklerle de ortaya konabilir. Yeniden Şekil 10.6 ya bakın. Görebileceğiniz gibi, kozmik evrimin öngörülebilir öyküsünü derleyip toplamakta önemli aşamalar kaydetmiş olmakla birlikte, evre-

nin başlangıcı sırasındaki bulanık bölge yüzünden resmi henüz tamamlamadık. İlk dönemleri sarmalayan bu puslu sisin içinde sırların bu en çarpıcısının ipuçları bulunur: Uzay ve zamanın kökeni ve temel doğası. O zaman bizi bu sis perdesini aralamaktan alıkoyan nedir? Suç, tam karşıdaki genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki çatışmaya atılır. Büyük ve küçüğün yasaları arasındaki düşmanlık, bulanık bölgenin öyle kalmasının ve evrenin başlangıcında ne olup bittiğini hâlâ bilemiyor olmamızın nedeni olarak gösterilir.

Bunun neden olduğunu anlamak için, Bölüm 10'da olduğu gibi, genişleyen evren filmini geriye, Büyük Patlamaya doğru oynattığımızı varsayalım. Bu filmde, birbirlerinden uzaklaşan her şey birbirine doğru hareket eder, bu yüzden film tersine oynatılmaya devam ettikçe evren küçülür, ısınır ve yoğunlaşır. Sıfır zamanının kendisine yaklaştıkça *bütün* gözlenebilir evren önce Güneş boyutlarına, daha sonra Dünya boyutlarına kadar sıkışır; daha sonra da bir bowling topu, bir bezelye, bir kum tane-si boyutlarına iner, filmin ilk karelerine doğru geriye gittikçe evren git gide daha çok büzülür. Geriye oynatılan bu filmde bilinen evrenin Planck uzunluğu -santimetrenin milyon kere milyar kere milyar kere milyarda biri- boyutlarına yaklaştığı bir an gelir ki, bu anda genel görelilik ve kuantum mekaniği kendilerini kavga-lı bulurlar. Bu anda bilinen evrenin tohumlanmasından sorumlu olan bütün madde ve enerji, tek bir atomun yüzde birinin milyarda birinin milyarda birinden daha küçük bir noktaya sıkışmıştır.⁸

Bu yüzden, tıpkı kara deliğin merkezinde olduğu gibi, evren de ilk anlarında bu bölünmenin her iki yanında birden bulunur: ilkel evrenin devasa yoğunluğu genel göreliliğin kullanılmasını gerektirir, ilkel evrenin minik boyutları ise kuantum mekaniğinin kullanılmasını gerekli kılar. Ama bir kere daha, birleştiklerinde bu yasalar çöker. Projektör sıkışır, kozmik film yanar ve bu yüzden evrenin ilk anlarına ulaşamayız. Genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki bu çatışma yüzünden başlangıçta ne olduğu konusunda bilgisiz kalır ve Şekil 10.6'daki bulanık bölgeyi çizeriz.

Evrenin kökenini -bütün bilimlerdeki en derin sorulardan biri- eninde sonunda anlamayı umut edebilmemiz için genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki çatışmanın ortadan kalkması *gerekir*. Büyüklerin yasasıyla küçüklerin yasası arasındaki farkları uzlaştırmamız ve ikisini uyumlu tek bir kuramda birleştirmemiz gerekir.

Çözümü Vermeyecek Yol*

Newton ve Einstein'ın çalışmalarının örneklediği gibi, bilimsel atılımlar bazen bir dâhinin kafasında sat ve basit bir biçimde doğar. Ama bu enderdir. Genelde ise büyük atılımlar birçok bilim insanının toplu çabasını temsil eder. Bunlardan her biri, hiçbir bireyin tek başına elde edemediği şeyleri başkalarının fikirleri üzerinde şekillendirir. Bir araştırmacı, bir başka arkadaşını düşündüren bir fıkre katkıda bulunur, bu düşünce bir gözleme yol açar, bu gözlem önemli bir gelişme sağlayan bir ilişkiyi açığa çıkarır, bu gelişme ise yeni bir keşif çevrimi başlatır. Geniş bilgi, teknik altyapı, düşünce esnekliği, beklenmedik bağlantılara açık olmak, dünya çapındaki düşünce hareketlerinden haberdar olmak, sıkı çalışma ve şans, bilimsel keşfin önemli parçalarıdır. Son zamanlarda belki de bunu *süpersicim kuramından* daha iyi örnekleyen bir başka atılım daha yoktur.

Süpersicim kuramı birçok bilim insanının genel görelilikle kuantum mekaniğini başarıyla birleştirdiğine inandığı bir yaklaşımdır. Göreceğimiz gibi, daha fazlasını beklemek için nedenlerimiz de vardır. Her ne kadar hâlâ gelişmekte olan bir çalışma ise de, süpersicim kuramı rahatça bütün kuvvetlerin ve maddenin tam anlamıyla birleşik bir kuramı olabilir. Einstein'ın rüyasına ve hatta ötelere uzanan bir kuram olabilir. Benim ve başkalarının da inandığı gibi, bizi günün birinde evrenin en derin yasalarına götürecek olan yolun başlangıcını gösteriyor ola-

* Bu bölümün geri kalanında süpersicim kuramının keşfi anlatılıyor ve kuramın birleştirme ve uzay-zamanın yapısına ilişkin temel fikirleri inceleniyor. *Errenin Zarafetini* (özellikle 6., 7. ve 8. bölümleri) okumuş olanlar buradaki konuları biliyor olacaklarından bu bölümün geri kalanını atlayıp diğer bölüme geçebilirler.

bilir. Doğrusu, süpersicim kuramı bu asil ve uzun-erimli hedeflere ulaşmak amacıyla tasarlanmamıştır. Süpersicim kuramının geçmişi rastlantısal keşiflerle, yanlış başlangıçlarla, kaçmış fırsatlarla ve neredeyse mahvolmuş mesleki yaşamlarla doludur. Aynı zamanda, kesin anlamda yanlış problem için doğru çözümün keşfinin öyküsüdür.

1968'de CERN'de çalışan genç bir doktora sonrası araştırmacısı olan Gabriele Veneziano, dünyanın her tarafındaki atom çarpıştırıcılarında gerçekleştirilen yüksek-enerjili parçacık çarpıştırma deneylerinin sonuçlarını inceleyerek güçlü nükleer kuvveti anlamaya çalışan birçok fizikçiden biriydi. Aylarca süren verilerdeki desenleri ve düzenlilikleri çözümleme çalışmalarından sonra Veneziano matematiğin çok özel bir dalı ile şaşırtıcı ve beklenmedik bir bağlantı olduğunu fark etti. Veneziano, İsviçreli ünlü matematikçi Leonhard Euler tarafından iki yüz yıl önce keşfedilen bir formülün (*Euler beta fonksiyonu*) güçlü nükleer kuvvet verileriyle uyuşur gibi göründüğünü buldu. Bu, kulağa özel olarak olağandışı gibi gelmiyorsa da -kuramsal fizik sürekli olarak giz dolu formüllerle uğraşır- bu, arabanın atın kilometrelerce önüne bağlandığı durumların çarpıcı bir örneğiydi. Genellikle fizikçiler çalıştıkları konuda önce bir önsezi, zihinsel bir tablo ve konuyla ilgili fizik ilkeleri konusunda geniş bir kavrayış geliştirirler, ancak bu aşamadan sonra önsezilerini matematiksel kesinliğe dönüştürecek formülleri ararlar. Bunun tersine Veneziano doğrudan denklemin üzerine atladı; zekâsı verilerdeki olağandışı desenleri anlamasını ve bu desenlerle yüzyıllarca önce sadece matematiksel bir ilgiyle ortaya konmuş olan bir formül arasında beklenmedik bir bağlantı olduğunu fark etmesini sağlamıştı.

Ama formül Veneziano'nun elinde olmasına rağmen, verilerin *neden* bu formüle uyduğu yolunda hiçbir açıklaması yoktu. Euler'in beta fonksiyonunun birbirleriyle güçlü nükleer kuvvet aracılığıyla etkileşen parçacıklarla neden ilişkili olması gerektiği yolunda fiziksel bir kavrayıştan yoksundu. İki yıl içinde durum tümüyle değişti. 1970'te Stanford'dan Leo-

nard Susskind'in, Niels Bohr Enstitüsü'nden Holger Nielsen'in ve Chicago Üniversitesi'nden Yoichiro Nambu'nun makaleleri Veneziano'nun keşfinin temellerini ortaya koydu. Bu fizikçiler, ancak iki parçacık arasındaki güçlü nükleer kuvvetin, bu parçacıkları birbirine bağlayan minik, son derece ince ve hemen hemen lastik bant gibi bir iplikçikten kaynaklanıyor olması durumunda Veneziano ve diğerlerinin üzerinde çalıştıkları kuantum süreçlerinin matematiksel olarak Euler'in formülüyle tanımlanabileceğini gösterdiler. Bu küçük, elastik iplikçiklere *sicim* adı verildi ve artık at, olması gerektiği gibi arabanın önüne koşularak sicim kuramı resmen doğdu.

Bu araştırmada yer alanlar için Veneziano'nun kavrama yeteneğinin fiziksel kökenlerini anlamak memnuniyet vericiydi, çünkü fizikçilerin güçlü nükleer kuvveti çözme konusunda yol aldıklarını gösteriyordu. Ama bu keşif evrensel bir heyecanla karşılanmadı. Hem de hiç. Aslında Susskind'in makalesi, yayımlanmak üzere gönderildiği dergi tarafından geri çevrilmiş, neden olarak da çalışmanın ilgi uyandırmadığı bildirilmişti. Susskind bu değerlendirmeyi şöyle anlatıyor: "Afallamıştım; neredeyse sandalyemden yuvarlanıyordum, depresyona girdim, eve gittim ve sarhoş oldum."⁹ Sonunda onun makalesi ve sicim kavramını ortaya atan diğerlerinin hepsi yayımlandı, ama çok geçmeden kuram iki tahrip edici darbeye daha karşı karşıya geldi. 1970'lerin başında güçlü nükleer kuvvete ilişkin toplanan daha rafine veriler üzerinde yapılan çok daha ayrıntılı bir araştırma, sicim yaklaşımının yeni sonuçları kesin bir biçimde betimlemekte başarısız olduğunu gösterdi. Üstelik kökleri sağlam bir biçimde geleneksel parçacık ve alan bileşenlerinde bulunan *kuantum renk dinamiği* adı verilen yeni bir öneri -sicim olmadan- verilerini inandırıcı bir şekilde açıklayabilmişti. Bu yüzden 1974'te bir-iki tane devirici yumruk yemiş oldu veya öyle göründü.

John Schwarz sicimin ilk taraftarlarından biriydi. Bir zamanlar bana bu kuramın en baştan beri temel düzeyde derin ve önemli olduğu duygusuna sahip olduğunu söylemişti. Schwarz yıllarca kuramın çeşitli matematiksel yönlerini çözümlemekte uğraştı;

diğer şeylerin yanısıra bu, süpersicim kuramının keşfine de yol açtı; göreceğimiz gibi bu, özgün sicim önerisinde önemli bir değişikliklerdir. Ama kuantum kromodinamiğinin yükselişi ve sicim yapısının güçlü nükleer kuvveti betimlemede başarısız olmasıyla birlikte sicim kuramı üzerinde çalışmayı sürdürme nedenleri zayıflamaya başladı. Bu arada sicim kuramıyla güçlü nükleer kuvvet arasında Schwarz'ı sürekli olarak rahatsız eden bir uyumsuzluk vardı. Schwarz bunun böyle olmayacağına karar verdi. Sicim kuramının kuantum mekaniğine özgü denklemleri, atom çarpıştırıcılarında gerçekleştirilen yüksek-enerjili çarpışmalarda özel bir parçacığın, olağandışı bir biçimde, çok bol sayıda üretilmesi gerektiğini öngörüyordu. Parçacığın kütlesi foton gibi sıfır olacaktı ama sicim kuramında bu yeni parçacığın *spinini iki* olarak hesaplanıyordu ki bu da parçacığın fotondan tahminen iki kat daha hızlı döndüğünü gösteriyordu. Deneylerin hiçbirinde böyle bir parçacık bulunmamıştı, o nedenle bu, sicim kuramının yanlış öngörülerinden biriymiş gibi görünüyordu.

Schwarz ve çalışma arkadaşı Joel Scherk bu kayıp parçacık konusunda meraklanmışlardı, ta ki görkemli ve dev bir adım atarak tümüyle farklı bir problemle bir bağlantı kuruncaya kadar. Her ne kadar hiç kimse genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirmekte başarılı olmadıysa da, fizikçiler başarılı bir birleşmeden çıkacak bazı özellikleri belirlemişlerdi. Bölüm 9'da belirtildiği gibi, buldukları özelliklerden biri, nasıl elektromanyetik kuvvet mikroskobik olarak fotonlarla iletiliyorsa, kütleçekimi kuvvetinin de mikroskobik olarak bir başka tür parçacıkla, gravitonla (kütleçekiminin en küçük kuantum mekaniğine özgü paketçisi) iletiliyordu. Gravitonlar henüz deneysel olarak saptanmış olmasa da, kuramsal çözümlemeler gravitonların şu iki özelliğe sahip oldukları konusunda fikir birliği içindeydi: Kütlesiz olmalıydılar ve spinleri de iki olmalıydı. Bu, Schwarz ve Scherk'in beyinlerinde ziller çalmasına neden oldu -bunlar, sicim kuramı tarafından öngörülen utangaç parçacığın özellikleriydi- ve onları cesur bir adım atmaya yönlendirdi. Bu adım sicim kuramının başarısızlığını çarpıcı bir başarıya dönüştürecekti.

Schwarz ve Scherk sicim kuramının güçlü nükleer kuvvetin kuantum mekaniksel kuramı olarak düşünülmemesi gerektiğini öne sürdüler. Her ne kadar kuram güçlü nükleer kuvveti anlamak için yapılan bir girişimde keşfedilmiş olsa da, aslında bu kuramın farklı bir problemin çözümü olduğunu düşünüyorlardı. O, aslında *kütleçekimi* kuvvetinin kuantum mekanikğine özgü ilk kuramı idi. Sicim kuramı tarafından varlığı öngörülen kütesiz, iki spinli parçacığın graviton olduğunu ve sicim kuramının denklemlerinin zorunlu olarak kütleçekiminin kuantum mekanikğine özgü betimlemesini içinde barındırdığını ileri sürdüler.

Schwarz ve Scherk, önerilerini 1974'te yayımladılar ve fizik dünyasından büyük bir tepki beklediler. Ama çalışmaları gözardı edildi. Şimdi geriye bakıldığında bunun nedenini anlamak zor değil. Bazılarına sicim kavramı uygulama arayışında olan bir kuram haline geliyor gibi görünmüştü. Sicim kuramının güçlü nükleer kuvveti açıklama girişiminin başarısız olmasından sonra, sanki kuramın taraftarları yenilgiyi kabul etmiyormuş da, bunun yerine kurama başka bir yerde uygulama bulmaya çalışıyorlarmış gibiydi. Graviton adaylarının ilettiği kuvvetin kütleçekiminin bilinen kuvvetine eşit olması için Schwarz ve Scherk'in kuramlarındaki sicimlerin boyunu kökten bir biçimde değiştirmek zorunda oldukları açığa çıkınca, bu bakış açısına sahip olanların ekmeğine yağ sürülmüş oldu. Kütleçekiminin son derece zayıf bir kuvvet olması* ve sicim uzadıkça ilettiği kuvvetin de *artacağı* ortaya çıkmış olması nedeniyle, Schwarz ve Scherk sicimlerin kütleçekiminin son derece zayıf olan kuvvetini iletmek için çok küçük olmaları gerektiğini bulmuşlardı. Önceden düşünüldüklerinden yüz milyar kere milyar kere daha küçük, yaklaşık Planck uzunluğu boyutlarında olmalıydılar. Kuşkucuların yüzlerini ekşiterek yazdığı gibi sicimler o kadar küçüktü ki, on-

* Hatırlarsanız, Bölüm 9'da belirtildiği gibi, çok küçük bir mıknatıs bile bir toplu iğneyi çekerken bütün yerkürenin kütleçekimi kuvvetini yenmektedir. Sayısal olarak kütleçekimi kuvvetinin, elektromanyetik kuvvetin yaklaşık 10^{-42} de biri olduğunu söyleyebiliriz.

ları görebilecek herhangi bir araç yoktu, bu da kuramın deneysel olarak doğrulanamayacağı anlamına geliyordu.¹⁰

Tersine, 1970'ler parçacıklar ve alanlarla tanımlanan sicim dışı, daha sıradan kuramların birbiri ardı sıra gelen başarılarına tanıklık etti. Kuramcıların ve deneycilerin kafaları ve elleri benzer şekilde araştırılmayı bekleyen sağlam fikirlerle ve sınanmayı bekleyen hesaplarla doluydu. Denenmiş ve doğruluğu görülmüş bir yapı içinde yapılabilecek bunca heyecan verici iş varken doğruluğu kuşkuyla sicim kuramıyla uğraşmanın gereği neydi? Aynı düşünce tarzıyla, her ne kadar fizikçilerin zihinlerinin bir yanı genel görelilikle kuantum mekaniğinin bilindik yöntemlerle birleştirilmesinin hâlâ mümkün olmadığı konusu ile meşgul ise de, bu fazla dikkate değer bir sorun değildi. Hemen hemen herkes bunun önemli bir konu olduğunu ve bir gün eninde sonunda bu konuyla uğraşılması gerekeceğini kabul ediyordu ama hâlâ kütleçekimi dışındaki kuvvetlerle yapılacak çok iş olduğu için, kütleçekiminin kuantumlaştırılması iyice geri plana itilmişti. Sonuçta, 1970'lerin ortaları ile sonu arasında sicim kuramı tamamlanmış bir kuram olmaktan uzaktı. Graviton için bir aday olması bir başarıydı ama pek çok kavramsal ve teknik sorun henüz ele alınmamıştı. Kuramın bu sorunların birinin veya daha fazlasının üstesinden gelebilmesi pek akla yakın görünmüyordu, bu nedenle sicim kuramıyla uğraşmak bazı ciddi riskleri göze almak anlamına geliyordu. Birkaç yıl içinde kuram ölmüş olabilirdi.

Schwarz azimli duruşunu kaybetmedi. Ona göre kütleçekimini kuantum mekaniğinin diliyle betimleyen ilk mantıklı yaklaşım olan sicim kuramının keşfi önemli bir atılımdı. Eğer kimse bunu dinlemek istemiyor idiyse, tamam. Çalışmaya ve kuramı geliştirmeye devam edecekti, böylece insanlar dinlemeye ve dikkatlerini vermeye hazır olduğunda sicim kuramı önemli bir yol kat etmiş olacaktı. Schwarz'ın bu kararlılığının güçlü bir önseziden kaynaklandığı ortaya çıktı.

1970'lerin sonu ve 1980'lerin başında Schwarz, o zamanlar Londra'daki Queen Mary College'de çalışmakta olan Michael Green'le bir ekip oluşturdu ve sicim kuramının karşısındaki bazı

teknik engeller üzerinde çalışmaya başladı. Bunlar arasında önde gelenlerden biri *kuraldışılıklar (anomaliler)* problemiydi. Ayrıntılar önemli olmamakla birlikte kuraldışılıklar, örneğin enerjinin korunumu gibi çok önemli bazı ilkeleri ihlal ederek bir kuramın yıkılmasına zemin hazırlayabilecek olan kuantum mekaniğine özgü etkilerdir. Uygulanabilir olmak için bir kuramın bütün kuraldışılıklardan arınmış olması gerekir. On araştırmalar sicim kuramının bazı kuraldışılıklar barındırdığını ortaya koymuştu, bu durum kuramın fazla heyecan yaratmakta başarısız olmasının temel teknik nedenlerinden biriydi. Her ne kadar sicim kuramı bir kuantum kütleçekimi kuramı ortaya koyuyor gibi görünüyorsa da, kuraldışılıkların varlığı, yakından bakıldığında kuramın kendi matematiksel tutarsızlıkları nedeniyle sıkıntıda olduğunu gösteriyordu.

Bununla birlikte Schwarz durumun tam açık olmadığının farkındaydı. Tam bir hesaplamanın, sicim kuramını kötü etkileyen kuraldışılıklara olan çeşitli katkıların, doğru şekilde bir çıraya getirildiğinde, birbirlerini yok edeceğini gösterme olasılığı -zayıf da olsa- vardı. Green'le birlikte Schwarz bu kuraldışılıkları hesaplamak üzere sıkı bir şekilde çalışmaya başladı ve 1984 yazında bu ikili çabalarının karşılığını aldı. Fırtınalı bir gecede Colorado'daki Aspen Fizik Merkezi'nde çalışırken alanın en önemli hesaplarından birini, bütün potansiyel kuraldışılıkların neredeyse mucizevî bir şekilde birbirlerini *yok ettiğini* kanıtlayan hesabı tamamladılar. Sicim kuramının bütün kuraldışılıklardan kurtulduğunu ve bu nedenle hiçbir matematiksel tutarsızlığı olmadığını ortaya çıkarmışlardı. Schwarz ve Green, sicim kuramının kuantum mekaniğine özgü bir biçimde uygulanabilir olduğunu inandırıcı bir şekilde ortaya koymuşlardı.

Bu kez fizikçiler dinledi. 1980'lerin ortasıydı ve fizikte ildim gözle görülür şekilde değişmişti. Kütleçekimsel olmayan üç kuvvetin pek çok temel özelliği kuramsal olarak ortaya konmuş ve deneysel olarak doğrulanmıştı. Her ne kadar bazı önemli ayrıntılar çözümlenmemiş olsa da -bazıları hâlâ çözümlenmemiştir- fizikçiler topluluğu artık diğer önemli problemi ele almaya ha-

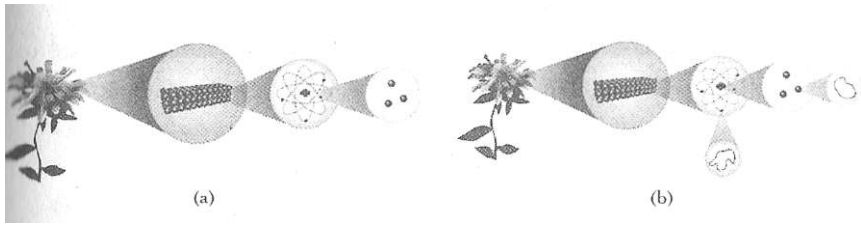
zırdı: Genel görelilikle kuantum mekaniğinin birleştirilmesi. Bu sırada fiziğin az bilinen bir köşesinden Green ve Schwarz, bu noktadan sonra nasıl ilerlenmesi gerektiği yolunda kesin, matematiksel olarak tutarlı ve estetik olarak hoş a giden bir öneriyle sahneye çıktılar. Neredeyse bir gece içinde sicim kuramı üzerinde çalışan araştırmacıların sayısı ikiden binlere yükseldi, ilk sicim devrimi yola çıkmıştı.

İlk Devrim

1984'ün sonbaharında Oxford Üniversitesi nde yüksek lisans öğrenimine başladım. Birkaç ay içinde koridorlar fizikte bir devrime ilişkin fısıltılı konuşmalarla dolup taşmaya başlamıştı. Henüz İnternet yaygın olarak kullanılmadığı için, bilginin hızla yayılmasının en önemli yolu söylentiydi ve her gün yeni atılımların haberleri geliyordu. Araştırmacılar atmosferin kuantum mekaniğinin ilk günlerindeki havaya benzediğı yorumlarını yapıyorlardı ve kuramsal fiziğın artık sonuna yaklaşıldığı ciddi bir biçimde konuşmaya başlanmıştı.

Sicim kuramı hemen herkes için yeniydi ve ilk günlerde ayrıntılar herkesçe bilinmiyordu. Biz Oxford'da özel olarak şanslıydık: Michael Green yakın bir zamanda sicim kuramı hakkında konuşmak üzere gelmişti, o yüzden çoğumuz kuramın temel fikirleri ve iddiaları konusunda fikir sahibi olmuştuk. Bunlar etkileyici iddialardı. Kısaca, kuram şunu söylüyordu:

Bir madde parçası alın -bir buz küpü, bir kaya parçası, demir bir levha- ve bunu ikiye böldüğünüzü varsayın, sonra parçalarından birini yine ikiye böldüğünüzü, tekrar tekrar ikiye bölme işini sürdürdüğünüzü varsayın. 2500 yıl kadar önce eski Yunanlılar böylesi bir bölme sürecinin en sonunda ortaya çıkacak olan en küçük, kesilemez ve bölünemez bileşeni belirleme problemiyle uğraşmışlardı. Çağımızda bu yolla er ya da geç atomlara ulaşacağımızı öğrendik, ama atomlar eski Yunanlıların sorusunun cevabı değildir çünkü atomlar da daha küçük parçalara bölünebilir. Atomlar parçalanabilir. Atomların, kendilerinin de proton ve nötron adı verilen daha küçük parçacıklardan oluşan, mer-



kezdaki çekirdeklerin çevresinde dolanan bir elektron bulutlarından oluştuğunu öğrendik. 1960'ların sonunda Stanlord Doğrusal Hızlandırıcısı'nda yapılan deneyler, nötron ve protonların da üç temel bileşenden oluştuğunu ortaya koydu: Her proton ve her nötron, Bölüm 9'da söz edildiği ve Şekil 12.3a'da gösterildiği gibi, kuark adı verilen üç parçacıktan oluşur.

Önemli deneylerle desteklenen klasik kuram elektronları ve kuarkları uzaysal boyutları olmayan noktalar olarak ele alır; bu nedenle, bu bakış açısına göre, bunlar yolun sonunu -maddenin mikroskobik yapılanmasındaki matruşka bebeklerin sonuncusunu- işaret ederler.

İşte sicim kuramının iark yarattığı yer burasıdır. Sicim kuramı, elektron ve kuarkların sıfır-boyutlu parçacıklar *olmadığını* öne sürerek klasik bakış açısına meydan okur. Sicim kuramına göre, klasik nokta-parçacık modeli sadece bir yaklaşıttır. Her parçacık, aslında Şekil 12.3b'de görüldüğü gibi, *sicim* adı verilen, minik ve titretilen bir enerji iplikçidir. Bu titreşen enerji iplikçiklerinin kalınlıkları olmadığı, yalnızca uzunlukları olduğu için tek-boyutlu varlıklar olarak kabul edilirler. Ama sicimler çok küçük, tek bir atom çekirdeğinden yüz milyon kere milyon kat (10^{-33} cm) küçük olduğundan, en gelişmiş atom çarpıştırıcılarında incelendikleri zaman bile nokta olarak görünürler.

Sicim kuramı konusundaki kavrayışımız tam olmaktan uzak olduğu için, öykünün burada bitip bitmediğini -eğer kuram doğruysa, sicimlerin gerçekten son matruşka bebekleri mi temsil ettiğini yoksa onların da daha küçük yapıtaşlarından mı oluştuğu-

nu- hiç kimse tam olarak bilmiyor. Bu konuya yeniden döneceğiz ama şimdilik konunun tarihsel gelişimini izleyelim ve sicimlerin gerçekten son nokta olduğunu; sicimlerin evrendeki *en* temel yapıtaşları olduğunu varsayalım.

Sicim Kuramı ve Birleştirme

Sicim kuramı kısaca budur, ama bu yeni yaklaşımın gücünü aktarabilmek için, klasik parçacık fizikini biraz daha fazla anlatmam gerekiyor. Geçtiğimiz yüz yıl boyunca, fizikçiler evrenin temel yapıtaşlarını ararken maddeyi sıkıştırdılar, tartakladılar ve toz haline getirdiler. Aslında, herkesin karşılaştığı her şeyin temel yapıtaşlarının biraz önce sözü edilen elektronlar ve kuarklar -daha doğrusu, Bölüm 9'da olduğu gibi, elektronlarla birlikte kütle ve elektrik yükü olarak birbirlerinden farklı olan yukarı-kuarklar ve aşağı-kuarklar adı verilen iki çeşit kuark- olduğunu buldular. Ama deneyler evrenin, sıradan maddede görünmeyen, daha egzotik, başka parçacıkları da barındırdığını ortaya koydu. Yukarı-kuark ve aşağı-kuarklara ek olarak deneyçiler dört kuark türü daha (*caziibe-kuarkı, acayip-kuark, alt kuark ve üst kuark*) ve elektrona benzeyen ama ondan daha ağır olan iki parçacık türü daha (*müonlar ve taular*) buldular. Bu parçacıklar büyük olasılıkla Büyük Patlama'nın hemen sonrasında çok bol miktarda bulunuyorlardı ama günümüzde yalnızca daha bilindik parçacık türleri arasındaki yüksek enerjili çarpışmalar sırasında ortaya çıkıyorlar. Son olarak, deneyçiler *nötrino* adı verilen ve trilyonlarca kilometrelik kurşunun içinden bizim havanın içinden geçtiğimiz kolaylıkla geçen, hayaletimsi üç tür parçacık daha (*elektron-nötrinosu, müon-nötrinosu ve tau-nötrinosu*) ortaya çıkardılar. Bu parçacıklar -elektron ve ondan daha ağır olan iki kuzeni, altı tür kuark ve üç tür nötrino- eski Yunanlıların maddenin yapısı konusundaki sorusuna günümüz parçacık fizikçilerinin cevabıdır."

Bu parçacık türleri Tablo 12.1'de görüldüğü gibi, üç parçacık "ailesi" veya "kuşağı" şeklinde düzenlenebilir. Her ailede kuarklardan ikisi ve nötrinolardan biri ile birlikte bir tane de elektron-

benzeri parçacık yer alır; her ailedeki birbirlerine karşılık gelen parçacıklar arasındaki tek fark, her ailede kütlelerin giderek artmasıdır. Ailelere bölme işi doğal olarak bir temel desen gerektirir ama bu parçacık yağmuru kolaylıkla başınızı döndürebilir (veya daha kötüsü, gözlerinizi kamaştırabilir). Ama biraz dayanın, sicim kuramının en güzel özelliklerinden biri, görünürdeki bu karmaşıklığı düzene sokmak için bir yöntem sağlamasıdır.

Sicim kuramına göre, yalnızca *bir* temel yapıtaşı vardır -sicim- ve farklı parçacık türlerinin çokluğu, sicimin gösterebileceği farklı titrenim desenlerini simgeler. Bu tıpkı bir keman telinde olup bitenlere benzer. Bir keman teli çok farklı şekillerde titrenebilir ve biz her deseni farklı bir müzik notası olarak algılarız. Böylece bir keman teli bir dizi farklı ses üretebilir. Sicim kuramındaki sicimler de buna benzer şekilde davranırlar: Onlar da farklı desenlerde titrenebilirler. Ama farklı müzik notaları yerine, *sicim kuramındaki farklı titrenim desenleri, farklı parçacık türlerine karşılık gelir*. Buradaki kilit anlayış, sicimin ayrıntılı titrenim desenlerinden her birinin, bir parçacık türünü diğerinden ayıran bir dizi özellik -özel bir kütle, özel bir elektrik yükü, özel bir spin vb.- üretmesidir. Özel bir şekilde titrenen bir sicim, elektronun özelliklerine sahip olabilir, farklı bir şekilde titrenen bir sicimse bir yukarı-kuarkın, bir aşağı-kuarkın veya Tablo 12.1'de yer alan herhangi bir parçacığın özelliklerini ser-

Aile 1		Aile 2		Aile 3	
Parçacık	Kütle	Parçacık	Kütle	Parçacık	Kütle
Elektron	.00054	Müon	,11	Tau	1,9
Elektroin-Nötrinosu	$<10^9$	Müon-Nötrinosu	$<10^4$	Tau-Nötrinosu	$<10^3$
Yukarı-kuark	,0047	Cazibe-kuarkı	1,6	Üst-kuark	189
Aşağı-kuark	,0074	Acayip-kuark	,16	Alt-kuark	5,2

Tablo 12.1 Üç temel parçacık ailesi ve bunların kütleleri (proton kütlelerinin katı olarak). Nötrino kütlelerinin kütlelerinin sıfırdan farklı olduğu bilinmekle birlikte, tam değerleri deneysel olarak henüz belirlenememiştir.

gileyebilir. Yani elektronu "elektron sicimi" veya yukarı-kuarkı bir "yukarı-kuark sicimi" veya aşağı-kuarkı bir "aşağı-kuark sicimi" oluşturmaz. *Tek* bir sicim türü, çok farklı titreşim desenleri sergileyerek çok farklı parçacık türleri oluşturabilir.

Görebileceğiniz gibi bu, potansiyel birleştirmeye doğru atılmış dev bir adımı temsil eder. Eğer sicim kuramı doğru ise, Tablo 12.1 'deki baş döndürücü, göz kamaştırıcı parçacık listesi, kendini tek bir temel yapıtaşının farklı titreşimsel repertuarı olarak gösterir. Benzetme olarak, tek bir tel türüyle çalınabilecek olan farklı notalar, saptanmış olan bütün farklı parçacık türlerine karşılık gelecektir. Mikroskobik-ötesi düzeyde evren, titreşimleriyle maddeyi varlık düzeyine taşıyan bir yaylı çalgılar senfonisine benzer.

Bu, Tablo 12.1 'deki parçacıkları açıklayan hoş ve zarif bir yapıdır ama sicim kuramının birleştirme önerileri daha da ötelere gider. Bölüm 9'da ve yukarıdaki tartışmamızda doğadaki kuvvetlerin kuantum düzeyindeki diğer parçacıklarla yani haberci parçacıklarla nasıl iletildiğini incelemiştik. Bu iletişimi Tablo 12.2'de özetledik. Sicim kuramı haberci parçacıkları da madde parçacıklarını açıkladığı şekilde açıklar. Yani, her haberci parçacık da özel bir titreşim deseni sergileyen bir sicimdir. Bir foton, özel bir desen sergileyerek titrenen bir sicimdir, bir W parçacığı farklı bir desende titrenen bir sicimdir, bir gluonsa bir başka desende titrenen bir sicimdir. En önemlisi de, Schwarz ve Scherk'in 1974'te gösterdiği şeyin, gravitonun bütün özellik-

Kuvvet	Kuvvet parçacığı	Kütle
Güçlü	Gluon	0
Elektromanyetik	Foton	0
Zayıf	W, Z	86, 97
Kütleçekimi	Graviton	0

Tablo 12.2 Doğadaki dört kuvvet, ilgili kuvvet parçacıkları ve protonun külesinin katları olarak kütleleri. (Aslında birinin elektrik yükü +1, diğerininki -1 olan ve aynı kütleyle sahip olan iki W parçacığı vardır; basit olsun diye bu ayrıntıyı gözardı ettik ve her birine W parçacığı adını verdik).

lerini gösteren bir titreşim deseni olduğu, bu nedenle de kütleçekimi kuvvetinin, sicim kuramının kuantum mekaniksel yapısı içinde yer aldığıdır. Böylece titreşen sicimlerden yalnızca madde parçacıkları ortaya çıkmakla kalmaz, haberci parçacıklar da -hatta kütleçekiminin haberci parçacığı da- ortaya çıkar.

Ve böylece, kütleçekimi ve kuantum mekaniğini birleştirmeye yönelik ilk başarılı yaklaşımı sağlamasının ötesinde sicim kuramı, bütün maddenin ve bütün kuvvetlerin birleşik tanımını yapma kapasitesini de ortaya koydu. 1980'lerin ortasında binlerce fizikçi neredeyse şaşkınlıktan sandalyelerinden düşüren, bu iddiadır; ayağa kalkıp üst-başlarındaki tozu silkelediklerinde birçoğunun görüşü değişmişti.

Sicim Kuramı Neden İşler?

Sicim kuramının geliştirilmesinden önce, bilimsel ilerlemenin yolu kütleçekimi ile kuantum mekaniğini birleştirmeyi amaçlayan başarısız girişimlerle doluydu. Acaba sicim kuramının bu kadar ilerlemesinin nedeni nedir? Schwarz ve Scherk'in nasıl kendileri de şaşırarak özel bir sicim titreşim deseninin graviton parçacığını temsil edecek, doğru özelliklere sahip olduğunu fark ettiklerini, buradan sicim kuramının onlara iki kuramı birleştirmek için hazır bir yapı sağladığı sonucuna ulaştıklarını anlatmıştık. Tarihsel olarak, gerçekten sicim kuramının gücünün ve vaatlerinin somutlaşması böyle olmuştur ama bütün diğer girişimler başarısızlığa uğramışken sicim yaklaşımının neden başarılı olduğuna ilişkin açıklamamızda bir şeyler eksik kalır. Şekil 12.2 genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki çatışmayı özetliyor -ultra kısa uzaklık (ve zaman) ölçeklerinde kuantum belirsizliğinin çığırnlığı o kadar şiddetlenir ki, genel göreliliğin altındaki yatan, uzay-zamanın pürüzsüz geometrik modeli tahrip olur- o zaman soru şudur: Sicim kuramı bu problemi nasıl çözüyor? Sicim kuramı uzay-zamanın mikroskobik ötesi uzaklıklardaki çığır salınımlarını nasıl yatıştırıyor?

Sicim kuramının esas yeni özelliği, temel bileşenin nokta parçacık -boyutsuz bir nokta- olmayıp, uzayda bir boyutu olan

bir nesne olmasıdır. Bu fark, kütleçekimi ile kuantum mekaniğinin birleştirilmesinde kilit rol oynar.

Şekil 12.2'de gösterilen çılgın salınımlar belirsizlik ilkesinin kütleçekimi alanına uygulanması nedeniyle ortaya çıkar; git gide daha küçük ölçeklerde belirsizlik ilkesi kütleçekimi alanında giderek büyüyen salınımlar ortaya çıkacağını söyler. Nasıl moleküler düzeyde suyu H_2O molekülleriyle gösteriyorsak, bu son derece küçük uzaklık ölçeklerinde de kütleçekimi alanını temel bileşenleriyle, gravitonlarla ifade etmemiz gerekir. Bu ifade biçiminde kütleçekimi alanının çılgın salınımları, bir hortum fırtınasında oraya-buraya savrulan tozlar gibi, büyük miktarlarda gravitonun oraya-buraya salınımları olarak düşünülebilir. Şimdi, eğer gravitonlar (genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirmekte başarısız olan eski girişimlerde düşünüldüğü gibi) nokta parçacıklar iseler, o zaman Şekil 12.2 bu parçacıkların toplu davranışını yansıtır: Uzaklıklar küçüldükçe çalkantı artar. Ama sicim kuramı bu sonucu değiştiriyor.

Sicim kuramında her graviton nokta değil, yaklaşık Planck uzunluğu boyutunda, (10^{-33} cm) titrenen bir sicimdir. Gravitonlar kütleçekimi alanının en temel, en küçük bileşenleri olduklarından, kütleçekimi alanlarının Planck uzunluğunun altındaki ölçeklerdeki davranışları üzerinde konuşmak anlamsızdır.¹² Nasıl televizyonunuzun ekranının çözünürlüğü tek tek piksellerin boyutlarıyla sınırlıysa, sicim kuramında kütleçekimi alanının çözünürlüğü de gravitonların boyutlarıyla sınırlıdır. Bu yüzden, sicim kuramında gravitonların (ve her şeyin) sıfırdan farklı boyutları kütleçekimi alanının çözünürlüğüne kabaca Planck ölçeğinde bir sınır getirir.

Bu, çok önemli bir kavrayıştır. Şekil 12.2'de gösterilen, kontrol edilemeyen kuantum titrenimleri, ancak çok kısa -Planck uzunluğundan daha kısa- uzunluk ölçeklerini göz önüne aldığımız zaman ortaya çıkar. Sıfır-boyutlu, nokta parçacıklara dayanan bir kuramda belirsizlik ilkesinin böyle bir uygulamasının varlığı keşindir ve Şekil 12.2'de görüldüğü gibi bu, bizi Einstein'ın genel göreliliğinin erişiminin ötesindeki vahşi bölgelere götürür. Ama

sicimleri temel alan bir kuram, yapısal bir hata-bağışıklığa sahiptir. Sicim kuramında sicimler en küçük bileşenlerdir, bu *yüzden* mikroskobik ötesine olan yolculuğumuz, Planck uzunluğuna -ki bu sicimlerin uzunluğudur- ulaştığımız zaman son bulur. Şekil 12.2'de Planck ölçeği en yüksek ikinci düzeyle temsil edilmektedir; görebileceğiniz gibi, kütleçekimi alanı hâlâ kuantum titrenimlerine maruz kalacağından, böyle ölçeklerde uzayın dokusunda hâlâ salınımlar vardır. Ama bu titrenimler genel görelilikle onarılamaz çatışmalar yol açmayacak ölçüde ılımlıdır. Genel göreliliğin matematiği, bu kuantum salınımlarını da kapsayacak şekilde değiştirilmelidir. Bunun, matematik hâlâ anlamlı kalacak şekilde yapılması olasıdır.

Böylece, sicim kuramı ne kadar küçüğe doğru gideceğimizi sınırlayarak, kütleçekimi alanının titrenimlerinin şiddetini de sınırlar ve bu sınır, kuantum mekaniği ile genel görelilik arasında büyük bir çatışmadan kaçınacak kadar büyüktür. Sicim kuramı bu yolla iki yapı arasındaki düşmanlığın önüne geçer ve ilk kez bu iki yapının birleşmesinin önünü açar.

Küçüğün Dünyasında Kozmik Doku

Bunun, daha genel olarak, uzay-zamanın mikroskobik-ötesi doğası için anlamı nedir? Önce, uzayın ve zamanın dokusunun sürekli olduğu kavramına -iki nokta arasındaki uzaklığın veya iki an arasında geçen sürenin tekrar tekrar ikiye bölünebileceği, böylece de uzayın ve zamanın sonsuza kadar daha küçük bölümlere ayrılabilmesi kavramına- güçlü bir şekilde meydan okur. Planck uzunluğuna (sicimin uzunluğu) ve Planck zamanına (ışığın sicimin uzunluğunu kat etmesi için gereken süre) ulaştığınızda, eğer hâlâ uzayı ve zamanı daha küçük parçalara bölmeye çalışırsanız, bunu yapamayacağınızı fark edersiniz. Evrenin *en küçük* bileşenine ulaştığınızda, "daha küçültmek" kavramı anlamını kaybeder. Bu, sıfır-boyutlu nokta parçacıklar için bir sınırlama getirmez, ama sicimlerin boyutu olduğu için bir sınırlama getirir. Eğer sicim kuramı doğruysa, günlük yaşantımızın tamamının içinde yer aldığı olağan uzay ve zaman kavramlarının oluş-

turduğu yapı, en basitinden, Planck ölçeğinden -sicimlerin ölçeği- daha küçük ölçeklerde uygulanamaz.

Bunların yerini hangi kavramların aldığına gelince, bu konuda henüz bir fikir birliği yok. Sicim kuramının kuantum mekaniği ile genel göreliliği nasıl birleştirdiği konusunda yukarıdaki açıklamalara uyan bir olasılık şudur: Planck ölçeğinde uzayın dokusu bir ızgaraya benzetilebilir ama ızgaranın çizgileri "arasındaki" uzay fiziksel gerçekliğin sınırları dışında kalır. Nasıl basit bir dokuma parçası üzerinde yürüyen mikroskobik bir karınca iplikten ipliğe atlamak zorunda ise, uzayda mikroskobik ötesi ölçeklerde hareket de bir uzay "iplikçiğinden" diğerine sayısal bir "atlamayı" gerektiriyor olabilir. Zaman da tek tek anların birbirine yakın olduğu ama "dikişsiz" bir sürekliliğe ulaşmadığı, tanecikli bir yapıya sahip olabilir. Böyle düşününce, giderek küçülen uzay ve zaman aralıkları Planck ölçeğinde bir sona ulaşacaktır. Tıpkı kuruştan küçük bir para ölçü birimi olmaması gibi, eğer mikroskobik ötesi uzay-zaman bir ızgara yapıya sahipse, o zaman Planck uzunluğundan kısa uzaklık ve Planck zamanından kısa süre de olmaz.

Bir diğer olasılık uzay ve zamanın çok çok küçük ölçeklerde anlamını birden kaybetmemesi, yavaş yavaş diğer, çok daha temel kavramlara dönüşüyor olmasıdır. Planck ölçeğinden daha küçük boyutlara büzülmek yalnızca temel ızgaraya ulaştığımız için değil, "daha küçük yapma işi" sırasında uzay ve zaman kavramları, dokuz rakamının mutlu olup olmadığını sormak kadar anlamsız bir şeye dönüştüğü için de sınırların dışına çıkıyor olabilir. Yani, bilindik makroskobik uzay ve zamanın yavaş yavaş bilindik olmayan, mikroskobik ötesi şeylere dönüştüğünü, bu durumda -uzunluk ve süre gibi- olağan özelliklerinden çoğunun ilgisiz veya anlamsız olduğunu düşünebiliriz. Nasıl sıvı suyun sıcaklığını veya akışkanlığını -bu kavramlar sıvının makroskobik özelliklerine uygulanabilir- anlamlı olarak inceleyebileceğiniz halde H_2O molekülleri düzeyine indiğinizde bu kavramlar anlamını kaybediyorsa, belki de uzay bölgelerini ve zaman sürelerini gündelik ölçeklerde ikiye bölebildiğimiz halde, Planck öl-

çeğine ulaştığımızda böylesi bir bölme işi anlamını kaybediyor olabilir.

Benim de aralarında olduğum pek çok sicim kuramcısı, bu anlamda bir şeylerin gerçekten olduğundan kuvvetli bir biçimde kuşkulanyor olsak da, daha ileriye gidebilmek için uzay ve zamanın dönüştüğü daha temel kavramların ne olduğunu bulmamız gerekiyor.* Şimdiye kadar bu, cevapsız kalmış bir soruydu ama ileri düzeydeki araştırmalar (son bölümde anlatılacak), geniş anlamları olan bazı olasılıkları ileri sürmektedir.

Daha ince Noktalar

Şimdiye kadar verdiğim tanımla, herhangi bir fizikçinin sicim kuramının çekiciliğine direnmesi şaşırtıcı görünebilir. İşte, sonunda Einstein'ın rüyasını ve daha fazlasını gerçekleştirmeyi vadeden bir kuram; kuantum mekaniği ile genel görelilik arasındaki düşmanlığı giderebilecek olan bir kuram; her şeyi titrenen sicimlerle betimleyerek bütün maddeyi ve bütün kuvvetleri birleştirmekapasitesine sahip olan bir kuram; bilindik uzay ve zaman kavramlarının çevirmeli telefonlar kadar modası geçmiş kaldığı mikroskobik-ötesi bir gerçeklik ileri süren bir kuram; kısacası, evren hakkındaki kavrayışımızı yepyeni bir düzeye taşıma sözü veren bir kuram ortaya atılmıştı. Ama unutmayın ki, şimdiye kadar hiç kimse sicimi görmedi ve gelecek bölümde anlatılacak olan bazı bağımsız fikirler dışında, kuram doğru olsa bile, hiç kimse bir sicim görmeyecek. Sicimler o kadar küçüktür ki, doğrudan gözlenmeleri, bu sayfadaki yazıların yüz ışıık-yılı uzaktan okunmasına eşdeğerdir: Bu gözlem, çağdaş teknolojinin sağladığı çözünürlük gücünün neredeyse milyar kere milyar katını gerektirir. Bazı bilim insanları, bağıra çağıra böylesi doğrudan sınınamadan uzak bir kuramın fiziğin değil felsefenin veya teolojinin alanına girdiğini ileri sürüyorlar.

* Genel görelilik ve kuantum mekaniğini birleştirme amacı güden bir başka yaklaşım olan ve Bölüm 16'da kısaca söz edilen *halka kuantum kütleçekimi* kuramı taraftarlarının, önceki tahminlere daha yakın bir bakış açısı olan, uzay-zamanın en küçük ölçeklerde kesikli olduğu yaklaşımını benimsediğini ekleyebilirim.

Bu bakış açısını dar görüşlü veya en azından vakitsiz buluyorum. Sicimleri doğrudan görebilecek teknolojiye hiçbir zaman sahip olmasak bile, bilim tarihi deneysel olarak dolaylı yollardan sınanmış olan kuramlarla doludur.¹³ Sicim kuramı mütevazı değildir. Hedefleri ve vaatleri büyüktür. Bu da hem heyecan verici, hem de yararlıdır çünkü eğer bir kuram, bizim evrenimizin kuramı olma iddiasında ise, gerçek dünyayı yalnızca şimdiye kadar anlatıldığı gibi genel düzeyde açıklaması yetmez, en küçük ayrıntıları da açıklayabilmelidir. Şimdi söz edeceğimiz gibi, bu konuda bazı potansiyel testler var.

1960'larda ve 1970'lerde parçacık fizikçileri maddenin kuantum yapısını ve davranışlarına yön veren, kütleçekimsel olmayan kuvvetleri anlamak yolunda dev adımlar attılar. Sonunda, deneysel sonuçların ve kuramsal fikirlerin onları yönlendirdiği yapı, parçacık fiziğinin *standart modeli* olup, kuantum mekaniğine, Tablo 12.1'deki madde parçacıklarına ve Tablo 12.2'deki kuvvet parçacıklarına dayanır ki bunların hepsi de nokta-parçacıklardır (standart model kütleçekimini kapsamadığından gravitonu gözardı ediyoruz, tablolarda yer almayan Higgs parçacığını kapsıyoruz). Standart model esas olarak dünyadaki atom çarpıştırıcılarında ortaya çıkan bütün verileri açıklayabiliyor ve yıllar boyunca bu kuramı ortaya koyanlar haklı olarak en büyük övgüleri aldılar. Bu durumda bile standart modelin oldukça çok sayıda sınırlılıkları var. Standart kuramın ve sicim kuramından önce gelen diğer kuramların kütleçekimi ve kuantum mekaniğini birleştirmekte nasıl başarısız olduklarını zaten inceledik. Ama bunun yanı sıra başka eksiklikler de var.

Standart model, kuvvetlerin *neden* tam listesi Tablo 12.2'de görülen parçacıklar tarafından iletildiğini ve maddenin *neden* tam listesi Tablo 12.1'de görülen parçacıklar tarafından oluşturulduğunu açıklayamadı. Neden üç madde parçacığı ailesi var ve bu parçacıklar neden bu ailelere ait? Neden iki ya da yalnızca bir aile yok? Elektronun elektrik yükü neden bir aşağı-kuarkın elektrik yükünün tam üç katı? Neden bir müonun kütlesi bir yukarı-kuarkın kütlesinin 23,4 katı ve neden bir üst-kuarkın küt-

lesi bir elektronunkinin yaklaşık 350.000 katı? Evren neden görünüşe göre rastgele olan bu sayılarla oluşuyor? Standart model Tablo 12.1 ve 12.2'deki parçacıkları (gravitonu dışarıda tutarak) *veri* kabul eder ve bu parçacıkların birbirleriyle nasıl etkileşecekleri konusunda kesin öngörülerde bulunur. Ama nasıl hesap makinemiz, sizin son girdiğiniz rakamları açıklayamazsa, standart model de girdileri -parçacıkları ve özelliklerini- açıklayamaz.

Bu parçacıkların özellikleri konusunda merak duymak, şu veya bu ayrıntının neden öyle değil de böyle olduğuna ilişkin akademik bir sorun değildir. Geçen yüzyılda bilim insanları, evrenin bildiğimiz özelliklere sahip olmasının yalnızca Tablo 12.1 ve 12.2'deki parçacıkların o özelliklere sahip olmalarından kaynaklandığını fark ettiler. Örneğin bazı parçacıkların kütlelerinde veya elektrik yüklerinde ortaya çıkabilecek küçük değişiklikler onların yıldızların parlamasını sağlayan nükleer reaksiyonlara girememeleriyle sonuçlanabilirdi. Yıldızların olmadığı bir evren de bambaşka bir evren olurdu. Bu yüzden, temel parçacıkların ayrıntılı özellikleri, birçoklarının tüm bilimdeki en derin soru gözüyle baktıkları şu soruyla iç içe geçmiştir: *Temel parçacıkların, nükleer reaksiyonlara girmelerini, yıldızların parlamalarını, yıldızların çevresinde gezegenlerin oluşmasını ve bu gezegenlerin en azından birinde yaşamın ortaya çıkmasını sağlayacak, doğru özelliklere sahip olmalarının nedeni nedir?*

Parçacık özellikleri gerekli girdinin bir parçası olduğu için, standart model bu soruya herhangi bir cevap veremez. Parçacık özellikleri belirlenmeden önce kuram yola çıkıp bir sonuca ulaşamaz. Ama sicim kuramı farklıdır. Sicim kuramında parçacık özellikleri sicimlerin titreşim desenleri tarafından *belirlenir* ve bu nedenle de bir açıklama getirme iddiasındadır.

Sicim Kuramında Parçacık Özellikleri

Sicim kuramının yeni açıklayıcı yapısını anlamak için, sicim titreşimlerinin parçacık özelliklerini nasıl ürettiği konusunu daha iyi kavramış olmamız gerekir, bu nedenle bir parçacığın en basit özelliğini, kütlelerini ele alalım.

$E = mc^2$ den kütle ve enerjinin birbirine dönüşebileceğini biliyoruz; tıpkı dolar ve euro gibi bunlar da değiştirilebilir geçerliktedir (ama paraların aksine, değişim oranları sabit olup ışık hızı, c^2 tarafından belirlenir). Yaşamımız Einstein'ın denklemine dayanır çünkü Güneş'in yaşam veren ısı ve ışığı, her saniye 4.3 milyon ton maddenin enerjiye dönüştürülmesi sonucunda üretilir; eğer günün birinde Güneş'te olagelen reaksiyonların yeryüzünde kontrollü bir şekilde oluşturulması başarılabılırsa, Einstein'ın denklemi sayesinde insanlık sınırsız bir enerji potansiyeline kavuşabilir.

Bu örneklerde kütleden enerji elde ediliyor. Ama Einstein'ın denklemi diğer yönde de -enerjiden kütle elde edilen yön- çok iyi işler. Sicim kuramı Einstein'ın denklemini işte bu yönde kullanılır. Sicim kuramında bir parçacığın *kütlesi* titrenen sicimin *enerjisinden* başka bir şey değildir. Örneğin sicim kuramının bir parçacığın neden diğerinden daha ağır olduğu konusuna getirdiği açıklama, ağır parçacığı oluşturan sicimin hafif parçacığı oluşturan sicimden daha hızlı ve daha şiddetli titrendiği şeklindedir. Daha hızlı ve daha şiddetli titrenim, daha yüksek enerji anlamına gelir, daha yüksek enerji de, Einstein'ın denklemi yoluyla, daha büyük kütle demektir. Tersine, parçacık hafifledikçe, onu oluşturan sicimin titreşimi de dahayavaş ve daha hafif hale gelir; foton ya da graviton gibi kütesiz parçacıklar, olabileceği kadar yavaş ve hafif titrenen sicimlere karşılık gelirler.*¹⁴

Bir parçacığın elektrik yükü ve spin gibi diğer özellikleri, sicimin titreniminin tanımlanması daha zor, daha karmaşık özellikleri ile ilgilidir. Kütle ile karşılaştırıldığında, bu özelliklerin matematiksel olmayan yollarla tanımlanması daha zor olmakla birlikte, ana fikir aynıdır: Titrenim desenleri bir sicimin parmak izleridir, bir parçacığı diğerinden ayırt etmek için kullandığımız bütün özellikler, o parçacığın siciminin titrenim desenleri tarafından belirlenirler.

*Higgs okyanusundan kaynaklanan kütle ile olan ilişki, bu bölümde daha ileride ele alınacaktır.

1970'lerin başlarında, sicim kuramının ilk ortaya çıkışı sırasında *-bozonik sicim kuramı-* fizikçiler kuramın öngördüğü parçacık özelliklerinin türlerini belirlemek amacıyla titrenim desenlerini çözümlmeye çalışırken beklenmedik bir güçlükle karşılaştılar. Bozonik sicim kuramında her titrenim deseni tamsayı spine sahipti: spin-0, spin-1, spin-2 vb. Bu bir sorundu, çünkü her ne kadar haberci parçacıklar bu tür spinlere sahip olsalar da, madde parçacıkları (elektron ve kuark gibi) kesirli spine (spin-^{1/2}) sahiplerdi. 1971'de Florida Üniversitesi'nden Pierre Ramond bu yetersizliği gidermek üzere kolları sıvadı; kısa sürede de bozonik sicim kuramının denklemlerinde yarı-tamsayı titrenim desenlerine izin veren değişiklikler yapmanın bir yolunu buldu.

Gerçekten de, yakından bakıldığında, Ramond'ın araştırması, Schwarz ve çalışma arkadaşı Andre Neveu'nun bulunduğu sonuçlar ve daha sonraları Ferdinando Gliozzi, Joel Scherk ve David Olive'in fikirlerinin katkılarıyla, değiştirilmiş sicim kuramındaki farklı spin değerlerine sahip olan titrenim desenleri arasında mükemmel bir denge -yeni bir simetri- olduğunu ortaya koydu. Bu araştırmacılar, yeni titrenim desenlerinin spin değerleri birbirinden yarım birim farklı çiftler halinde ortaya çıktığını buldular. Spini-1/2 olan her titrenim deseni için, spini 0 olan bir titrenim deseni daha vardı. Spini 1 olan her titrenim deseni için spini-1/2 olan bir titrenim deseni daha vardı vb. Tamsayı ve yarı-tamsayı spin değerleri arasındaki ilişkiye *süpersimetri* adı verildi ve bu sonuçlarla *süpersimetrik sicim kuramı* veya *süpersicim kuramı* doğdu. Hemen hemen on yıl sonra Schwarz ve Green, sicim kuramını tehdit eden bütün potansiyel kuraldışılıkların birbirlerini sadeleştirdiklerini gösterdiğinde, aslında süpersicim kuramının yapısı üzerinde çalışıyorlardı ve böylece, hazırladıkları makaledeki devrim 1984'te, daha uygun olarak konmuş adıyla ilk *süper-Kİcim* devrimini ateşledi. (Bundan sonra sık sık sicimler ve sicim kuramından söz edeceğiz ama bunlar kısaltmadır; söz etmeyi amaçladığımız şey, süpersicimler ve süpersicim kuramıdır.)

Bu altyapı ile artık sicim kuramının genel özelliklerin ötesine geçerek evreni ayrıntılı olarak açıklamasının ne anlama geldiği-

ni ifade edebiliriz. Sonunda şuna gelir: Sicimlerin sergileyebilecekleri titrenim desenlerinin arasında, özellikleri bilinen parçacık türleriyle örtüşen desenler bulunmalıdır. Kuramda spini-'/i olan titrenim desenleri vardır ama, Tablo 12.1 de özetlendiği gibi, bilinen madde parçacıklarıyla *tam olarak* örtüşen, $1/2$ spine sahip titrenim desenleri olmalıdır. Kuramda spini 1 olan titrenim desenleri vardır ama, Tablo 12.2'de özetlendiği gibi, bilinen haberci parçacıklarıyla *tam olarak* örtüşen titrenim desenleri olmalıdır. Son olarak, eğer deneylerde gerçekten Higgs alanlarının öngördüğü gibi, spini 0 olan parçacıklar bulunuyorsa, sicim kuramı bu parçacıkların özellikleriyle de *tam olarak* örtüşen titrenim desenlerini kapsamalıdır. Kısacası, sicim kuramının uygulanabilir olması için, titrenim desenlerinin standart modeldeki parçacıklara yer vermesi ve onları açıklaması gerekir.

İşte sicim kuramının önündeki büyük fırsat budur. Eğer sicim kuramı doğruysa, deneycilerin ölçtüğü parçacık özellikleri için bir açıklaması vardır ve bu açıklama sicimlerin sergileyebilecekleri titrenim desenlerinde bulunmalıdır. Eğer bu titrenim desenlerinin özellikleri Tablo 12.1 ve 12.2'deki parçacık özellikleriyle örtüşürse, o zaman isterse sicimin yapısını ve varlığını hiç kimse görmemiş olsun, bunun sicim kuramının doğruluğundan en çok kuşku duyanları bile ikna edeceğini düşünüyorum. Kuram ile deneysel veriler arasında böylesi bir uyumla, kendini uzun süredir aranan birleşik kuram olarak kabul ettirmesinin ötesinde sicim kuramı her şeyin neden böyle olduğu yolunda ilk temel açıklamayı da sağlamış olacaktır.

Acaba sicim kuramı bu kritik sınavda ne yapar?

Çok Fazla Titrenim

İlk bakışta sicim kuramı başarısız olur. İlk olarak, sonsuz sayıda farklı sicim titrenim deseni vardır, bu sonsuz dizinin ilk birkaç tanesi Şekil 12.4'te görülüyor. Ama Tablo 12.1 ve 12.2'de yalnızca sınırlı sayıda parçacık vardır, bu nedenle sicim kuramıyla gerçek dünya arasında dev bir uyuşmazlık varmış gibi görünür. Üstelik bu titrenim desenlerinin olası enerjilerini -dolayı-

nisine benzer bir dizi izlediğini ortaya koyuyor: Nasıl armonikler temel bir tonun ya da frekansın katları ise, kütleler de temel bir kütlenin, *Planck kütlesinin* katlarıdır. Parçacık fiziğinin standartlarıyla Planck kütlesi çok büyüktür: Protonun kütlesinin 10 milyar kere milyar (10^{19}) katı, kabaca bir toz zerreciğinin veya bir bakterinin kütlesidir. Bu nedenle sicim titreşimlerinin olası kütleleri 0 kere Planck kütlesi, 1 kere Planck kütlesi, 2 kere Planck kütlesi, 3 kere Planck kütlesi vb. şeklinde gider ve bu da 0-kütleli sicim titreşimi dışındakilerin kütlelerinin çok büyük olduğunu gösterir.¹⁵

Görebileceğiniz gibi, Tablo 12.1 ve 12.2'deki parçacıklardan kimileri gerçekten kütesizdir, ama çoğu değildir. Tablolardaki sıfırdan farklı kütlelerin Planck kütlesine olan uzaklığı, Brunei Sultanının borçlanma ihtiyacına olan uzaklığından daha fazladır. Bu nedenle, bilinen parçacık kütlelerinin, sicim kuramı tarafından ileri sürülen desenle uyuşmadığını açıkça görebiliyoruz. Bu, sicim kuramının saf dışı kaldığını mı gösterir? Öyle düşünüyor olabilirsiniz, ama öyle değil. Kütleleri bilinen parçacıkların kütlelerinden giderek uzaklaşan sonsuz sayıda titreşim desenleri listesine sahip olmak, kuramın üstesinden gelmesi gereken bir durumdur. Yıllarca süren araştırmalar, bunu yapmanın umut verici stratejilerini ortaya koymuştur.

Başlangıç olarak, bilinen parçacık türleriyle yapılan ve bize ağır parçacıkların kararsız olma eğiliminde olduğunu öğreten deneylerden söz etmeliyiz; ağır parçacıklar tipik bir biçimde çabucak bozunarak daha hafif parçacıklara ve eninde sonunda Tablo 12.1 ve 12.2'deki tanıdık türlere dönüşürler. (Örneğin üst-kuark yaklaşık 10^{-24} saniyede bozunur.) Bu tablonun "süper ağır" sicim titreşim desenleri için de geçerli olmasını bekleriz ve bu da, evrenin çok sıcak olan ilk anlarında bol miktarda üretilmiş olsalar bile, günümüzde bu parçacıklara neden çok seyrek Tasladığımızı açıklar. Sicim kuramı doğru olsa bile, süper ağır titreşim desenlerini görmek için tek şansımız, bunları parçacık hızlandırıcılarındaki yüksek enerjili çarpışmalarda üretmektir. Bununla birlikte, günümüzdeki hızlandırıcılar yalnızca proto-

ha fazla sayıda spini $1/2$ olan titrenim deseni olduğunu da gösteriyor. Üstelik spini olan titrenim desenlerinin listesinde, Tablo 12.1'deki aile yapısına benzer herhangi bir tekrara ilişkin bir iz de yok. O zaman, daha dikkatli bir inceleme sonucunda sicim titrenimlerinin hangi bilinen parçacık türleriyle denk düştüğünü görmek giderek zorlaşıyor.

Bu yüzden 1980'lerin ortalarında, sicim kuramı konusunda hem heyecan hem de kuşku duymak için de nedenler vardı. Süpersicim kuramı, inkâr edilemeyecek bir biçimde, birleştirmeye doğru atılan cesur bir adımın temsilcisiydi. Kütleçekimi ve kuantum mekaniğini birleştirme yolunda ilk tutarlı yaklaşımı sağlayarak Roger Bannister'in dört dakikalık mil için yaptığını yaptı: Görünürde olanaksız gibi görünen bir şeyi olanaklı hale getirdi. Süpersicim kuramı yirminci yüzyıl fiziğinin iki direği arasındaki engelleri yıkabileceğimizi kesin bir biçimde ortaya koydu.

Ama fizikçiler, daha ileri gitmek ve süpersicim kuramının, maddenin ve doğadaki kuvvetlerin ayrıntılı özelliklerini açıklayabildiği göstermekte güçlüklerle karşılaştılar. Bu da, kuşkuların, bütün birleştirme potansiyeline rağmen süpersicim kuramının, fiziksel evrenle ilgisi olmayan matematiksel bir yapı olduğunu ileri sürmelerine yol açtı.

Bu problemle birlikte bile, kuşkuların süpersicim kuramının eksiklikleri listesinin başında henüz söz etmediğim bir özellik vardı. Süpersicim kuramı gerçekten kütleçekimi ve kuantum mekaniğini başarıyla, daha önceki girişimleri başarısızlığa uğratan matematiksel tutarsızlıklardan temizlenmiş bir şekilde birleştirme yolunu açmıştır. Bununla birlikte, kulağa garip gelse bile, keşfedildiği ilk yılların hemen ertesinde fizikçiler süpersicim kuramının denklemlerinin, evrenin üç uzaysal boyutu olması durumunda, gerekli olan özelliklere *sahip olmadığını* buldular. Süpersicim kuramının denklemleri yalnızca eğer evren *doğru* uzaysal boyuta sahip ise veya zaman boyutu da katılırsa, *on* uzay-zaman boyutuna sahip ise matematiksel olarak tutarlıdır!

Bu kulağa gerçeküstü gibi gelen iddiayla karşılaştırıldığında, sicim titrenim desenleriyle bilinen parçacık türleri arasında

ki uyum, ikincil öneme sahip olan bir konu gibi görünüyor. Süpersicim kuramı, şimdiye kadar hiç kimsenin görmediği *altı* uzay boyutunun varlığını gerektiriyor. Bu, iyi bir şey değil; bu bir sorun.

Acaba öyle mi?

Yirminci yüzyılın ilk çeyreğinde, henüz sicim kuramının sahneye çıkmadığı dönemlerde yapılan kuramsal keşifler, fazladan boyutların sorun olmaması gerektiğini göstermişti. Yirminci yüzyılın sonlarındaki güncelleme ile fizikçiler, bu fazladan boyutların sicim kuramının titrenim desenleriyle deneycilerin keşfettiği temel parçacıklar arasındaki boşluğu doldurma kapasitesine sahip olduğunu gösterdiler.

Bu, kuramdaki en sevindirici gelişmelerden biridir; şimdi nasıl işlediğini görelim.

Daha Yüksek Boyutlardaki Birleşme

1919'da Einstein, kolayca sabit fikirli birisinin sayıklamaları olarak bir kenara atılabilecek bir makale okudu. Adı az bilinen Alman matematikçi Theodor Kaluza tarafından yazılmış olan bu makalede birkaç sayfada, o zaman bilinen kuvvetler olan kütleçekimi ve elektromanyetik kuvvetin birleştirilmesi için bir yaklaşım anlatılıyordu. Bu amaca ulaşmak için Kaluza, o zamana kadar tartışılmaz bir şekilde doğru kabul edilen ve temel alınan şeylerden öylesine kökten bir ayrılış önermişti ki, bu fikir tartışılmaya bile değmez gibi görünüyordu. Evrenin üç uzay boyutu olmadığını iddia ediyordu. Kaluza Einstein'dan ve diğer fizikçilerden, evrenin *dört* uzay boyutu olduğunu, zaman da katılırsa, toplam beş uzay-zaman boyutu olduğunu kabul etmelerini istiyordu.

Her şeyden önce, bu ne anlama geliyordu? Üç uzay boyutu olduğunu söylediğimiz zaman, üzerinde hareket edebileceğimiz, birbirinden bağımsız üç yön veya eksen olduğunu kastederiz. Bunları sola/sağa, ileri/geri ve aşağı/yukarı olarak tanımlayabiliriz; üç uzay boyutuna sahip olan bir evrende yaptığınızı herhangi bir hareket, bu üç yöndeki hareketlerin bir bileşimidir.

Buna eşdeğer şekilde, üç uzay boyutuna sahip olan bir evrende bir konumu belirlemek için tam olarak üç bilgiye ihtiyacınız vardır. Örneğin bir şehirde, akşam yemeğine çağıracağınız konukların adresi bulabilmeleri için binanın bulunduğu caddenin, sokakın adını ve dairenin binanın hangi katında olduğunu bilmeleri gerekir. Eğer konukların yemekler soğumadan gelmiş olmalarını istiyorsanız, bir bilgi daha vermelisiniz: Zaman, işte uzay-zamanın dört boyutlu olduğunu söylerken kastettiğimiz budur.

Kaluza, sola/sağa, ileri/geri ve aşağı/yukarıya ek olarak, *astında bir nedenden ötürü şimdiye kadar kimsenin görmediği daha fazla sayıda uzaysal boyut olduğunu* ileri sürüyordu. Eğer doğruysa bunun anlamı, üzerinde hareket edilebilecek, bağımsız bir yönün daha olduğu ve böylece, uzayda bir noktanın konumunu belirlemek için dört bilgiye, zamanı da belirlemek istiyorsak beş bilgiye ihtiyacımız olduğuydu.

Tamam, Einstein'ın 1919 Nisanında okuduğu makalenin iddia ettiği şey buydu. Soru şu: Neden Einstein bu makaleyi fırlatıp atmadı? Bir başka uzay boyutu görmüyoruz -cadde, sokak ve kat bilgileri yetersiz olduğu için kendimizi sokaklarda başıboş gezerken bulmuyoruz- o zaman bu acayip fikir hakkında uzun uzadıya düşünmek neden? Nedeni şu. Kaluza, Einstein'ın genel görelilik kuramı denklemlerinin matematiksel olarak kolayca bir tane daha fazla uzay boyutu olan bir evrene genişletilebileceğini anlamıştı. Kaluza bu genişletilmeyi göz önüne aldı ve doğal olarak, genel göreliliğin daha yüksek-boyutlu versiyonunun Einstein'ın özgün kütleçekimi denklemlerini kapsamakla kalmadığını, fazladan uzay boyutu nedeniyle fazladan denklemlere de sahip olduğunu buldu. Kaluza, bu fazladan denklemleri incelediği zaman olağandışı bir şey keşfetti: Fazladan denklemler Maxwell'in ondokuzuncu yüzyılda, elektromanyetik alanı tanımlamak için kullandığı denklemlerden başkası değildi! Evrenin fazladan, yeni bir uzay boyutu olduğunu varsayarak, Kaluza, Einstein'ın bütün fizikteki en önemli problemlerden bir gözüyle baktığı probleme bir çözüm getirmişti. *Kaluza Einstein'ın özgün genel görelilik denklemlerini Maxwell'in elektromanye-*

tik denklemleriyle birleştiren biryapı bulmuştu. İşte Einstein'ın Kaluza'nın makalesini fırlatıp atmamasının nedeni buydu.

Sezgisel olarak, Kaluza'nın makalesi konusunda şöyle düşünebilirsiniz. Genel görelilikle Einstein uzay ve zamanı uyandırdı. Bunlar gerilip uzarken Einstein, kütleçekiminin geometrik olarak somutlaşmış örneğini bulduğunu anladı. Kaluza'nın makalesi ise uzay ve zamanın geometrik uzanımının daha büyük olduğunu ileri sürdü. Einstein, kütleçekimi alanlarının olağan üç uzay ve bir zaman boyutundaki eğrilmeler ve dalgacıklar olarak gösterilebileceğini anlamıştı, Kaluza ise fazladan bir uzay boyutu olan bir evrende fazladan eğrilmeler ve dalgacıklar olacağını buldu. Yaptığı çözümleme, bu eğrilmeler ve dalgacıkların, elektromanyetik alanı tanımlamakta kullanılabileceğini gösterdi. Kaluza'nın ellerinde Einstein'ın evrene kendi geometrik yaklaşımının, kütleçekimi ve elektromanyetizmayı birleştirecek kadar güçlü olduğu kanıtlanmış oldu.

Elbette, hâlâ bir sorun vardı. Her ne kadar matematik işliyorsa da, bildiğimiz üçünün ötesindeki bir uzay boyutu konusunda hiçbir ipucu yoktu, hâlâ da yok. Öyleyse Kaluza'nın keşli yalnızca bir merak sonucu muydu yoksa bir şekilde evrenimizle bağlantılı mı? Kaluza'nın kurama güveni tamdı -örneğin yüzmeyi anlatan bir broşürü okuduktan sonra doğrudan denize atlayarak yüzme öğrenmişti- ama kuram ne kadar çekici olursa olsun, görünmez bir uzay boyutu fikri hâlâ kulağa aykırı geliyordu. Daha sonra, 1926'da isveçli fizikçi Oskar Klein, Kaluza'nın fikrine fazladan boyutun nerede gizleniyor olabileceğini öneren yeni bir yön verdi.

Gizli Boyutlar

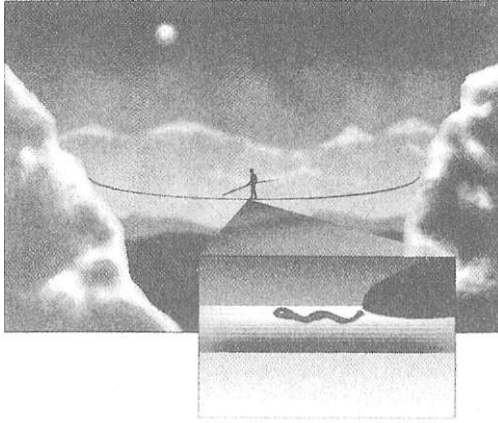
Klein'in fikrini anlamak için, Philippe Petit'nin Everest Tepesi ile Lhotse arasında gerilmiş olan lastik kaplı, gergin bir halat üzerinde yürüdüğünü düşünün. Kilometrelerce uzaktan bakıldığında gergin halat, Şekil 12.5'te görüldüğü gibi, tek boyutlu bir nesne -bir çizgi- gibi, yani yalnızca boyu yönünde uzayan bir nesne gibi görünür. Eğer bize Philippe'in önünde, halatın üze-

rinde minik bir solucanın sürünerek ilerlemekte olduğu söylenirse, onu çılginca destekleriz, çünkü felaketten kaçınmak için sürekli olarak Philippe'in ilerisinde kalmak zorundadır. Elbette bir an düşününce, doğrudan algılayabileceğimiz sol/sağ boyutunun ötesinde, gergin halatın bir yüzeyi olduğunu anlarız. Her ne kadar uzaktan çıplak gözle görmek zor olsa da, gergin halatın yüzeyinin ikinci bir boyutu vardır: Etrafına "sarılmış" olan saat yönünde/saat yönünün tersine boyut. Küçük bir teleskopla bu çembersel boyut görünür hale gelir ve solucanın yalnızca uzun sol/sağ yönünde değil, kısa, "kıvrılmış", saat yönünde/saat yönünün tersine olan boyutta da hareket edebileceğini görürüz. Yani, gergin halatın yüzeyindeki her noktada solucanın, üzerinde hareket edebileceği, birbirinden bağımsız iki yön vardır (gerili halatın yüzeyinin iki-boyutlu* olduğunu söylerken kastettiğimiz budur), öyleyse güvende kalmak için ya başlangıçta düşündüğümüz gibi Philippe'in önünde sürünerek ilerleyebilir, ya da minik, çembersel boyut yönünde ilerleyerek halatın alt yüzeyine geçerek Philippe'in yukarıdan geçmesini sağlayabilir.

Gerili halat, boyutların -herhangi bir şeyin üzerinde hareket edebileceği bağımsız yönler- niteliksel olarak iki farklı türde olabileceğini gösteriyor. Bu boyutlar halat yüzeyinin sol/sağ yönündeki boyutu gibi büyük ve görülmesi kolay olabileceği gibi, halat yüzeyinin etrafına dolanan saat yönünde/saat yönünün tersine boyutu gibi minik ve görülmesi zor da olabilirler. Bu örnekte, gergin halatın yüzeyini çevreleyerek kıvrılan çembersel boyutu görmek çok zor değildir. Bütün sahip olmamız gereken, mantıklı bir büyütme aracıdır. Ama tahmin edebileceğiniz gibi, kıvrılmış boyut ne kadar küçükse, onu saptamak da o kadar güçleşir.

Birkaç kilometre uzaktan gergin bir halatın yüzeyinde kıvrılmış olan bir boyutu ortaya çıkarmak bir şeydir, bir dış temizleme ipinin ya da incecik bir sinir telinin kıvrılmış, çembersel boyutunu ortaya çıkarmaksa başka bir şeydir.

*Sol, sağ, saat yönünde ve saat yönünün tersine boyutlarının her birini ayrı ayrı sayabilirsiniz bile, solucanın dört yönde hareket edebileceği sonucuna ulaşabilirsiniz. Ama "bağımsız" yönlerden söz ettiğimizde, her zaman aynı geometrik eksende yer alanları aynı gruba sokarız; sol ve sağ ile saat yönünde ve saat yönünün tersine gibi.



Şekil 12.5 Uzaktan, gergin halat tek-boyutlu görünür ama yeterince güçlü bir teleskopla ikinci, kıvrılmış boyutu görünür hale gelir.

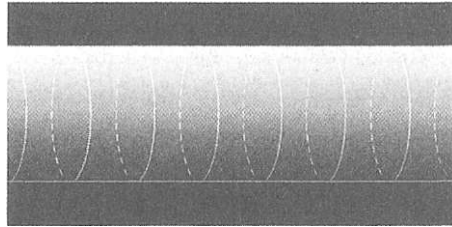
Klein'in katkısı, evrenin *içinde* bulunan bir nesne için doğru olan bir şeyin, evrenin kendi dokusu için de doğru olabileceğini ileri sürmektir. Yani, nasıl gergin bir halatın büyük ve küçük boyutları varsa, evrenin dokusunun da olabilir. Belki de bildiğimiz üç boyut -sol/sağ, ileri/geri, aşağı/yukarı- gergin halatın ya-tay, uzunlamasına boyutu gibi büyük, görmesi kolay boyutlar olabilirler. Ama nasıl gergin halatın yüzeyinde fazladan, küçük, kıvrılmış, çembersel bir boyut daha varsa, uzayın dokusunun da küçük, kıvrılmış, çembersel bir boyutu olabilir. Bu boyut, hiç kimsenin onun varlığını ortaya çıkaracak kadar güçlü bir araca sahip olmadığı kadar küçük olabilir. Klein, bu boyutun minik ölçüsü nedeniyle gizli kalmış olabileceğini ileri sürdü.

Küçük, ne kadar küçüktür? Kuantum mekaniğinin bazı özelliklerini Kaluza'nın özgün makalesine uygulayan Klein'in matematiksel çözümlemesi, fazladan çembersel uzay boyutunun yarıçapının Planck uzunluğu¹⁶ kadar olabileceğini ortaya koydu. Bu, elbette deneysel erişimin çok uzağındadır (modern araçlar 1'er atom çekirdeğinin binde birinden daha küçük şeyleri çözümleyemiyor ki bu da Planck uzunluğunun milyon kere milyar kat uzağında kalmak demek). Ama hayali, Planck boyutlarında bir solucan için bu minik, kıvrılmış, çembersel boyut, tıpkı sıradan

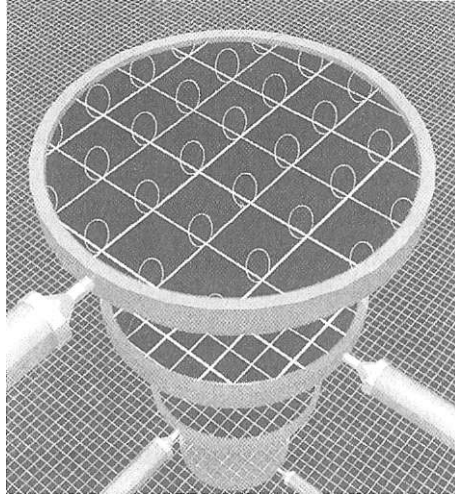
bir solucanın Şekil 12.5'teki gergin halatın çembersel boyutunda hareket etmesi gibi, üzerinde ilerleyebileceği yeni bir yön sağlayacaktır. Elbette nasıl sıradan bir solucan bu çembersel boyutta saat yönünde hareket ederken çok geçmeden kendini yeniden başladığı noktada bulursa, çembersel boyutta sürünen Planck boyutunda bir solucan da sürekli olarak başladığı noktaya dönecektir. Ama kat ettiği uzaklığı bir yana bırakırsak, kıvrılmış olan boyut, minik solucana tıpkı bildiğimiz üç boyut gibi üzerinde serbestçe hareket edebileceği bir yön sağlar.

Bunun neye benzediği konusunda sezgisel bir his edinmek için, gergin halatın kıvrılmış boyutu olduğunu söylediğimiz şeyin -saat yönünde/saat yönünün tersine- *halatın uzun boyutunun her noktasında var olduğuna* dikkat edin. Solucan, gergin halatın uzun boyutunun (ekseninin) her noktasında bu çembersel boyut doğrultusunda hareket edebilir, bu nedenle gergin halatın yüzeyinin, Şekil 12.6'daki gibi, her noktasında minik, çembersel bir yön barındıran bir uzun boyutu olduğu söylenebilir. Bu, akılda tutulması yararlı olan bir görüntüdür, çünkü Klein'ın Kaluza'nın fazladan uzay boyutunun nasıl gizlendiği önerisine de uygulanır.

Bunu görmek için, yine Şekil 12.7'deki gibi, uzayın dokusunun gittikçe daha küçük uzaklık ölçeklerinde gösterildiği bir di-ziyi inceleyelim. İlk birkaç büyütme düzeyinde ortaya yeni bir şey çıkmaz: Uzayın dokusu hâlâ üç boyutlu görünür (her zaman olduğu gibi bunu sayfa üzerinde iki boyutlu bir ızgara şeklin-



Şekil 12.6 Gergin halatın yüzeyi, her noktasında çembersel bir boyut tutturulmuş olan bir uzun boyuta sahiptir.



Şekil 12.7 Kaluza-Klein önerisi, çok küçük ölçeklerde uzayın, bildiğimiz her noktaya tutturulmuş olan, fazladan çembersel bir boyuta sahip olduğu şeklindedir.

de gösteriyoruz). Ama şekildeki en yüksek büyütme düzeyi olan Planck ölçeğine indiğimizde, Klein yeni, kıvrılmış bir boyutun görünür hale geleceğini öne sürüyordu.

Nasıl gergin halatın büyük, uzun boyutu boyunca her noktada çembersel boyutu da varsa, bu önerideki çembersel boyut da günlük yaşamın bilindik üç uzun boyutunun her noktasında vardır. Şekil 12.7'de bunu, uzun boyutların çeşitli noktalarında ek çembersel boyutlar çizerek gösteriyoruz (her noktada çembersel boyutu gösterirsek şekil ortadan kaybolur). Şekil 12.6'daki gergin halatla olan benzerliği hemen fark edeceksiniz. Bu yüzden Klein'in önerisinde uzay, her noktasına fazladan, çembersel bir boyut tutturulmuş olan üç bilindik boyuta sahip olarak düşünülmelidir (şekilde bu üç boyuttan ikisi gösterilmiştir). Çizimden kaynaklanan sınırlılıklar nedeniyle size öyle gibi geliyor olsa da, bu fazladan boyut, bilindik uzaysal üç boyutun içinde bir tümsek veya halka değildir. Fazladan boyut, bildiğimiz üç boyutun tümüyle dışında olan yeni bir boyuttur. Bildiğimiz üç boyutlu uzayın her noktasında var olan bu boyut öylesine küçüktür ki, en güçlü araçlarla bile varlığı saptanamaz.

Kaluza'nın özgün fikrine yaptığı bu katkıyla Klein, nasıl uzayda hepimizin bildiği üç boyutun dışında, gizli kalmış bir boyut bulunabileceği sorusuna bir cevap bulmuş oldu ki, bu yapı o zamandan günümüze kadar *Kaluza-Klein kuramı* olarak biliniyor. Genel görelilikle elektromanyetizmayı birleştirmek için Kaluza'nın ihtiyacı olan tek şey, fazladan bir uzay boyutu olduğu için, Kaluza-Klein kuramı Einstein'ın tam aradığı şey gibi görünüyordu. Gerçekten Einstein ve başkaları bu gizli uzay boyutu üzerinden birleştirme konusunda çok heyecanlandılar ve bu yaklaşımın her ayrıntıda işleyip işlemeyeceğini sınamak üzere kollar sıvandılar. Ama çok geçmeden Kaluza-Klein kuramı de kendi güçlükleriyle karşılaştı. Bunlardan en çok göze çarpan, elektronun bu fazladan-boyutlu resme yerleştirilmesinin mümkün olmamasıydı.¹⁷ Einstein, en azından 1940'ların başına kadar Kaluza-Klein yapısıyla oynamayı sürdürdü ama başlangıçtaki vaatler somutlaşmadığı için, kurama gösterilen ilgi zamanla azalarak yok oldu.

Amayirmibeş-otuz yıl sonra Kaluza-Klein kuramı görülmeye değer bir geri dönüş yapacaktı.

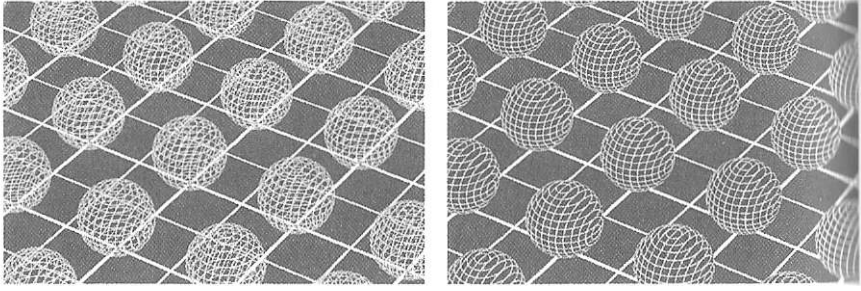
Sicim Kuramı ve Gizli Boyutlar

Kaluza-Klein kuramının mikro dünyayı tanımlamaya çalışırken karşılaştığı güçlüklerle ek olarak, bilim insanlarının bu yaklaşıma karşı duraksamasının bir nedeni daha vardı. Birçokları gizli uzay boyutu varsaymanın hem keyfi, hem de aşırılık olduğunu düşünüyordu. Sanki Kaluza fazladan uzay boyutu fikrine sağlam ve tümdengelimli bir düşünüş zinciri sonunda ulaşmış gibiydi. Sanki fikri şapkadan çıkarmış, sonuçlarını çözümlemeye çalışırken de genel görelilikle elektromanyetizma arasında beklenmedik bir bağ keşfetmişti. Bu yüzden her ne kadar büyük bir keşif olsa da, kaçınılmazlık duygusundan yoksundu. Eğer Kaluza ve Klein'a evrende *neden* dört veya altı veya yedi veya 7000 yerine yalnızca beş uzay-zaman boyutu olduğunu sormuş olsaydınız, verecekleri "Neden olmasın?" dan daha inandırıcı bir cevap yoktu.

Otuz yıldan daha uzun bir süre sonra, durum kökten değişti. Sicim kuramı genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirme yolundaki ilk yaklaşımdır; üstelik bütün kuvvetler ve bütün madde konusundaki kavrayışımızı birleştirme potansiyeline de sahiptir. Ama sicim kuramının kuantum mekaniğine özgü denklemleri ne dört uzay boyutunda işler, ne de beş, altı, yedi veya yedi bin. Gelecek alt bölümde inceleyeceğimiz nedenlerle sicim kuramının denklemleri yalnızca on uzay-zaman boyutunda işler; dokuz uzay boyutu artı zaman. Sicim kuramı daha fazla boyut *talep eder*.

Bu, fizik tarihinde daha önce hiç karşılaşmamış olan, temelden farklı olan bir sonuçtur. Sicimlerin öncesinde hiçbir kuram evrendeki uzaysal boyutların sayısı hakkında hiçbir şey söylememişti. Nasıl yarın Güneş'in doğacağını varsayıyorsak, Nevvton'dan Maxwell'e ve Einstein'a kadar her kuram da uzayın üç boyutlu olduğunu varsaymıştı. Kaluza ve Klein dört uzay boyutu olduğunu ileri sürerek, köklü bir değişiklik önerdiler ama bu, bir başka varsayıma yol açtı; farklı bir varsayım ama sonuçta bir varsayım. Şimdi, ilk kez sicim kuramı uzay boyutlarının sayısını öngören denklemler getiriyordu. Sicim kuramına göre, uzay boyutlarının sayısı bir hesap -varsayım değil, hipotez değil, ilham yoluyla gelen bir tahmin hiç değil- ile belirlenir ve şaşırtıcı olan, hesaplanan sayının üç değil, dokuz olmasıdır. Sicim kuramı *kaçınılmaz olarak* altı fazladan uzay boyutuna sahip olan bir evrene yol açar ve böylece Kaluza ve Klein'in görüşlerini zorunlu olarak kullanmaya hazır bir ortam yaratır.

Kaluza ve Klein'in özgün önerisi yalnızca bir gizli boyut varsaymıştı ama bu, kolayca ikiye, üçe ve hatta sicim kuramının gerektirdiği altı fazladan boyuta kadar genelleştirilebilirdi. Örneğin, Şekil 12.8a'da, Şekil 12.7'deki tek-boyutlu bir şekil olan fazladan çembersel boyutu iki boyutlu bir şekil olan bir küre yüzeyi ile değiştiriyoruz (Bölüm 8'deki tartışmalardan, bir konumu belirlemek için iki parça bilgi gerektiği için -Dünya yüzeyindeki enlem ve boylam gibi- bir kürenin yüzeyinin iki boyutlu olduğunu hatırlayın). Her ne kadar Şekil 12.8a'da görüntü-



Şekil 12.8 Üç bilindik boyutlu evrenin, ızgara ile temsil edilen yakın plan görüntüsü ve (a) içi boş küreler şeklinde iki kıvrılmış boyut ve (b) katı toplar şeklinde üç kıvrılmış boyut

nün açık olması için, yalnızca ızgara çizgilerinin kesiştiği noktalar dakileri çizmiş olsak da, çemberde olduğu gibi, gözünüzde olağan boyutların her noktasına kürelerin tutturulmuş olduğunu canlandırmalısınız. Bu tür bir evrende, uzayda bir konumu belirlemek için beş parça bilgiye ihtiyaç duyarsınız: Büyük boyutlarda yerinizi belirlemek için üç parça bilgi (cadde, sokak ve kat no.) ve o noktaya tutturulmuş olan küre üzerindeki konumunuzu belirlemek için iki parça bilgi daha (enlem, boylam). Elbette, eğer kürenin yarıçapı çok küçükse -bir atomdan milyarlarca kez daha küçük- göreceli olarak bizim gibi büyük varlıklar için son iki parça bilgi fazla önemli değildir. Yine de fazladan boyut uzay dokusundaki mikroskobik-ötesi yapının ayrılmaz bir parçasıdır. Doğru akşam yemeğine doğru zamanda katılabilmek için, mikroskobik bir solucanın bu beş parça bilginin hepsine ihtiyacı vardır.

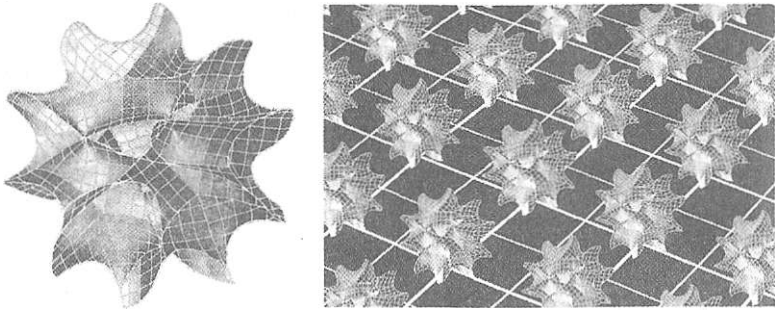
Bir boyut daha ilerleyelim. Şekil 12.8a'da kürelerin yalnızca yüzeylerini göz önüne aldık. Şimdi de uzayın yapısının aynı zamanda kürelerin içini de kapsadığını varsayın; tıpkı gerçek elma kurtlarının elmaların içine girdiği gibi Planck boyutundaki minik solucanımız da kürenin içine girebilir ve içeride serbestçe hareket edebilir. Solucanın konumunu belirlemek için artık *altı* parça bilgiye ihtiyaç duyarız: Bildiğimiz uzay boyutları için üç parça, o noktaya tutturulmuş kürenin içindeki konumu için üç parça daha

(enlem, boylam ve girme derinliği). Bu nedenle zamanla birlikle bu, *yedi* uzay-zaman boyutuna sahip olan bir evren örneğidir.

Şimdi sıra büyük adıma geldi. Her ne kadar çizmek olanaksız olsa da, günlük yaşamımızın olağan üç uzun boyutunun her noktasında evrenin yalnızca Şekil 12.7'deki gibi bir değil, Şekil 12.8a'da olduğu gibi iki değil, Şekil 12.8b de olduğu gibi üç değil, tam altı fazladan uzay boyutuna sahip olduğunu varsayın. Bunu elbette gözümde canlandıramıyorum ve şimdiye kadar da canlandırabilen birine raslamadım. Ama anlamı son derece açıktır. Böyle bir evrende Planck boyutunda bir solucanın uzaysal konumunu belirlemek için *dokuz* parça bilgi gerekir: Üçü bildiğimiz uzaysal boyutlardaki konumu belirlemek için, altısı da bu noktaya iliştirilmiş olan kıvrılmış boyutlardaki konumu belirlemek için. Zaman da göz önüne alındığında bu, sicim kuramının denklemlerinin gerektirdiği gibi, on uzay-zaman boyutlu bir evrendir. Eğer fazladan altı boyut yeterince küçük olacak şekilde kıvrılmış iseler varlıkları kolayca belli olmaz.

Gizli Boyutların Şekli

Sicim kuramının denklemleri aslında uzaysal boyutların yalnızca sayısını belirlemekle kalmaz. Fazladan boyutların alabileceği şekillerin türlerini de belirler.¹⁸ Yukarıdaki şekillerde en basit şekiller -çemberler, içi boş küreler, katı toplar- üzerine odaklandık çima sicim kuramı denklemleri, Calabi-Yau şekilleri veya Calabi-Yau uzayları adı verilen, çok daha karmaşık, altı boyutlu şekilleri seçerler. Bu şekiller, sicim kuramı ile olan ilişkileri ortaya çıkmadan çok önceleri, onları matematiksel olarak keşfeden iki matematikçinin, Eugenio Calabi ve Shing-Tung Yau'nun adlarıyla bilinirler. Bunlardan birinin kaba bir örneği Şekil 12.9a'da görülüyor. Bunun altı boyutlu bir şeklin iki boyutlu bir çizimi olduğunu, bunun da önemli çarpılmalara neden olduğunu aklınızdan çıkarmayın. Bu durumda bile, bu resim, şekillerin neye benzediğine ilişkin iyi-kötü bir fikir veriyor. Eğer Şekil 12.9a'daki özel Calabi-Yau şekli sicim kuramındaki altı boyutu oluşturuyorsa, uzay mikroskobik-ötesi ölçeklerde Şe-



Şekil 12.9 (a) Calabi-Yau şeklinin bir örneği (b) Minik Calabi-Yau şekilleri biçimindeki fazladan boyutları ile uzayın çok büyütülmüş bir parçası

kil 12.9b deki görüntüye sahip olacaktır. Calabi-Yau şekli, olağan üç boyutun her noktasına iliştilirilmiş olacağı için bu, sizin, benim ve herkesin içinde ve çevresinde bu minik şekillerin bulunduğu anlamına geliyor. Bir yerden diğerine yürüdüğünüz zaman gövdeniz bu dokuz boyutun tamamında hareket eder, hızla ve sürekli bir biçimde bütün şeklin çevresinde dolar ve ortalama olarak bu fazladan altı boyutta hiç hareket etmiyormuşsunuz gibi bir görüntü oluşturur.

Eğer bu görüşler doğru ise, uzayın mikroskobik-ötesi yapısı, dokuların en zengini ile nakış gibi işlenmiş demektir.

Sicim Fiziği ve Fazladan Boyutlar

Genel göreliliğin güzelliği, kütleçekiminin fiziğinin uzayın geometrisi tarafından denetlenmesidir. Doğal olarak, geometrinin fiziği belirleme gücünün sicim kuramı tarafından ortaya atılan fazladan uzaysal boyutlarla artacağını tahmin edersiniz. Artar da. Şimdi bunu, şu ana kadar hep gözardı ettiğim bir soruyu ele alarak görelim. Sicim kuramı neden on uzay-zaman boyutu gerektirir? Bu, matematik dışında kalarak cevaplanması zor bir sorudur ama önce bunun geometri ile fizik arasındaki karşılıklı ilişkiye nasıl bağlı olduğunu açıklamaya çalışayım.

Yalnızca düz bir masanın üzerindeki iki boyutlu yüzeyde titrecek şekilde sınırlanmış olan bir sicimi düşünün. Sicim, çeşit-

li titrenim desenleri sergileyebilecektir ama bunlar yalnızca masanın yüzeyinde sola/sağa ve ileri/geri yönlerindeki titrenimler olacaktır. Eğer sicim sonradan üçüncü boyutta da titrenebilecek şekilde serbest bırakılırsa, masanın yüzeyini terkederek aşağı/yukarı hareket ederken, başka titrenim desenleri de sergileyebilir. Şimdi, her ne kadar üçten fazla boyutu gözde canlandırmak zor ise de, bu sonuç -yani ne kadar fazla boyut varsa o kadar fazla titrenim deseni olacağı- geneldir. Eğer bir sicim dördüncü uzaysal boyutta titrenebilirse, yalnızca üç boyutta sergileyebileceğinden daha fazla titrenim deseni sergileyebilir. Eğer bir sicim beşinci uzaysal boyutta da titrenebilirse, yalnızca dört boyutta sergileyebileceğinden daha fazla titrenim deseni sergileyebilir vb. Sicim kuramında bağımsız titrenim desenleri sayısının çok kesin bir zorlayıcı koşulu karşılamasını gerektiren bir denklem olduğu için, bu önemli bir kavrayıştır. Bu zorlayıcı koşul ihlal edilirse, sicim kuramının matematiği çöker ve denklemleri de anlamsız hale gelir. Üç uzay boyutuna sahip olan bir evrende titrenim desenlerinin sayısı çok az olup zorlayıcı koşullar karşılanamaz; dört uzay boyutuyla titrenim desenlerinin sayısı hâlâ çok azdır; beş, altı, yedi hatta sekiz boyut da hâlâ çok azdır; ama dokuz uzay boyutuyla titrenim desenleri üzerindeki zorlayıcı koşullar mükemmel bir biçimde karşılanır. Sicim kuramının uzay boyutlarının sayısını belirleme yöntemi işte budur. *¹⁹

Böylece geometri ve fizik arasındaki karşılıklı etkileşim gösterildiyse de sicim kuramındaki birliktelikleri dahil da ileri gider ve aslında, daha önce karşılaştığımız kritik bir sorunu ele almak için bir yol sunar. Sicim titrenim desenleri ve bilinen parçacık

*Sizi, gelecek bölümde karşılaşacağımız, bu konuya ilişkin bir gelişmeye hazırlamalıyım. Sicim kuramcılarını onlarca yıldır genellikle sicim kuramını çözümlemekte kullandıkları denklemlerin yaklaşık denklemler olduğunun farkındaydılar (kesin denklemlerin tanımlanması ve anlaşılması zordur). Bununla birlikte çoğunluk, yaklaşık denklemlerin, gereken fazladan boyutların sayısını belirlemek için yeterince kesin olduğunu düşünüyordu. Daha yakın zamanlarda (bu alandaki fizikçilerin çoğunluğuna şok geçirecek biçimde) bazı sicim kuramcıları yaklaşık denklemlerin bir boyutu *gözden kaçırdığını* gösterdiler; şimdi kuramın yedi fazladan boyuta ihtiyaç duyduğu kabul ediliyor. Göreceğimiz gibi bu, bu bölümde incelenen konulardan fedakârlık yapılması değil, bunların daha büyük, aslında daha birleşmiş bir yapı içine oturmasıdır.²⁰

türleri arasındaki ayrıntılı teması açıklamakta fizikçilerin sorunu olduğunu hatırlayın. Fizikçiler çok fazla sayıda kütle-siz sicim titrenim deseni olduğunu, üstelik titrenim desenlerinin ayrıntılı özelliklerinin bilinen madde ve kuvvet parçacıklarının özellikleriyle uyuşmadığını buldular. Ama henüz fazladan boyutlar fikrini incelememiş olduğumuz için önceden söz etmediğim şey, her ne kadar hesaplar fazladan boyutların *sayısını göz* önüne alıyorsa da (neden bu kadar çok sayıda sicim titrenim deseni bulunduğunu kısmen açıklayarak), bu fazladan boyutların küçük boyutlarını ve karmaşık şekillerini göz önüne almaz -hesaplarda bütün uzay boyutlarının düz ve kıvrılmamış olduğu varsayılır- ve bu da hatırı sayılır bir fark yaratır.

Sicimler o kadar küçüktür ki, fazladan altı boyut da bir Calabi-Yau şeklinin içine hapsedilmiş olsa bile, sicimler gene de o yön-lere doğru titrenirler. İki nedenden ötürü bu son derece önem-lidir. Birincisi, sicimlerin her zaman dokuz uzay boyutunun tü-münde titrenmesini sağlar ve böylece, fazladan boyutlar çok sı-kı bir şekilde kıvrılmış olsalar bile, titrenim desenlerinin sayısı üzerindeki zorlayıcı koşul, yerine getirilmeye devam eder. İkin-cisi, tıpkı bir tubaya üflen-en havanın oluşturduğu titrenim de-senlerinin enstrümanın kıvrımlarından etkilenmesi gibi, sicimle-rin titrenim desenleri de, fazladan altı boyutun kıvrımları tara-fından etkilenir. Eğer havanın geçtiği bir kanalı daraltarak ya da bir odacığı genişleterek tubanın şeklini değiştirirseniz, havanın oluşturduğu titrenim desenleri ve dolayısı ile enstrümanın sesi değişir. Benzer biçimde, eğer fazladan boyutların şekli ve ölçü-leri değiştirilirse, sicimin her olası titrenim deseni de önemli öl-çüde etkilenir. Sicimin titrenim deseni onun kütle-sini ve elektrik yükünü belirlediği için, bu, fazladan boyutların parçacık özellik-le-rinin belirlenmesinde çok önemli rolü olduğu anlamına gelir.

Bu, kilit bir kavrayıştır. *Fazladan boyutların kesin ölçüleri ve şekillerinin, sicim titrenim desenleri ve dolayısı ile parçacık özel-likleri üzerinde çok önemli etkileri vardır.* Evrenin temel yapısı -galaksi ve yıldızların oluşumundan bildiğimiz yaşamın varlığı-na kadar- çok hassas bir şekilde parçacık özelliklerine bağlı ol-

duğu için, evrenin kodları Calabi-Yau şeklinin geometrisinin içine yazılmış olabilir.

Calabi-Yau şeklinin bir örneğini Şekil 12.9'da gördük ama en azından yüz binlerce başka olasılık da var. O zaman soru, eğer doğru ise, hangi Calabi-Yau şeklinin, uzay-zamanın dokusunun fazladan-boyutlu kısmını oluşturduğudur. Sicim titreşim desenlerinin ayrıntılı özellikleri yalnızca belirli bir Calabi-Yau şekli seçimiyle belirlendiği için bu, sicim kuramının karşı karşıya kaldığı en önemli sorulardan biridir. Şimdiye kadar bu soru cevapsız kaldı. Bunun nedeni, sicim kuramı denklemlerinin çağdaş kavranış biçiminin birçokları arasından hangisinin seçileceği yolunda bir fikir vermemesidir; bilinen denklemlere göre her Calabi-Yau şekli, herhangi bir başkası kadar geçerlidir. Denklemler fazladan boyutların ölçülerini bile belirlemezler. Fazladan boyutları görmediğimize göre, küçük olmalılar, ama ne kadar küçük oldukları sorusu hâlâ cevaplanmamıştır.

Bu, sicim kuramının ölümcül bir eksikliği midir? Olabilir. Ama ben öyle düşünmüyorum. Gelecek bölümde daha ayrıntılı işleyeceğimiz gibi, sicim kuramının kesin denklemleri, yıllar boyunca kuramcıların aklına gelmemiştir ve çok sayıda çalışmada *yaklaşık* denklemler kullanılmıştır. Bunlar sicim kuramının pek çok özelliğine ışık tutmuş olmakla birlikte -ki bunların arasında fazladan boyutların tam ölçüleri ve şekilleri de vardır- bazı sorulara yaklaşık denklemler cevap veremez. Matematiksel çözümlemimizi keskinleştirdiğimiz ve bu yaklaşık denklemleri geliştirdiğimiz sürece, fazladan boyutların şeklini belirlemek, en önde gelen -ve benim düşünceme göre erişilebilir- amaçtır. Şimdiye kadar bu amaç, erişimin ötesinde kalmıştır.

Yine de Calabi-Yau şekillerinden *herhangi birinin* seçilmesinin, bilinen parçacıkları yaklaşık olarak üreten titreşim desenlerine yol açıp açmayacağını hâlâ sorabiliriz. Cevap da oldukça sevindiricidir.

Her ne kadar her olasılığı araştırmış olmaktan çok uzak olsak da, Calabi-Yau şekillerinin örneklerinin, Tablo 12.1 ve 12.2 ile kabaca uyuşan sicim titreşim desenlerine yol açtığı bulunmuş-

tur. Örneğin 1980'lerin ortalarında, Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger ve Edward Witten (Calabi-Yau şekillerinin sicim kuramı ile olan ilişkisini fark eden fizikçiler ekibi), Calabi-Yau şekillerinin içinde bulunan her deliğin -bu terim matematiksel olarak kesin bir şekilde tanımlanan anlamıyla kullanılmıştır- bir en düşük enerjili sicim titreşim desenleri *ailesine* yol açtığını keşfettiler. Üç delikli bir Calabi-Yau şekli, bu yüzden, Tablo 12.1'deki temel parçacıkların üç aileli, tekrarlayan yapısına bir açıklama getirir. Gerçekten, böyle bazı üç delikli Calabi-Yau şekilleri bulundu. Üstelik, bu tercihli Calabi-Yau şekilleri arasında Tablo 12.1 ve 12.2'deki doğru sayıda haberci parçacıklarına ve parçacıklarla uyuşan, doğru elektrik yükü ve nükleer kuvvet özelliklerine yol açan şekiller de vardır.

Bu, son derece cesaret verici bir sonuçtur; hiçbir şekilde böyle olması sağlanmaya çalışılmamıştır. Genel görelilik ve kuantum mekaniğini birleştirirken sicim kuramı bilinen madde ve kuvvet parçacıklarını açıklamak gibi önemli bir amaca ulaşmanın yanına bile yaklaşamayacağım gösteren bir başka amaca ulaşmış olabilir. Araştırmacılar, kuramın düş kırıklığı yaratan olasılıktan uzaklaşmasının yolunun bulunmasından cesaretlendiler. Daha ileri giderek parçacıkların kesin kütlelerini hesaplamak daha zor ve heyecan vericiydi. İncelediğimiz gibi, Tablo 12.1 ve 12.2'deki parçacıkların kütleleri, en düşük enerjili sicim titreşimlerinden -sıfır kere Planck kütlesi- milyon kere milyarda bir farklıdır. Bu kadar küçük farkları hesaplamak, şu andaki sicim kuramı denklemlerini kavrayışımızın çok ötesinde bir kesinlik düzeyi gerektirir.

Aslında, tıpkı diğer birçok sicim kuramcısı gibi ben de Tablo 12.1 ve 12.2'deki minik kütlelerin sicim kuramında tıpkı standart modeldeki gibi ortaya çıktıklarından kuşkulanyorum. Bölüm 9'dan, standart modelde bir Higgs alanının bütün uzayda sıfırdan farklı değer aldığını ve bir parçacığın kütlelerinin, Higgs okyanusunda hareket ederken ne kadar dirençle karşılaştığı ile orantılı olduğunu hatırlayın. Büyük olasılıkla benzer bir senaryo sicim kuramına da uygulanır. Eğer büyük sayıda sicim hep bir-

likte uzayda eşgüdümlü bir şekilde titrenirse, pek çok bakımdan bir Higgs okyanusundan ayırt edilemeyecek, birörnek bir arka plan oluşturabilir. Bu durumda başlangıçta sıfır kütleye yol açan sicim titrenimleri, Higgs okyanusunun sicim kuramındaki karşılığının içinde hareket eder ve titrenirken etkisi altında kaldıkları direnç yoluyla minik, sıfırdan farklı kütleler edinebilirler.

Ama dikkat edilirse, standart modelde verilen parçacığın etkisi altında kaldığı direnç kuvveti -ve dolayısı ile edindiği kütle-deneyssel ölçümle belirlenir ve kuramda girdi olarak belirtilir. Sicim kuramı versiyonunda direnç kuvveti -ve dolayısı ile titrenim desenlerinin kütleleri- sicimler arasındaki etkileşmelerden kaynaklanır (Higgs okyanusu sicimlerden yapılmış olacağı için) ve *hesaplanabilir* olmalıdır. Sicim kuramı, en azından ilke olarak, bütün parçacık özelliklerinin kuramın kendisi tarafından belirlenmesine izin verir.

Şimdiye kadar bunu kimse başaramadı ama vurgulandığı gibi, sicim kuramı hâlâ gelişme halindedir. Araştırmacılar, zamanla, birleştirme yolunda çok büyük potansiyeli olan bu yaklaşımı tam anlamıyla gerçekleştirebilmeyi umuyorlar. Potansiyel ödül büyük olduğu için güdü de güçlüdür. Sıkı çalışma ve biraz da şansın yardımıyla sicim kuramı günün birinde temel parçacık özelliklerini ve sonuçta de evrenin neden böyle olduğunu açıklayabilir.

Sicim Kuramına Göre Evrenin Dokusu

Sicim kuramına ilişkin çoğu şey hâlâ algılamamızın sınırlarının ötesinde olsa da, şimdiden yeni, dramatik bakış noktaları ortaya koymuştur. En çarpıcı olanı, genel görelilik ve kuantum mekaniği arasındaki çatlağı tamir etmeye çalışırken sicim kuramının, uzayın dokusunun, doğrudan algılayabildiklerimizin ötesinde çok daha fazla sayıda boyutu -evrenin en derin sırlarının bazılarını çözmekte kilit rol oynayabilecek olan boyutlar- olabileceğini ortaya koymuş olmasıdır. Üstelik kuram bildiğimiz uzay ve zaman kavramlarının Planck-altı ortama kadar uzanmadığını da bildirir ki bu da şimdi kavradığımız biçimiyle uzay ve zama-

nın, yalnızca hâlâ onları keşfetmemizi bekleyen çok daha temel kavramların yaklaşımları olduğu anlamına gelir.

Evrenin ilk anlarında, uzay-zamanın dokusunun bugün yalnızca matematiksel olarak erişilebilen özellikleri apaçık ortada olmuş olmalı. Erken dönemlerde, bildiğimiz üç uzay boyutu da henüz küçükken, sicim kuramında şimdi bizim büyük veya kıvrılmış dediğimiz boyutlar arasında büyük olasılıkla hiçbir fark yoktu. Bu boyutların şimdiki ölçü eşitsizliği, henüz anlamadığımız bir nedenle uzay boyutlarından üç tanesini özel olarak seçen ve onları 14 milyar yıl boyunca, geçtiğimiz bölümlerde incelediğimiz genişlemeye maruz bırakan kozmolojik evrimden kaynaklanmış olmalı. Zamanda daha da geriye bakacak olursak, bütün gözlenebilir evren Planck-altı bir alana kadar büzülür, öyle ki, (Şekil 10.6'da) bulanık bölge olarak adlandırdığımız şeyi şimdi bildiğimiz uzay ve zamanın, çağdaş araştırmaların anlamaya çalıştığı çok daha temel varlıklardan -her ne iseler- doğduğu yer olarak tanımlayabiliriz.

İlkelevreni anlamaya yönelik ilerlemeler ve dolayısı ile uzayın, zamanın ve zamanın okunun değerlendirilmesi -ki bu yakın zamana kadar asil ama uzak görünen bir amaçtı- sicim kuramını anlamak için kullandığımız kuramsal aletleri iyice bilememizi gerektirir. Şimdi göreceğimiz gibi, M-kuramının geliştirilmesiyle ilerleme, iyimserlerin en iyimser öngörülerini bile aşmıştır.

XIII. Bölüm

Zar Üzerindeki Evren

M-Kuramında Uzay ve Zaman
Üzerine Spekülasyonlar

Sicim kuramı bütün bilimsel atılımlar içinde en dönemeçli tarihe sahip olanlardan biridir. İlk ortaya atılmasından otuz yıldan fazla bir süre geçtikten sonra bugün bile, sicim kuramını savunanların çoğunluğu, "sicim kuramı nedir? "temel sorusunun hâlâ kapsamlı bir cevabı olmadığına inanıyorlar. Sicim kuramı *hakkında* pek çok şey biliyoruz. Temel özelliklerini biliyoruz, kilit önemde başarılarını biliyoruz, vaatlerini biliyoruz, karşı karşıya olduğu zorlukları biliyoruz. Sicim kuramının denklemlerini kullanarak çok çeşitli durumlarda sicimlerin nasıl davranmaları ve etkileşimleri gerektiğini ayrıntılı olarak hesaplayabiliriz. Ama çoğu araştırmacı sicim kuramının günümüzdeki formüleştirilmesinin, diğer birçok önemli ilerlemenin kalbinde yer aldığını gördüğümüz temel bir ilkedен yoksun olduğunu hissediyor. Özel görelilikte ışık hızının sabitliği var. Genel görelilikse eşdeğerlik ilkesine sahip. Kuantum me-

kaniğinde belirsizlik ilkesi var. Sicim kuramcılarıysa, kuramın özünü benzer bütünlükte ifade edebilecek, benzer bir ilkeyi hâlâ el yordamıyla aramaya devam ediyorlar.

Bu eksikliğin kökeninde, geniş ölçüde sicim kuramının büyük yük, bütünlüğe sahip olan bir görüşten kaynaklanmaması, parça parça gelişmesi vardır. Sicim kuramının *amacı* -tüm kuvvetleri ve tüm maddeyi kuantum mekaniğine özgü bir yapı altında birleştirmek- yeterince büyük olmakla birlikte, kuramın gelişimi açık bir şekilde bölük pörçük olmuştur. Otuz yıldan daha uzun bir zaman önceki keşfinden sonra, sicim kuramı, bir grup kuramcının *bu* denklemleri inceleyerek kilit özelliklerini açığa çıkarması, bir başka grubun ise *bunları* inceleyerek kritik anlamaları ortaya çıkarmasıyla, parça parça bir araya getirilmiştir.

Sicim kuramcıları, yere gömülü olan ve ayaklarına takılan bir uzay aracını kazarak ortaya çıkarmaya çalışan ilkel bir kabilenin üyelerine benzetilebilir. Kabile, acemice ve deneyip-yanılarak uzay aracının işleyişinin özelliklerini ortaya çıkarır ve bu da bütün düğmelerin ve kolların eşgüdümlü ve birleşik bir şekilde bir arada çalıştığı duygusunu besler. Sicim kuramcıları arasında da benzer bir duygu hâkimdir. Yıllar süren araştırmaların sonuçları birbirine uymakta ve bir noktaya yönelmektedir. Bu, araştırmacılara, sicim kuramının henüz tam olarak ortaya çıkarılmamış ama sonunda doğanın işleyişini eşsiz bir berraklık ve anlaşılabilirlikle ortaya koyacak olan güçlü, tutarlı bir yapı oluşturmakta olduğu yolunda giderek artan bir özgüven aşlamıştır.

Hiçbir şey bunu son zamanlarda *ikinci süpersicim devrimi*ni başlatan kavrayıştan daha iyi gösteremez. Bu devrim, diğerlerinin yanı sıra, uzayın dokusuna işlemiş olan bir diğer gizli boyutu ortaya çıkarmış, sicim kuramının deneysel olarak sınanması için yeni olasılıklar ortaya koymuş, bizim evrenimizin diğerleri ile yan yana olabileceğini önermiş, yeni kuşak yüksek enerji hızlandırıcılarında kara deliklerin oluşturulabileceğini göstermiş, zamanın ve onun okunun tıpkı Satürn'ün güzel halkaları gibi tekrar tekrar kıvrılmakta olabilecekleri yepyeni bir kozmoloji kuramına yol açmıştır.

İkinci Süpersicim Devrimi

Sicim kuramı ile ilgili, henüz açıklamadığım, ama *Evrenin Zarafeti* adlı kitabımı okuyanların hatırlayabileceği, sorunlu bir ayrıntı daha vardır. Geçtiğimiz otuz yıl süresince sicim kuramının bir değil tam *beş* farklı çeşitlemesi geliştirilmiştir. Önemli olmamakla birlikte adları *Tür-I*, *Tür-IIA*, *Tür-IIB*, *Heterotik-O* ve *Heterotik-E'dir*. Tümü, önceki bölümde anlatılan temel özellikleri paylaşırlar -temel bileşenler titreşen enerji iplikçikleridir- ve 1970'lerdeki ve 1980'lerdeki hesaplamaların ortaya koyduğu gibi, her kuram fazladan altı uzay boyutu gerektirir; ama bu kuramlar ayrıntılı olarak çözümlendikleri zaman önemli farklar ortaya çıkar. Örneğin, *Tür-I* kuramı, *kapalı sicimler* adı verilen ve son bölümde tanımlanan titreşen sicim halkalarını içerir, ama diğer sicim kuramlarından farklı olarak, aynı zamanda iki ucu da açık titreşen sicimler olan *açık sicimleri* de kapsar. Üstelik hesaplar sicim titreşim desenlerinin ve her desenin diğerleriyle etkileşme, onları etkileme biçiminin bir formülleştirmeden diğerine farklı olduğunu gösteriyor.

Sicim kuramcılarının en iyimser olanları, bu farkların, bu kuramları günün birinde gerçekleştirilebilecek olan deneylerin sonuçları ile ayrıntılı bir şekilde karşılaştırarak beş kuramın birleştirilmesine yardımcı olacağını düşünüyorlardı. Ama dürüst olmak gerekirse, sicim kuramının beş ayrı formülleştirilmesinin bulunması bile başlı başına bir rahatsızlık kaynağıydı. Birleştirme rüyası, bilim insanlarının tek bir evren kuramına yönlendikleri bir rüyadır. Eğer araştırmalar yalnız bir kuramsal yapının hem kuantum mekaniği, hem de genel göreliliği kapsadığını ortaya koyarsa, kuramcılar birleştirmenin nirvanasına ulaşmış olacaklardır. Doğrudan deneysel doğrulama olmasa bile, yapının geçerliliği konusunda güçlü bir durumda bulunacaklardır. Nereden baksanız, hem kuantum mekaniği hem de genel görelilik konularında deneysel destek zaten bol miktarda vardır ve evreni yöneten yasaların birbirleriyle bağdaşması gerektiği gün gibi ortadadır. Eğer bir kuram yirminci yüzyıl fiziğinin deneysel olarak doğrulanmış iki dev sütununu birleştiren tek ve matema-

tiksel olarak tutarlı bir yapı ise, bu, kuramın kaçınılmazlığı konusunda doğrudan olmasa da güçlü bir kanıt olacaktır.

Fakat sicim kuramının yüzeysel olarak birbirine benzeyen ama ayrıntılarda farklı olan beş çeşitlemesinin olduğu gerçeği, sicim kuramının tek olma sınavında başarısız olacağı anlamına geliyor gibi görünmektedir. İyimserler günün birinde haklı çıksa ve beş sicim kuramından yalnızca biri deneysel olarak kanıtlanırsa bile neden dört tane daha tutarlı formülleştirme olduğu sorusu tedirgin edicidir. Diğerleri yalnızca matematiksel merak mıdır? Fiziksel dünya için bir önemleri var mıdır? Varlıkları, sonradan zeki bilim insanlarının aslında sicim teması üzerinde beş, altı, yedi veya belki de sonsuz sayıda matematiksel çeşitlemenin olduğunu gösterecekleri kuramsal bir buzdağının suyun üzerinde görünen ucu olabilir mi?

1980'lerin sonunda ve 1990'ların başında birçok fizikçi, sicim kuramlarından biri veya diğerini anlamak için sıkı bir çalışma içindeyken beş çeşitleme muamması, araştırmacıların üzerinde gündelik olarak çalıştıkları bir problem değildi. Herkesin her sicim kuramı kavrayışının daha rafine olacağı uzak bir gelecekte yüzleşeceğini bildiği o sessiz sorulardan biriydi.

Ama 1995 baharında, neredeyse hiçbir uyarı olmadan, bu mütevazı umutlar fırtınalı bir şekilde aşıldı. Bazı sicim kuramcılarının (aralarında Chris Hull, Paul Townsend, Ashoke Sen, Michael Duff, John Schwarz ve başka birçokları olmak üzere) çalışmalarından sonuç çıkaran -ve yirmi yıldır dünyanın en ünlü sicim kuramcısı olan- Edward Witten, beş sicim kuramını birbirine bağlayan gizli uyumu ortaya çıkardı. Witten beş kuramın birbirinden farklı olmadığını, *tek bir* kuramın beş ayrı matematiksel çözümleme yolu olduğunu gösterdi. Nasıl tek dil bilen bir okuyucuya bir kitabın beş ayrı dildeki çevirileri beş ayrı metin gibi görünürse, beş ayrı sicim formülleştirmesi de henüz Witten onları birbirine çevirecek bir sözlük yazmamış olduğu için farklı görünüyordu. Ama bir kere ortaya çıkınca, sözlük inandırıcı bir şekilde -tıpkı beş ayrı çevirinin yapıldığı ana metin gibi- ana kuramın beş sicim formülleştirmesinin de birbirleriyle bağlantı-

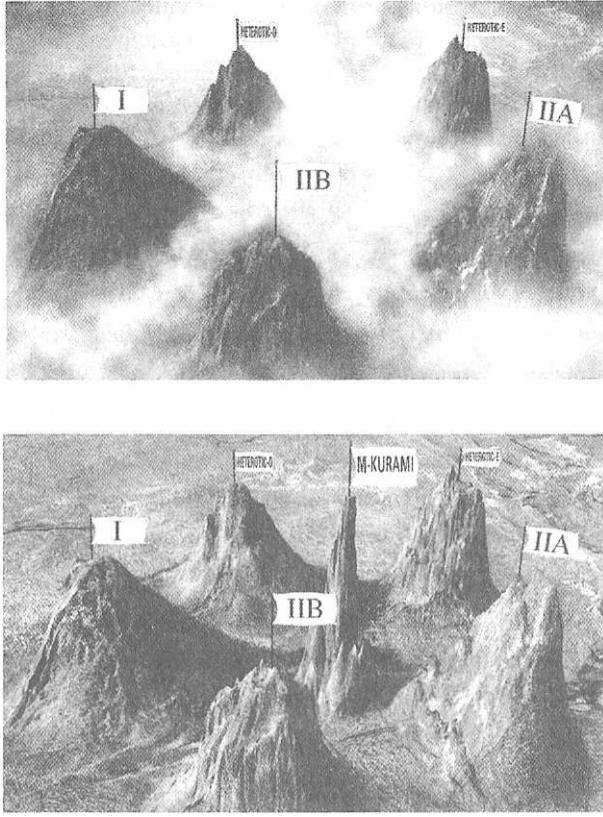
lı olduğunu ortaya koydu. Birleştirici ana kurama geçici olarak *M-kuramı* adı verildi. M burada *Master, Majestic, Mother, Magic, Mystery, Matrix* kelimelerinden herhangi birinin anlamına geliyor olabilir. M-kuramı, Witten'in güçlü önsezileriyle aydınlanan yeni görüntüsüyle dünya çapında başlamış olan yoğun araştırmalarla tamamlanmayı bekliyor.

Bu devrimci keşil, ileriye doğru atılmış büyük ve sevindirici bir adımdı. Witten, bu alanda en çok ödülü alan makalesinde (ve Petr Horava'nın önemli tamamlayıcı çalışmasıyla) sicim kuramının tek bir kuram *olduğunu* gösterdi. Artık sicim kuramcıları, Einstein'ın bulmaya çalıştığı birleşik kuram için önerdikleri adaylarının niteliklerini belirtirken hafif bir rahatsızlıkla, önerilen birleşik yapının tek olmadığını, beş değişik çeşitlemesi olduğundan söz etmek zorunda değillerdi. Tersine, birleşik bir kuram için uzak-erişimli bir önerinin nasıl uyacağı bir yarı-birleştirmenin konusuydu. Witten'in çalışması aracılığıyla her sicim kuramında somutlaşan birlik, bütünsel bir sicim yapılanmasına genişlemiştir.

Şekil 13.1 'de beş sicim kuramının durumu, Witten'in keşfinden önce ve sonra olmak üzere, özetlenmiştir. Şekil, M-kuramının kendiliğinden, yeni bir yaklaşım olmadığını, bulutların dağılmasını sağlayarak, fizik yasalarının, sicim kuramlarından herhangi birinin sağladığından çok daha duru ve tam bir formülleştirilmesini vadettiğini gösteriyor. M-kuramı, her birinin daha büyük bir sentezin parçaları olduğunu göstererek, beş sicim kuramını de kapsar ve birbirine bağlar.

Çevirinin Gücü

Her ne kadar Şekil 13.1 şematik olarak Witten'in keşfinin temel içeriğini veriyorsa da, bu şekilde ifade edilmesi size biraz çarpıcı gelebilir. Witten'in atılımından önce, araştırmacılar sicim kuramının beş farklı çeşitlemesi olduğunu düşünüyorlardı; onun keşfinden sonra ise artık böyle düşünmüyorlardı. Ama eğer birbirlerinden anlam olarak farklı beş ayrı sicim kuramı olduğunu bilmiyor olsaydınız, sicim kuramcılarının en zeki olanının bu ku-



Şekil 13.1 (a) 1995'ten önce beş sicim kuramının şematik görüntüsü (b) M-kuramı tarafından ortaya konan yarı-birleştirmenin şematik görüntüsü

ramların aslında birbirlerinden farklı olmadıklarını göstermesini neden önemseyecektiniz ki? Soru şöyle de sorulabilir: Witten'in keşfi neden daha önceki bir yanlış anlamayı düzelten basit bir düzeltme değil de devrimci bir keşiftir?

Nedeni şu. Geçtiğimiz yirmi beş-otuz yıl boyunca fizikçiler sürekli olarak bir matematik problemi tarafından engellenmişlerdi. Bu beş sicim kuramından herhangi birini tanımlayan kesin denklemlerin çıkarılması ve çözümlenmesinin çok güç olduğunun görülmüş olması nedeniyle, kuramcılar araştırmalarını çok daha kolay olan yaklaşık denklemlere dayandırmışlardı. Yaklaşık denklemlerin, pek çok koşulda, tam denklemlere yakın so-

nuçlar verdiğine inanmamız için iyi nedenler varsa da, yaklaşıtımlar -tıpkı çeviriler gibi- her zaman bazı bakımlardan eksik kalırlar. Bu nedenle, bazı kilit problemlerin yaklaşık denklemlele matematiksel olarak çözülemeyeceğı görüldü, bu da ilerlemeyi önemli ölçüde yavaşlattı.

Metin çevirilerinde çoğı kez görülen anlam kaymaları için okuyucuların anında devreye giren bazı çareleri vardır. En iyi seçenek, eğer okuyucunun yabancı dil düzeyi uygunsa, özgün metne başvurmaktır. Şu anda sicim kuramcılar bu yöntemin bir benzerine sahip değiller. Witten ve diğerleri tarafından geliştirilen sözlüğün tutarlılığı nedeniyle, beş farklı sicim kuramının tümünün bir ana kuramın, M-kuramının farklı tanımları olduğu yolunda güçlü kanıtlarımız olmasına rağmen henüz araştırmacılar bu kuramsal bağ konusunda bütünsel bir kavrayış geliştirmediler. Son birkaç yılda M-kuramı konusunda çok şey öğrendik ama konunun uygun biçimde ve tam olarak kavrandığını öne sürebilmek için hâlâ yapılması gereken çok şey var. Sicim kuramında, sanki henüz ortada olmayan bir metnin beş ayrı çevirisine sahip gibiyiz.

Özgün metne sahip olmayan (sicim kuramında olduğu gibi) ve metnin yazıldığı dili de bilmeyen çeviri okuyucularının da iyi bildiğı gibi, bir başka çare, metnin onların bildiğı dillere yapılan çevirilerine başvurmaktır. Çevirilerin aynı anlama gelen paragrafları güven verir; farklı anlama gelen paragraflarsa anlam kaymaları veya çeviride farklılıkları gösterir, işte Witten'in beş sicim kuramının aynı ana kuramın farklı çevirileri olduğunu keşfetmesinin ortaya koyduğu yaklaşım budur. Gerçekten de Witten'in keşfi, en iyi çeviri benzetmesiyle anlaşılabilcek olan bu yaklaşımın iyi bir örneğini sergilemiştir.

Ana metnin çeşitli kelime oyunları, kafiyelele, olağandışı ve kültüre bağlı şakalarla dolu olduğu için metnin tamamının, çevirildiğı beş dilden hiçbirinde zarif bir biçimde ifade edilemediğini varsayın. Bazı paragraflar kolayca Swahili diline çevrilebilirken başka bazı paragraflara bu dille hâkim olmak olanaksız olabilir. Bu paragraflardan bazılarını İnuit diline çevirmek fikir

verici olabileceği halde bazıları hiçbir anlam ifade etmeyebilir. Bazı zor pasajların anlamı Sanskrit diliyle yakalanabilirken, beş çeviride de hiçbir anlam ifade etmeyen özellikle problemlili olan bazı bölümler de yalnızca ana metinde anlamlı olabilir. Beş sicim kuramı ile ilgili durum buna çok yakındır. Kuramcılar bazı özel sorular karşısında beş kuramdan dördü matematiksel olarak yararlı olamayacak kadar karmaşık iken, birinin fiziksel sonuçların açık ve saydam tanımını verebileceğini bulmuşlardır. Witten'in keşfinin gücü de işte buradadır. Onun atılımının öncesinde kolayca kontrol edemeyecekleri kadar zor denklemlerle karşılaşan sicim kuramı araştırmacıları yolda kalırlardı. Ama Witten'in çalışması, böylesi her sorunun dört matematiksel çevirisinin -dört matematiksel yeniden formülleştirmesi- olduğunu ve bazen bu yeniden formülleştirilen sorulardan birinin, diğerlerinden çok daha kolay cevaplandırılabilirdiğini gösterdi. Bu yüzden, *beş kuramı birbirine çevirmekte kullanılan sözlük bazen olanaksız derecede zor soruları göreceli olarak dabil kolay sorulara çevirmek için bir yol ortaya koyabilir.*

Ama kusursuz da değildir. Nasıl ana metindeki bazı pasajların beş dilin tümündeki çevirileri aynı derecede anlamsız olabiliyorsa, bazen beş sicim kuramındaki matematiksel tanımlar da aynı derecede anlaşılması zor olabilir. Böyle durumlarda tıpkı özgün metnin kendisine başvurduğumuz gibi, ilerleme kaydetmek için, ele geçmesi zor M-kuramını tam olarak anlamamız gerekli olur. Yine de, çoğu durumda Witten'in sözlüğü sicim kuramını çözümlemek için güçlü bir araç sağlar.

Bu nedenle, nasıl karmaşık bir metnin her çevirisi önemli bir amaca hizmet ediyorsa, her sicim formülleştirmesi de öyledir. Her perspektiften kazanılan görüşleri birleştirerek soruları cevaplayabilir ve tek bir sicim formülleştirmesinin erişiminin tümüyle uzağında olan özellikleri ortaya çıkarabiliriz. Böylelikle, Witten'in keşfi, sicim kuramının cephesini ilerletmek isteyen kuramcılara beş kat ateş gücü vermiştir. Bir devrim başlatmasının nedeni, büyük ölçüde budur.

Onbir Boyut

Öyleyse, sicim kuramını çözümlemek için yeni kazandığımız gücün ışığında ortaya çıkmış olan yeni fikirler nelerdir? Aslında çok fikir var. Ama ben yalnızca uzay ve zamanın öyküsünde en büyük etkisi olanlara odaklanacağım.

En önemlisi, Witten'in çalışmasının 1970'ler ve 1890'lerde kullanılan sicim kuramının yaklaşık denklemlerinin, evrende dokuz uzay boyutu bulunması gerektiği sonucuna varırken *gerçek boyut sayısını bir eksik bırakmış olduklarıdır*. Witten'in çözümlemesi, M-kuramına göre evrenin on uzay boyutu, yani onbir uzay zaman boyutu olduğunu gösterdi. Nasıl Kaluza beş uzay zaman boyutlu evrenin, elektromanyetizma ve kütleçekimini birleştirebilecek bir yapı ortaya koyduğunu bulduysa ve nasıl sicim kuramcıları on uzay zaman boyutlu evrenin kuantum mekaniği ve genel göreliliği birleştirebilecek bir yapı olduğunu gösterdilerse, Witten da onbir uzay zaman boyutuna sahip bir evrenin bütün sicim kuramlarını birleştirebilecek bir yapı ortaya koyduğunu buldu. Tıpkı yer düzeyinden bakıldığında birbirlerinden tümüyle ayrı gibi görünen beş köyün, bir tepeden bakıldığında -yani dikey doğrultuda yeni bir boyut için içine girdiğinde- patikalar ve yollarla birbirine bağlı olduğunun görülmesi gibi, Witten'in çözümlemesinden çıkan fazladan uzay boyutunun da, beş sicim kuramının tümünün aralarındaki bağlantıyı göstermekte yaşamsal önemi vardı.

Witten'in keşfi, daha fazla boyut üzerinden birliği sağlamak açısından tarihsel bir desene uymuş ise de, bulduğu sonucu 1995'teki yıllık uluslararası sicim kuramı konferansında açıkladığı zaman, bu alanı temelinden salladı. Benim de aralarında olduğum araştırmacılar, kullanılan yaklaşık denklemler üzerinde uzun uzun ve ayrıntılı olarak düşünmüşlerdi ve herkes çözümlemelerin boyutların sayısı hakkında son sözü söylemiş olduğundan emindi. Ama Witten şaşırtıcı bir şey bulmuştu.

Witten, bütün önceki çözümlemelerin, şimdiye kadar bilinmeyen onuncu uzay boyutunun son derece küçük, bütün diğerlerinden çok daha küçük olduğunu *varsaymaya* eşdeğer bir ma-

tematiksel basitleştirme yaptığını göstermişti. Gerçekten o kadar küçük ki, bütün araştırmacıların kullandığı sicim kuramının yaklaşık denklemleri, bu boyutun varlığının matematiksel ipuçlarını ortaya koyacak çözümleme gücünden yoksundu. Bu da, herkesin sicim kuramında yalnızca dokuz uzay boyutu olduğu sonucuna varmalarına yol açmıştı. Ama birleşik M-kuramı yapısının kazandırdığı yeni kavrayışla Witten yaklaşık denklemlerin ötesine geçebilmiş, daha derine inebilmiş ve bir uzay boyutunun sürekli olarak gözden kaçırıldığını anlamıştı. Böylece Witten, sicim kuramcılarının on yıldır geliştirmiş olduğu, on boyutlu beş yapının da, aslında onbir-boyutlu tek bir ana kuramın beş yaklaşık tanımı olduğunu göstermişti.

Bu beklenmedik kavrayışın sicim kuramındaki daha önceki çalışmaları geçersiz kılıp kılmadığını merak ediyor olabilirsiniz. Büyük ölçüde, geçersiz kılmadı. Yeni bulunan onuncu uzay boyutu kurama beklenmedik bir özellik kattı, ama eğer sicim/M kuramı doğru ise ve onuncu boyutun da diğerlerinden çok daha küçük olduğu ortaya çıkarsa -uzun bir süre boyunca farkında olmadan varsayıldığı gibi- önceki çalışmalar geçerli kalacaktır. Yine de bilinen denklemler fazladan boyutların büyüklüğünü ve ya şeklini tam olarak belirleyemedikleri için, sicim kuramcılar son birkaç yıldır yeni bir -o kadar da küçük olmayan- onuncu uzay boyutu olasılığını araştırma yolunda çok çaba harcadılar. Diğer şeylerin yanı sıra bu çalışmaların geniş erimli sonuçları, M-kuramının Şekil 13.1 de şematik olarak verilen gösterimini sağlam bir matematiksel temele oturtmuştur.

On boyuttan onbir boyuta yapılan güncellemenin -sicim/M-kuramının matematiksel yapısı açısından sahip olduğu önemden bağımsız olarak- kuramın zihninizdeki resmini büyük ölçüde değiştirmemiş olduğunu tahmin ediyorum. Hemen hemen herkes için yedi tane kıvrılmış boyutu göz önünde canlandırmaya çalışmak, altı tane boyutla neredeyse aynıdır.

Ama ikinci süpersicim devriminden gelen ikinci ve daha yakından ilgili olan bir kavrayış, sicim kuramının temel sezgisel resmini değiştirir. Aralarında Witten, Duff, Hull, Townsend ve

diğer pek çoklarının bulunduğu araştırmacıların ortak kavrayış-ları, *sicim kuramının yalnızca sicimlerin kuramı olmadığını* or-taya koymuştur.

Zarlar

Geçtiğimiz bölümde aklınıza takılmış olabilecek bir soru şu-dur: *Neden sicimler?* Tek boyutlu bileşenler neden bu kadar özeldir? Kuantum mekaniğı ve genel göreliliğı uzlaştırırken si-cimlerin nokta olmamasının, sıfırdan farklı boyutları olmasın-ın hayati önemi olduğunu bulmuştuk. Ama bu koşul, minya-tür diskler veya frizbiler şeklindeki iki-boyutlu bileşenlerce veya beyzbol toplan ya da çamurdan yapımış toplar gibi üç boyutlu bileşenlerce de karşılanır. Veya kuramda bu kadar çok uzay bo-yutu bulunduğuna göre, daha çok boyutlu benekler de varsaya-biliriz. Neden bu bileşenler temel kuramlarımızda herhangi bir rol oynamıyorlar?

1980'lerde ve 1990'ların başında sicim kuramcılarının ço-ğunun akla yakın bir cevabı var gibiydi. Diğerlerinin yanı sı-ra -yirminci yüzyıl fiziğinin Werner Heisenberg ve Paul Dirac gibi devlerinin de üzerinde çalıştığı, damlaya benzer bileşenle-re dayanan bir "maddenin temel kuramı" formülleştirme çabala-rı *olduğundan* söz ediliyordu. Ama onların çalışmaları ve arka-dan gelen diğer birçok çalışma, damla benzeri bileşenlere daya-nan ve en temel fiziksel koşulları karşılayan, örneğın kuantum mekaniğinde bütün olasılıkların 0 ile 1 arasında olmasını sağla-yan (negatif olasılıkların veya 1 'den büyük olasılıkların bir anla-mı yoktur) ve ışıktan daha hızlı haberleşmeyi yasaklayan bir ku-ram geliştirmenin son derece zor olduğunu gösterdi. 1920'lerde başlayan ve yarım yüzyıl süren araştırmalar, bu koşulların nok-ta parçacıklar tarafından (kütleçekiminin gözardı edilmesi ile) kolaylıkla karşılandığını gösterdi. 1980'lerde, Schwarz, Scherk, Green ve diğerlerinin on yıldan fazla süren araştırmaları, diğer çoğu araştırmacıyı şaşırtarak, bu koşulların tek-boyutlu bileşen-ler, yani sicimler (ki kütleçekimini *zorunlu olarak* kapsıyordu) tarafından da karşılandığını ortaya koydu. Ama iki ya da daha

fazla uzaysal boyutlu temel bileşenlere doğru ilerlemek olanaksız görünüyordu. Bunun nedeni, kısaca, denklemlerdeki simetrisinin tek-boyutlu nesneler (sicimler) için en büyük sayıya ulaşması, sonra da çok büyük hızla düşmesiydi. Buradaki simetrikler, Bölüm 8'dekilerden daha soyuttur (bir sicimin ya da daha çok boyutlu bir bileşenin hareketini incelerken, gözlemlerimizin çözümlemesini aniden ve rasgele bir şekilde değiştirecek şekilde yaklaşıp uzaklaştığımız zaman denklemlerin nasıl değişeceğiyle ilgilidir). Bu dönüşümlerin fiziksel olarak anlamlı denklemler takımları ortaya koymak açısından kritik önemi vardır. Sicimlerin ötesinde ise gerekli olan bu simetri zenginliği yokmuş gibi görünüyor.¹

Bu nedenle, Witten'in makalesinin ve ardından yağmur gibi yağın sonuçların", sicim kuramının ve onun içinde bulunduğu M-kuramsal yapının, sicimlerin yanı sıra başka bileşenleri de *olduğunun* anlaşılmasına yol açması, sicim kuramcıları için ikinci bir şok oldu. Çözümlemeler, doğal olarak *membrane* (zar) (M-kuramındaki M'nin bir diğer olası anlamı) veya (daha yüksek boyutlu akrabalarının adlandırılmasındaki sistematığe uyarak) *iki-zar* adı verilen iki boyutlu bileşenlerin varlığını gösterdi. *Üç-zar* adı verilen, üç uzay boyutuna sahip olan cisimler vardır. Her ne kadar gözde canlandırması giderek zorlaşsa da, çözümlemeler p uzay boyutuna sahip olan ve *p-zar* (p-brane) adı verilen cisimlerin de olduğunu gösteriyor. Burada p 10'dan küçük herhangi bir tamsayı olabilir. Bu yüzden sicimler, sicim kuramındaki tek bileşenler olmayıp, sicim kuramının bileşenleri arasındadırlar.

Bu diğer bileşenlerin ilk dönemlerde kuramsal olarak gözden kaçmış olmalarının nedeni onuncu uzay boyutununkiyle aynıdır: Yaklaşık sicim denklemleri onları ortaya çıkaramayacak kadar kaba yapıya kalmıştır. Sicim araştırmacılarının matematiksel olarak soruşturduğu kuramsal bağlamlarda bütün p-zarların sicimlerden önemli ölçüde daha ağır oldukları ortaya çıkıyor. Bir şey ne kadar büyük kütleli ise, onu üretmek için o kadar fazla enerji gerekir. Ama yaklaşık sicim denklemlerindeki bir sınırla-

ma -bütün sicim kuramcılarınca çok iyi bilinen ve denklemlerin yapısal olarak içinde olan bir sınırlama- denklemlerin git gitte daha fazla enerji içeren varlıkları ve süreçleri tanımlarken, giderek kesinliklerini kaybettikleridir. P-zarlara ilişkin uç enerjilerde yaklaşık denklemler, gölgelerde kalan zarları gün ışığına çıkarmak için gerekli olan kesinlikten yoksundular, bu nedenle de bunların varlığı, onlarca yıl boyunca matematiksel olarak fark edilmedi. Ama M-kuramsal yapının sağladığı çeşitli yenden ifade edişler ve yeni yaklaşımlarla araştırmacılar, önceki teknik engellerden bazılarını aşmayı başardılar ve sonunda, tüm matematiksel ayrıntılarıyla birlikte zırlara bürünmüş olan daha yüksek-boyutlu bileşenleri buldular.³

Sicim kuramında sicimlerin yanı sıra başka bileşenlerin de ortaya çıkarılması, daha önceki çalışmaların geçerliliğini, onuncu uzay boyutunun keşfinden daha fazla geçersiz kılmadı. Araştırmalar, eğer daha yüksek-boyutlu zarlar sicimlerden çok daha büyük kütleli iseler -önceki çalışmalarda bilmeden varsayıldığı gibi- kuramsal hesaplamalarda çok az etkileri olacağını gösteriyor. Ama nasıl onuncu uzay boyutu diğerlerinden çok daha küçük olmak zorunda değilse, yüksek boyutlu zarlar da çok büyük kütleli olmak zorunda değildir. Hâlâ varsayımsal olan ve yüksek boyutlu bir zarın kütesinin en düşük kütleli sicim titreşim desenleriyle eşit - olabileceği çeşitli koşullar vardır ve böyle durumlarda zar, sonuçtaki fizik üzerinde oldukça büyük bir etkiye *sahiptir*. Örneğin, Andrew Strominger ve David Morrison'la birlikte benim yaptığım çalışma, tıpkı bir greyfurtun çevresine sarılan streç naylon gibi, bir zarın kendisini bir Calabi-Yau şeklinin küresel bölümünün çevresine sarılabileceğini gösterdi; eğer uzayın o bölgesi büzülürse, çevresine sarılan zar da büzülür ve kütlesi azalır. Kütledeki bu azalmanın, uzay bölgesinin tümüyle çökerek yırtılıp açılmasına neden olacağını -uzayın kendisi açılabilir- ama çevreye sarılmış durumda olan zar sayesinde fiziksel sonuçlarda bir kargaşa ortaya çıkmayacağını göstermeyi başarabildik. Bu gelişmeyi ayrıntılı olarak *Evrenin Zarafetinde* inceledim ve zamanda yol-

culuğu inceleyeceğimiz Bölüm 15'te konuya tekrar döneceğim, o yüzden burada daha fazla ayrıntıya girmeyeceğim. Ama bu değinme, yüksek-boyutlu zarların sicim kuramının fiziği üzerinde nasıl önemli etkiler yapabileceğini açıklığa kavuşturuyor.

Şu anda dikkatimizi yoğunlaştırdığımız nokta açısından, sicim/M-kuramına göre zarların evren manzaramızı etkilemesinin derin bir yolu vardır. Evrenin büyük açılımının -bilebildiğimiz uzay zamanın bütünü- kendisi de devasa bir zardan başka bir şey olmayabilir. Yaşadığımız yer bir zar dünyası olabilir.

Zar Dünyalar

Sicimler küçük-ötesi oldukları için sicim kuramını sınamak çok güçtür. Sicimin büyüklüğünü belirleyen fiziği hatırlayalım. Kütleçekiminin haberci parçacığı -graviton- en düşük enerjili sicim titreşim desenleri arasındadır ve taşıdığı kütleçekimi kuvvetinin şiddeti de sicimin uzunluğuyla orantılıdır. Kütleçekimi böylesine zayıf bir kuvvet olduğu için, sicimin uzunluğu da çok küçük olmalıdır; hesaplamalar, sicimin graviton titreşim deseninin gözlenen şiddette bir kütleçekimi kuvveti taşıması için Planck uzunluğunun yüz katı ile yüzde biri arasında olması gerektiğini gösteriyor.

Bu açıklamaya göre, yüksek-enerjili bir sicimin küçük bir boyutla sınırlanamayacağını görüyoruz, çünkü sicim artık graviton parçacığıyla doğrudan ilişkili değildir (graviton düşük-enerjili, sıfır-kütleli bir titreşim desenidir). Aslında, bir sicime giderek daha fazla enerji yüklendiğinde, önce giderek daha şiddetle titreşecektir. Ama belirli bir noktadan sonra, fazla enerji farklı bir etki yapacaktır: Sicimin boyunun uzamasına neden olacaktır ve sicimin büyümesinin de bir sınırı yoktur. Bir sicime yeterli enerji yükleyerek makroskopik bir boyuta erişmesi bile sağlanabilir. Günümüz teknolojisiyle henüz bu noktaya yaklaşamıyoruz ama büyük olasılıkla Büyük Patlamayı izleyen çok sıcak ve aşırı yüksek enerjili ortamda uzun sicimler ortaya çıkmış olmalı. Eğer bunlardan bazıları günümüze kadar gelmeyi başarmışlarsa, gökyüzünü boydan boya kaplayacak kadar büyük olmaları beklenebilir. Böylesi-

ne uzun sicimlerin uzaydan aldığımız veriler üzerinde küçük ama belirlenebilir izler bırakmış olmaları bile olasıdır; belki de sicim kuramı böylece astronomi gözlemleriyle doğrulanabilir.

Yüksek-boyutlu p-zarlar da minik olmak zorunda değildir ve bunlar sicimlerden daha fazla boyuta sahip oldukları için, nitel olarak yeni bir olasılık ortaya koyarlar. Uzun -belki de sonsuz uzunlukta- bir sicimi gözümüzde canlandırdığımızda, gündelik yaşamımızın üç uzun boyutunda var olan tek boyutlu bir cisim düşünürüz. Göz alabildiğine uzanan bir yüksek gerilim hattı buna iyi bir örnektir. Benzer biçimde büyük -belki de sonsuz büyüklükte- bir iki-zar düşündüğümüzde, gözümüzde gündelik yaşantımızdaki üç uzun uzay boyutunun içinde var olan iki boyutlu bir cisim canlanır. Buna gerçekçi bir örnek veremiyorum ama son derece ince olan ve göz alabildiğine uzanan bir sinema perdesi fikir verebilir. Ama sıra büyük bir üç-zara geldiğinde, kendimizi nitel olarak yeni bir durumda buluruz. Üç-zarın üç boyutu vardır, bu yüzden eğer çok büyükse -belki de sonsuz büyüklükte- üç uzun uzay boyutunun tümünü *doldurur*. Yüksek gerilim hattına benzettiğimiz bir-zar ve sonsuz büyüklükteki bir sinema perdesine benzettiğimiz iki-zar bizim üç uzun uzay boyutumuzun *içinde* var olabilirken, büyük bir üç-zar bildiğimiz bütün uzayı kaplar.

Bu da ilginç bir olasılığa yol açar. Acaba şu anda bir üç-zar içinde yaşıyor olabilir miyiz? Bütün dünyası, kendisi daha yüksek boyutlu bir evrende (sinema salonunun üç uzay boyutu) var olan iki boyutlu bir perdede -iki-zarın içinde- var olan Pamuk Prenses gibi, bildiğimiz her şeyin, kendisi de sicim/M-kuramının daha yüksek boyutlu evreninin içinde bulunan, üç boyutlu bir evren içinde var olması mümkün olabilir mi? Newton'un, Leibniz'in, Mach'ın ve Einstein'ın üç boyutlu uzay dediği şey, sicim/M-kuramındaki üç-boyutlu, belirli bir varlık olabilir mi? Veya, daha görelî bir dille, Minkowski ve Einstein tarafından geliştirilen dört-boyutlu uzay zaman, aslında zaman içinde evrilen bir üç-zarın uyanışı olabilir mi? Kısacası, bildiğimiz evren bir zar olabilir mi?⁴

Bir üç-zar içinde yaşıyor olabileceğimiz olasılığı *-zar dünyaları senaryosu-* sicim/M-kuramınm öyküsündeki en son dönemeçtir. Göreceğimiz gibi, bu durum sicim/M-kuramı hakkında, çok sayıda uzak-erimli kollara ayrılan, nitel olarak yeni bir düşünüş yolu ortaya koyar. Temel fizik olarak zarlar bir tür kozmik Velcro gibidir, şimdi inceleyeceğimiz özel anlamda çok yapışkandırılar.

Yapışkan Zarlar ve Titreşen Sicimler

"M-kuramı" teriminin ortaya atılmasının arkasındaki itici güçlerden biri, artık "sicim kuramı"nın, kuramın pek çok bileşenlerinden yalnızca birine ışık tuttuğunu anlamış olmamızdır. Kuramsal çalışmaların bir-boyutlu sicimleri ortaya çıkarması, daha ileri düzeydeki çözümlemelerin daha yüksek-boyutlu zarları ortaya çıkarmasından onyıllar önce olduğu için, "sicim kuramı" tarihsel bir sanat eseri gibidir. Ama her ne kadar M-kuramı, içinde çeşitli boyutların temsil edildiği bir demokrasi sergilemekten de, sicimler şimdiki formüleştirmemizde hala en önemli rolü oynuyorlar. Bu hemen açık olarak görülür. Eğer bütün yüksek-boyutlu p -zarlar sicimlerden çok daha ağır iseler, o zaman araştırmacıların bilmeden 1970'lerden beri yaptığı gibi, ihmal edilebilirler. Ama sicimlerin eşitler arasında birinci olmalarının daha genel bir diğer yolu vardır.

1995'te, Witten in keşfini açıklamasından kısa bir süre sonra Santa Barbara'daki Kaliforniya Üniversitesi'nden Joe Polchinski düşünmeye başladı. Yıllar önce Robert Leigh ve Jin Dai ile yazdığı bir makalede Polchinski, sicim kuramının ilginç ama anlaşılması oldukça güç bir özelliğini keşfetmişti. Polchinski'nin itici gücü ve düşünüş şekli teknikti, ayrıntılar konumuz için önemli olmamakla birlikte, ulaştığı sonuçlar önemlidir. Polchinski belirli bazı durumlarda, açık sicimlerin uçlarının -bunların iki ucu açık sicim parçaları olduğunu hatırlayın- tam bir serbestlik içinde hareket edemediğini bulmuştu. Nasıl telin üzerindeki bir boncuk hareket etmekte özgür olduğu halde yalnızca teli izleyebilirse veya nasıl bir bilyardo topu masanın iki boyutlu yü-

zeyinde hareket ederse, açık bir sicimin uçları da hareket etmek-
te özgür olmakla birlikte, uzayda belirli bazı şekillerde hareket
edebilir. Polchinski ve çalışma arkadaşları, sicimin titreşmekte
özgür olmakla birlikte uçlarının uzayda bazı bölgelerde "yapı-
şık" veya "hapis" kaldığını göstermişti.

Bazı durumlarda bu bölge tek-boyutlu olabilir, bu durumda
sicimin uçları tıpkı telin üzerinde kayan iki boncuk gibi, sici-
min kendisi ise boncukları birleştiren kordon gibi düşünülebi-
lir. Başka durumlarda, bölge iki boyutlu olabilir; sicimin uçla-
rı birbirine bir kordonla bağlı olan ve masanın yüzeyinde hare-
ket eden iki bilardo topu gibi olabilir. Daha başka durumlarda-
ysa, bölge üç, dört veya ondan az olmak üzere herhangi bir bo-
yutta olabilir. Polchinski ve aynı zamanda Petr Horava ve Mic-
hael Green tarafından da gösterilen bu sonuçlar, açık ve kapalı
sicimlerin karşılaştırılmasına ilişkin uzun zamandır ortada olan
bilmecenin çözülmesine yardımcı oldular, amayıllar boyunca bu
çalışma çok az ilgi çekti.⁵ 1995 Ekiminde, önceki dönemden ka-
lan bu görüşleri Witten'in yeni keşiflerinin ışığı altında yeniden
düşünmeyi bitirdiğinde bu değişti.

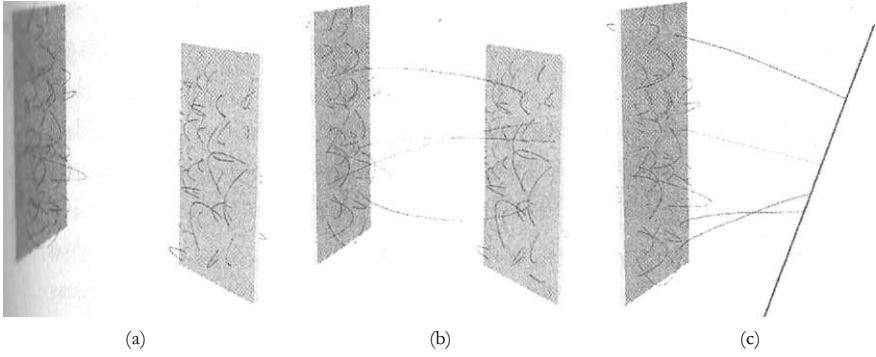
Polchinski'nin önceki makalesinin tam bir cevap vermeden
bıraktığı bir soru, son paragrafı okurken belki sizin de aklını-
za gelmiş olabilir: Eğer açık sicimlerin uçları uzayda bazı böl-
gelerde yapışksa, *acaba bunların yapıştığı yer nedir?* Teller ve
bilardo masaları, onlar boyunca veya onların yüzeyinde hare-
ket eden boncuklardan veya bilardo toplarından bağımsız ola-
rak, algılanabilir varlıklardır. Ya sicimlerin uçlarının yapışık ol-
duğu uzay bölgeleri? Acaba bu bölgeler sicimlerin serbest uçla-
rının hareketlerini kiskançlıkla kısıtlayan, sicim kuramının ba-
ğımsız ve temel bir bileşeni ile mi doludur? Sicim kuramının yal-
nızca sicimlerin kuramı olduğunun düşünüldüğü 1995 öncesin-
de bu iş için hiç aday yokmuş gibi duruyordu. Ama Witten'in
atılımı ve onun esinlediği, yağmur gibi yağın sonuçlardan son-
ra Polchinski cevabı açık olarak gördü: Eğer açık sicimlerin uç-
ları uzayın p -boyutlu bir bölgesinde hareket etmek üzere kısıt-
lanıyorlarsa, o zaman, uzayın o bölgesi bir p -zar tarafından dol-

durulmuş olmalıydı.* Polchinski'nin hesapları, yeni keşfedilen p -zarların, sicimlerin açık uçlarını kurtulamayacakları şekilde yakalayıp, onları doldurdukları uzayın p -boyutlu bir bölgesinde hareket etmek üzere kısıtlamak için uygun özelliklere sahip olduklarını gösterdi.

Bunun ne anlama geldiğini daha iyi hissetmek için, Şekil 13.2 ye bakın, (a)'da birkaç tane iki-zar görüyoruz, hareket eden ve titreşen sicimlerden hepsinin uçları zarların içinde hareket edecek şekilde kısıtlanmış. Her ne kadar çizmek giderek zorlaşsa da, daha yüksek-boyutlu zarlarda durum aynıdır. Açık sicim uçları p -zarın içinde ve üzerinde hareket edebilir, ama zarı terk edemezler. Zar dışına çıkarak hareket etme olasılığına gelince, zarlar düşünülebileceğiniz en yapışkan şeylerdir. Açık bir sicimin bir ucunun bir p -zarda, diğerinin, ilkiyle aynı boyutta olabileceği (Şekil 13.2b) veya olmayabilecek (Şekil 13.2c) bir başka p -zarda olma olasılığı da vardır.

Polchinski'nin yeni makalesi, Witten'in çeşitli sicim kuramları arasındaki ilişkilerle ilgili keşfine, ikinci süpersicim devrimi için bir eş manifesto sağladı. Yirminci yüzyıl kuramsal fiziğinin üstün zekalarından bazıları, temel bileşenlerinin boyutları noktalarinkinden (sıfır boyut) veya sicimlerinkinden (bir boyut) daha yüksek olan bir kuram geliştirmeye çalışıp başarısız olurken, Witten'in ve Polchinski'nin bulduğu sonuçlar, günümüzün önde gelen araştırmacılardan gelen önemli fikirlerin de katkısıyla ilerlemeye giden yolu açtı. Bu fizikçiler sicim/M-kuramının daha yüksek-boyutlu bileşenler içerdiğini ortaya çıkarmakla kalmadılar, özellikle Polchinski'nin fikirleri bu bileşenlerin ayrıntılı fiziksel özelliklerini kuramsal olarak çözümlemenin de yolunu gösterdi (eğer varlıkları kanıtlanırsa). Polchinski, bir zarın özelliklerinin büyük ölçüde uç noktaları bu zarın içinde olan titreşen açık sicimlerin özellikleri tarafından belirlendiğini ileri sürdü. Nasıl bir halının tüyleri -bir uçları halı-

* Bu yapışkan varlıkların tam adı Dirichlet p -zarları veya kısaca D - p -zarlarıdır. Biz daha kısa olan p -zar adını kullanacağız.



Şekil 13.2 (a) uçları iki boyutlu zarlara tutunmuş açık sicimler (b) Bir iki boyutlu zarla diğer bir iki boyutlu zar arasında gerilmiş sicimler (c) İki boyutlu bir zarla tek boyutlu bir arasında gerilmiş sicimler

nın sırt dokusuna bağlı olan yün parçaları- üzerinde elinizi gezdirerek o halı hakkında pek çok şey öğrenebilirsiniz, bir zarın pek çok özelliği de bir uçları bu zarın içinde olan sicimler incelenerek belirlenebilir.

Bu, çok önemli bir sonuçtu. On yıllarca süren araştırmalar sonucunda tek-boyutlu cisimleri -sicimleri- incelemek için üretilen kesin matematiksel araçların, daha yüksek-boyutlu cisimleri, p-zarları incelemek için de kullanılabileceğini gösteriyordu. Bu durumda Polchinski de harika bir şekilde yüksek-boyutlu cisimleri çözümlemenin, büyük ölçüde, hâlâ varsayımsal olsa da bilindik sicimlerin çözümlenmesine indirgendığını ortaya çıkardı. İşte sicimlerin eşitler arasında birinci olmasının anlamı budur. Eğer sicimlerin davranışlarını anlayabilirsiniz, o zaman p-zarların davranışını anlamak konusunda da çok yol kat etmişsiniz demektir.

Bu görüşlerle şimdi zar dünyaları senaryosuna -hepimizin bütün hayatımızı bir üç-zarın içinde yaşıyor olabileceğimiz olasılığına- geri dönelim.

Bir Zar Olarak Evrenimiz

Eğer bir üç-zarın içinde yaşıyorsak, eğer dört boyutlu uzay zamanımız üç-zarın zamanda sürüklenmesinin tarihinden baş-

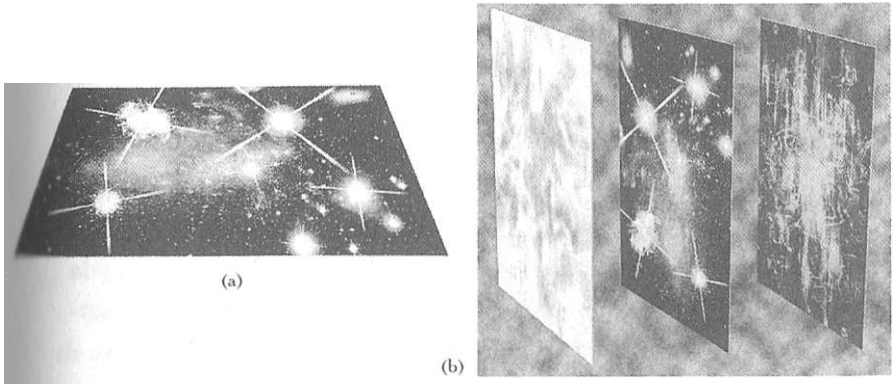
ka bir şey değilse, uzay zamanın bir şey olup olmadığı yolunda ki önemli soruya yeni ve parlak bir ışık tutulmuş olur. Bildiğimiz dört boyutlu uzay zaman bulanık ya da soyut bir fikirden değil, sicim/M-kuramındaki gerçek, fiziksel bir varlıktan, bir üç-zardan çıkar. Bu yaklaşımda dört boyutlu uzay zamanımızın gerçekliği, bir elektronun veya bir kuarkın gerçekliğiyle eşdeğerdir. (Elbette hâlâ içinde sicimlerin ve zarların var olduğu daha geniş uzay zamanın -sicim/M-kuramının onbir boyutunun kendisinin bir varlık olup olmadığını sorabilirsiniz; ama doğrudan yaşadığımız uzay zaman arenasının gerçekliği açıktır.) Ama eğer haberdar olduğumuz evren gerçekten bir üç-zar ise eğer, kısa bir göz atışla bile bir şeyin içinde olduğumuz, bir üç-zar içinde olduğumuz ortaya çıkmayacak mıdır?

Modern fiziğin, içine gömülü olabileceğimizi söylediği şeyleri -bir Higgs okyanusu, karanlık enerjiyle dolu uzay, çok büyük sayıda kuantum alan dalgalanmaları- zaten öğrenmiştik. Bunların hiçbirisi insan algıları tarafından doğrudan fark edilmez. Bu yüzden sicim/M-kuramının, "boş"uzayı doldurmuş olabilecek gözle görülmeyen şeyler listesine yeni bir aday eklediğini öğrenmek sizi şaşırtmasın. Ama şövalyelik yapmayalım. Önceki her olasılığın fizikteki etkisini ve gerçekten var olup olmadığını nasıl kanıtlayacağımızı anlıyoruz. Gerçekten, bu üçünden ikisinin -karanlık enerji ve kuantum salınımları- varlığını destekleyen güçlü kanıtların toplandığını zaten görmüştük; Higgs alanı için kanıtlar da şu anda çalışmakta olan ve gelecekte planlanan hızlandırıcılarda aranıyor ve aranmaya devam edecek. Acaba bunlara karşılık bir üç-zar içindeki hayat konusunda durum ne? Eğer zar-dünya senaryosu doğru ise, o zaman neden bu üç-zarı görmüyoruz ve varlığını nasıl kanıtlayacağız?

Cevap, zar dünyaları bağlamında sicim/M-kuramının fiziksel anlamının, önceki "zar olmayan" senaryolardan hangi temel değişiklikleri gösterdiğine ışık tutar. Örnek olarak ışığın hareketini -fotonların hareketini- göz önüne alalım. Sicim kuramında, sizin de bildiğiniz gibi, foton özel bir sicim titreşim deseni- dir. Daha açık anlatımla, matematiksel çalışmalar zar dünyalar

senaryosunda fotonları kapalı sicim titreşimlerinin değil, yalnız açık sicim titreşimlerinin ürettiğini gösterdi ki, bu da büyük bir fark yaratır. Açık sicimlerin uç noktaları eğer bir üç-zar içinde hareket edecek şekilde sınırlandırılmamışsa tümüyle serbesttirlirler. Bu da fotonların (foton oluşturacak şekilde titreşen açık sicimlerin) üç-zarımızın içinde hiçbir engelle karşılaşmadan, hareket edecekleri anlamına gelir. Bu da zarı, içinde bulunduğumuzu görmemizi engelleyecek şekilde *tümüyle saydam -tümüyle görünmez-* yapar.

Aynı derecede önemli bir nokta da şudur: Açık sicimlerin uç noktaları zar dışına çıkamadığından, fazladan boyutlarda hareket edemezler. Tıpkı telin, üzerinde hareket eden boncukları; bilyardo masasının, üzerinde hareket eden topları sınırladığı gibi, yapışkan üç-zarımız da fotonların *yalnızca* üç uzaysal boyutumuzda hareket etmelerine izin verir. Fotonlar elektromanyetizmanın haberci parçacıkları olduğu için, bunun anlamı, elektromanyetik kuvvetin -ışığın- Şekil 13.3'te gösterildiği gibi (çizebilmek için iki boyutta gösterdik) üç boyutumuzda hapsedilmiştir.



Şekil 13.3 (a) Zar dünyalar senaryosunda fotonlar, uçları zar içinde olan açık sicimlerdir, o yüzden bunlar -yani ışık- zarı terk edemez, (b) Zar dünyamız, gördüğümüz ışık bizim zarımızı terk edemediği için bize görünmeyen, daha geniş bir fazladan boyutlar ortamında yüzüyor olabilir. Yakınlarda yüzen başka zar dünyalar da olabilir.

Bu, önemli sonuçları olan yoğun bir kavrayıştır. Daha önce-leri sicim/M-kuramının fazladan boyutlarının sıkıca kıvrılmış ol-malarının gerektiğini söylemiştik. Bunun açık nedeni, bu boyut-ları göremediğimiz için, gizli olmalarının gerekmesiydi. Bu bo-yutları gizlemenin bir yolu da, bunları bizim araçlarımızın gö-remeyeceği kadar küçültmektir. Ama gelin şimdi zar dünyala-rı senaryosunu yeniden gözden geçirelim. Nesneleri nasıl algıla-rız? Gözlerimizi kullandığımızda elektromanyetik kuvveti kul-lanırız; elektron mikroskobu gibi güçlü araçları kullandığımız-da da elektromanyetik kuvveti kullanırız; atom çarpıştırıcıları-nı kullandığımızda, küçük-ötesi şeyleri belirlemek için kullandı-ğımız kuvvet yine elektromanyetik kuvvettir. Ama eğer elektro-manyetik kuvvet bizim üç-zarımıza, üç uzay boyutumuzda hap-solmuş durumdaysa, büyüklükleri ne olursa olsun fazladan bo-yutları *araştıramaz*. *Eğer fazladan boyutlar bildiğimiz uzay bo-yutları kadar büyük olsa bile*, fotonların bizim boyutlarımızdan kaçıp fazladan boyutlara girmesi, daha sonra gözümüze veya kullandığımız araca girerek bizim bu boyutların varlığından ha-berdar olmamızı sağlamaları olası değildir.

Bu yüzden eğer bir üç-zarın içinde yaşıyorsak, fazladan bo-yutlardan neden haberdar olmadığımız konusunda alternatif bir açıklamamız var. Fazladan boyutlar son derece küçük olmak zo-runda değil. Büyük olabilirler. Görüş şeklimizden ötürü onla-rı görmüyoruz. Bildiğimiz üç boyutun dışına çıkamayan elekt-romanyetik kuvveti kullanarak görüyoruz. Su üstünde yüzmek-te olan bir yaprağın üzerinde yürürken görünen yüzeyin altında-ki derin sulardan habersiz olan bir karınca örneği, Şekil 13.3b'te görüldüğü gibi, büyük, geniş, daha yüksek-boyutlu bir uzayda yüzüyor olabiliriz ama -sonsuz kadar bizim boyutlarımıza hap-solmuş olan- elektromanyetik kuvvet bunu ortaya çıkaramaz.

Tamam, diyebilirsiniz, ama elektromanyetik kuvvet doğada-ki dört kuvvetten yalnızca biri. Ya diğer üçü? Onlar fazladan boyutlara girerek bu boyutların varlığını ortaya çıkarabilir mi? Güçlü ve zayıf nükleer kuvvetler için cevap yine hayırdır. He-saplamalar, zar dünyalar senaryosunda, bu kuvvetlerin haberci

parçacıkları olan W ve Z parçacıklarının da açık-sicim titreşim desenlerinden kaynaklandığını göstermiştir, o nedenle bu parçacıklar da tıpkı fotonlar gibi hapsolmuş durumdadır; güçlü ve zayıf nükleer kuvvetleri içeren süreçler de fazladan boyutlara karşı aynı derecede kördür. Aynı şey madde parçacıkları için de geçerlidir. Elektronlar, kuarklar ve bütün diğer parçacık türleri de uçları hapsolmuş olan açık sicimlerin titreşimlerinden kaynaklanırlar. *Bu nedenle; ben, siz ve gördüğümüz her şey bizim üç-
zânımızda* kalıcı olarak hapsolmuş durumdadır. Zamanı da göz önüne alırsak, her şey bizim dört boyutlu uzay zaman dilimimizin içine hapsolmuş durumdadır.

Ya da hemen hemen her şey. Kütleçekimi kuvveti için durum farklıdır. Zar dünyalar senaryosundaki matematiksel çözümler, gravitonların tıpkı daha önce incelediğimiz zar-dışı senaryolarda olduğu gibi, kapalı sicimlerin titreşimlerinden kaynaklandığını gösteriyor. Kapalı sicimler -uç noktaları olmayan sicimler- zarlar tarafından hapsedilemez. Bunlar zarları terk edebilir, üzerlerinde veya içlerinde serbestçe hareket edebilir. Bu yüzden, eğer bir zar içinde yaşıyorsak, fazladan boyutlardan tam olarak kopmuş sayılmayız. Kütleçekimi kuvveti aracılığıyla fazladan boyutları hem etkileyebilir, hem de onlar tarafından etkilenebiliriz. Böyle bir senaryoda kütleçekimi, üç boyutumuzun ötesiyle etkileşebilmemizin tek yoludur.

Fazladan boyutlardan kütleçekimi kuvveti aracılığıyla haberdar olabilmemiz için bu boyutların ne kadar büyük olmaları gerekir? Bu, ilginç ve kritik bir sorudur. Öyleyse, bir göz atalım.

Kütleçekimi ve Fazladan Boyutlar

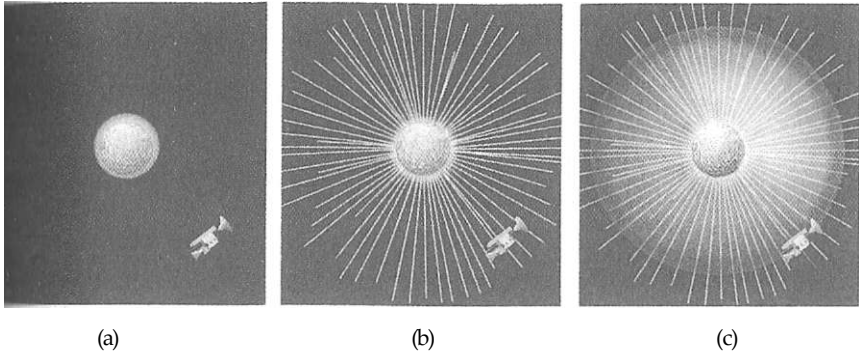
1687'de Newton evrensel kütleçekimi yasasını ileri sürdüğünde aslında uzay boyutlarının sayısı konusunda güçlü bir saptama yapıyordu. Newton yalnızca iki cisim arasındaki çekim kuvvetinin cisimler birbirlerinden uzaklaştıkça azalacağını söylemekle kalmamıştı, iki cisim birbirinden uzaklaştıkça çekim kuvvetinin nasıl azalacağını kesin bir şekilde tanımlayan bir formül, *bir ters kare yasası* ortaya koymuştu. Bu formüle göre eğer cisimler

arasındaki uzaklık iki katına çıkarsa aralarındaki çekim kuvveti 4 (2^2) kat azalır; eğer uzaklık üç katına çıkarsa çekim kuvveti 9 (3^2) kat azalır; eğer uzaklık dört katına çıkarsa, çekim kuvveti 16 (4^2) kat azalır; daha genel olarak çekim kuvveti uzaklığın karesiyle azalır. Son birkaç yüz yıldır açıkça kanıtlandığı gibi, bu formül işliyör.

Ama acaba *neden* kuvvet uzaklığın karesiyle orantılı? Neden kuvvet uzaklığın kübüyle (uzaklık iki katına çıktığında kuvvet 8 kat azalır) veya dördüncü kuvvetiyle (uzaklık iki katına çıktığında kuvvet 16 kat azalır) azalmıyor ya da örneğin kuvvet uzaklığın kendisiyle ters orantılı (uzaklık iki katına çıktığında kuvvet yarıya düşer) değil? Cevap doğrudan uzay boyutlarının sayısına bağlıdır.

Bunu görmenin bir yolu, iki cisim tarafından salınan ve soğurulan gravitonların sayısının bu iki cismin arasındaki uzaklığa nasıl bağlı olduğunu veya her iki cismin gördüğü uzay zaman eğriliğinin aralarındaki uzaklık arttıkça nasıl azaldığını düşünmektir. Ama gelin, bizi çabucak ve sezgisel bir biçimde doğru cevaba ulaştıracak olan daha basit ve daha eski moda bir yaklaşım deneyelim. Şekil 3.1'in bir çubuk mıknatısın yarattığı manyetik alanı şematik olarak gösterdiği gibi, büyük kütleli bir cismin, diyelim ki Güneş'in yarattığı kütleçekimi alanını şematik olarak gösteren bir şekil (Şekil 13.4a) çizelim. Manyetik alan çizgileri çubuk mıknatısın kuzey kutbundan güney kutbuna doğru giderken, kütleçekimi alanı çizgilerinin her yönde ışınsal olarak yayıldığına ve yayılmaya devam ettiğine dikkat edin. Belirli uzaklıktaki başka bir cismin -varsayalım yörüngede dönmekte olan bir uydunun- hissedeceği kütleçekimi kuvveti, o cismin konumundaki alan çizgilerinin yoğunluğu ile orantılıdır. Eğer uyduya Şekil 13.4b'deki gibi daha fazla sayıda alan çizgisi girerse, cismin üzerindeki kütleçekimi kuvveti de o oranda artar.

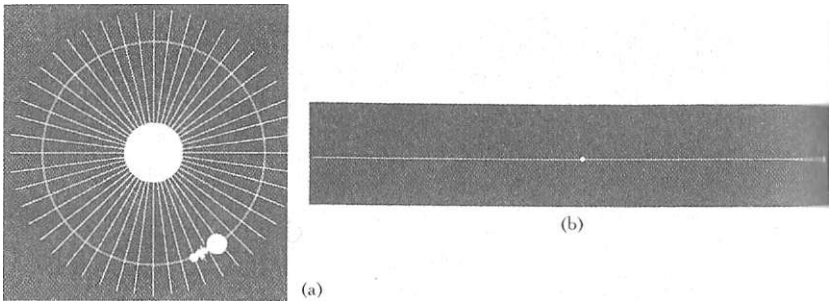
Şimdi artık Newton'ın ters kare yasasının kökenini açıklayabiliriz. Şekil 13.4c'deki gibi, merkezi Güneş'in merkezinde olan ve yüzeyi uydunun konumundan geçen hayali bir kürenin yüzey alanı -üç boyutlu uzaydaki herhangi bir kürenin yüzey alanı gi-



Şekil 13.4 (a) Güneş'in uydusu gibi bir cisim üzerine uyguladığı kütleçekimi kuvveti aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Bunun nedeni Güneş'in kütleçekimi alan çizgilerinin bir örnek biçimde (b)'deki gibi dağılması ve bu yüzden d uzaklığındaki yoğunluğunun, d yarıçaplı bir kürenin yüzey alanıyla ters orantılı olmasıdır -bu, şematik olarak (c)'de gösterildiği gibi- temel geometrinin d^2 ile orantılı olduğunu gösterdiği bir alandır.

bi- kürenin yarıçapının *karesiyle*, bu örnekte Güneş'le uydusu arasındaki uzaklığın *karesiyle* orantılıdır. Bu da küre yüzeyinden geçen alan çizgilerinin yoğunluğunun -alan çizgilerinin toplam sayısının kürenin yüzey alanına bölümünün- Güneş-uydusu uzaklığının karesiyle azalacağı anlamına gelir. Eğer bu uzaklık iki katına çıkarsa, aynı sayıdaki alan çizgileri dört kat daha büyük bir alana dağılacak, bu yüzden de bu uzaklıktaki kütleçekimi kuvveti dört kat daha az olacaktır. Bu nedenle Newton'un kütleçekimine ilişkin ters kare yasası, üç boyutlu uzaydaki kürelerin geometrik özelliklerinin bir yansımasıdır.

Eğer evrende iki veya yalnızca bir uzay boyutu olsaydı acaba Newton'ın formülü nasıl değişirdi? Şekil 13.5a'da iki boyutlu bir güneş ve çevresinde dolanan uydusu görülüyor. Görebileceğiniz gibi, verilen herhangi bir uzaklıkta güneşin kütleçekimi alanının çizgileri, kürenin bir düşük boyuttaki benzeri olan çember üzerine dağılıyor. Çemberin çevresi, yarıçapla orantılı olduğundan (yarıçapın karesiyle değil), eğer güneş-uydusu uzaklığı iki katına çıkarsa alan çizgilerinin yoğunluğu 2 faktörüyle azalacak (4 değil), ve bu yüzden de güneşin kütleçekimi kuvveti yarıya düşecektir (dörtte bire değil). Eğer evrende yalnızca iki uzay boyutu olsaydı, kütleçekimi kuvveti uzaklığın karesiyle değil, uzaklıkla



Şekil 13.5 (a) Yalnızca iki uzay boyutuna sahip olan bir evrende kütleçekimi uzaklıkla ters orantılı olarak azalır çünkü kütleçekimi alan çizgileri, çevresi yarıçapıyla orantılı olan bir çember üzerine dağılacaktır, (b) Bir uzay boyutuna sahip olan bir evrende kütleçekimi alan çizgileri dağılacak bir yer bulamayacaklarından, kütleçekimi, uzaklıktan bağımsız olarak sabittir.

ters orantılı olacaktı.

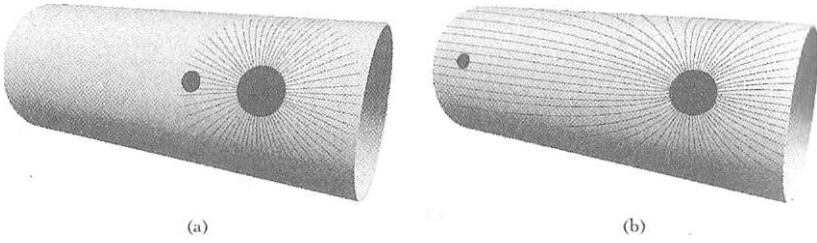
Eğer evrende Şekil 13.5'te görüldüğü gibi yalnızca bir uzay boyutu olsaydı, kütleçekimi yasası daha da basit olacaktı. Kütleçekimi alan çizgileri yayılacak alan bulamayacağı için, kütleçekimi uzaklıkla azalmayacaktı. Eğer güneşle uydu arasındaki uzaklığı iki katına çıkarsaydınız (böyle cisimlerin benzerlerinin böyle bir evrende var olduğunu varsayarak) uyduya giren alan çizgisi sayısı değişmeyeceği için iki cisim arasındaki kütleçekimi kuvveti değişmeyecekti.

Her ne kadar çizmek olanaksız olsa da, Şekil 13.4 ve Şekil 13.5'te gösterilen desen, doğrudan dört, beş, altı veya herhangi bir sayıda uzay boyutu olan bir evrene genişletilebilir. Uzay boyutlarının sayısı ne kadar artarsa, kütleçekimi alan çizgileri dağılacak o kadar fazla yer bulur. Ne kadar çok dağılırlarsa da, kütleçekimi artan uzaklıkla o kadar hızlı düşer. Dört uzay boyutunda Newton'un yasası bir ters küp yasası olurdu (uzaklık iki katına çıktığında kuvvet 8 kat azalır); beş uzay boyutunda ters dördüncü kuvvet yasası olurdu (uzaklık iki katına çıktığında kuvvet 16 kat azalır); altı uzay boyutunda ters beşinci kuvvet yasası olurdu (uzaklık iki katına çıktığında kuvvet 32 kat azalır); daha fazla boyutlu evrenlerde de bu böyle sürüp gider.

Newton yasasının ters kare versiyonunun çok miktardaki ve-riyi -gezegenlerin hareketinden kuyrukluysıldızların yörüngeleri-

ne- açıklamaktaki başarısının, üç boyutlu bir evrende yaşamakta olduğumuzun bir kanıtı olduğunu düşünebilirsiniz. Ama bu acele varılmış bir karar olur. Ters kare yasasının astronomi ölçeklerinde⁶ ve yer ölçeklerinde işlediğini biliyoruz, bu da, böyle ölçeklerde üç uzay boyutumuzun olduğu gerçeğiyle uyuyor. Ama bu yasanın daha küçük ölçeklerde işlediğini biliyor muyuz? Kütleçekiminin ters kare yasası mikro evrenin hangi ölçeklerine kadar sınılandı? Deneyciler yasayı milimetrenin onda birine kadar doğruladılar; eğer iki cisim birbirlerine milimetrenin onda biri kadar yaklaştırılırsa, veriler bunların aralarındaki kütleçekimi kuvvetinin ters kare yasasına uyduğunu gösteriyor. Ama şimdiye kadar ters kare yasasını daha kısa ölçeklerde sınamanın önemli teknik güçlükleri olduğu ortaya çıktı (kuantum etkileri ve kütleçekiminin zayıflığı deneyleri karmaşık hale getiriyor). Ters kare yasasından sapmalar, fazladan boyutlar konusunda ikna edici bir sinyal olacağından bu, kritik bir konudur.

Bunu açıkça görmek için kolayca çizebileceğimiz ve çözümleyebileceğimiz, daha düşük boyutlu bir oyuncakla çalışalım. Bir uzay boyutuna sahip bir evrende yaşadığımızı veya hem yalnızca bir boyut gözle görülebilir olduğu için, hem de yüzyıllardır yapılan deneyler kütleçekiminin cisimlerin arasındaki uzaklıkla değişmediğini gösterdiği için öyle sandığımızı varsayın. Ama aynı zamanda bütün o yıllar boyunca deneycilerin kütleçekimi yasasını yalnızca milimetrenin onda birine kadar sınayabildiğim de varsayın. Daha küçük uzaklıklar için kimsenin elinde bir veri bulunmuyor olsun. Şimdi evrenin yalnızca bir avuç kuramsal fizikçiden başka kimsenin bilmediği, kıvrılmış, ikinci bir boyutu daha olduğunu düşünün. Bu, evrenimizi Şekil 12.5'te görülen, Philippe Petit'nin gerilmiş halatına benzetir. Bu, acaba gelecekteki daha hassas kütleçekimsel deneyleri nasıl etkileyecektir? Şekil 13.6'ya bakarak bu soruya bir cevap verebiliriz. İki minik cisim birbirine yeterince -kıvrılmış boyutun çevresinden daha fazla-yaklaştırıldığında, uzayın iki-boyutlu karakteri anında ortaya çıkar, çünkü o ölçeklerde kütleçekimi alan çizgilerinin dağılacağı yer *vardır* (Şekil 13.6a). İki cisim birbirine yeterince



Şekil 13.6 (a) Cisimler yakın olduğunda kütleçekimi, iki uzay boyutuna sahip evrende olduğu gibi, değişir, (b) Cisimler daha uzak olduğunda kütleçekimi bir uzay boyutuna sahip bir evrendeki gibi davranır, yani sabit kalır.

yaklaştırıldığı zaman, kütleçekimi kuvveti uzaklıktan bağımsız olmak yerine, uzaklığın tersiyle orantılı olarak değişir.

Bu nedenle, eğer böyle bir evrende deneyci olsaydınız ve kütleçekimini ölçmek üzere kesin ve hassas yöntemler geliştirmiş olsaydınız, bulacağınız sonuç bu olurdu. İki cisim birbirine çok yakın, kıvrılmış boyutun büyüklüğünden daha yakın olduğu zaman, aralarındaki kütleçekimi kuvveti, tam da iki uzay boyutuna sahip olan bir evrenden bekleyebileceğiniz gibi, uzaklıklarıyla orantılı olarak azalacaktı. Ama o zaman, cisimlerin aralarındaki uzaklık, kıvrılmış boyutun çevresi kadar olduğunda, her şey değişecekti. Bu uzaklığın ötesinde kütleçekimi alan çizgileri daha fazla dağılamayacaktı. İkinci, kıvrılmış boyutta dağılabilecekleri kadar dağılacaklar ve bir sınıra, bir doyma noktasına ulaşacaklardı. Bu uzaklıktan itibaren kütleçekimi Şekil 13.6b de gösterildiği gibi uzaklıkla azalmayacaktı. Bu doyma noktasını eski bir evdeki su tesisatına benzetebilirsiniz. Siz tam banyoda saçınızdaki şampuanı durulayacakken, birisi mutfak musluğunu açtığında, su iki çıkışa dağılacığından su basıncı düşebilir. Başka biri çamaşırhanedeki musluğu açarsa su üç musluğa dağılacığından basınç daha da düşer. Ama evdeki tüm musluklar açıldıktan sonra artık su basıncı sabit kalacaktır. Her ne kadar beklediğiniz rahatlatıcı, yüksek basınçlı duşu sağlamasa da, su dağılabileceği bütün "fazladan" çıkışlara zaten dağılmış olduğundan basınç daha fazla düşmez. Benzer biçimde, kütleçekimi alanı bir

kez fazladan, kıvrılmış boyutlara tümüyle dağıldıktan sonra, artık uzaklıkla daha fazla azalmayacaktır.

Elinizdeki verilerden iki şey çıkarırdınız. Birincisi, cisimler birbirine çok yakın olduğunda kütleçekimi kuvvetinin uzaklıkla orantılı olarak azaldığı gerçeğinden evrenin bir değil *iki uzay* boyutuna sahip olduğunu anlardınız, ikincisi, kütleçekimi özel bir uzaklıktan sonra yüzyıllardır yapılan deneyler sonucunda sabit olarak bulunduğu göre, bu boyutlardan birinin kıvrılmış olduğuna ve büyüklüğünün de bu özel uzaklık kadar olduğu sonucuna varırdınız. Bu sonuçla da hemen hemen her sorgulamanın üzerinde gibi görünen, çok temel bir şey olan uzayın boyutlarının sayısı konusundaki yüzlerce, belki de binlerce yıllık inanışı alt-üst etmiş olurdunuz. Her ne kadar göz önünde canlandırma kolaylığı açısından bu öykünün daha düşük-boyutlu bir evrende geçmesini sağladıysam da, durum buna çok benzer olabilir. Yüzlerce yıldır yapılan deneyler kütleçekiminin uzaklığın küresiyle azaldığını göstermiş, bu da üç uzay boyutu bulunduğu konusunda güçlü bir kanıt ortaya koymuştur. Ama 1998 yılına kadar hiçbir deney kütleçekiminin milimetreden daha küçük uzaklıklardaki gücünü ölçmemişti (bugün, söz edildiği gibi, bu sınır milimetrenin onda birine kadar inmiştir). Bu da Stanford'dan Savaş Dimopoulos, şimdi Harvard'da olan Nima Arkani-Hamed ve New York Üniversitesi'nden Gia Dvali'nin, *zar dünyaları senaryosunda fazladan boyutların milimetrenin onda biri kadar olabileceğini ve yine de saptanamayabileceğini* öne sürmelerine yol açtı. Bu köktenci öneri, bazı deney gruplarının ters kare yasasının ihlal edildiğini bulmak ümidiyle milimetre altı uzaklıklarda kütleçekimini incelemeye başlaması için esin kaynağı oldu. Şimdiye kadar, milimetrenin onda biri ölçeğine kadar herhangi bir şey bulunamadı. Bu yüzden, günümüzün olağanüstü hassasiyetteki kütleçekimi deneyleriyle bile, *eğer bir üç-zar içinde yaşıyorsak, fazladan boyutlar milimetrenin onda biri kadar olabilir ve biz yine de onları fark etmeyebiliriz.*

Bu, son on yılda ulaşılan en çarpıcı kavrayışlardan biridir. Kütleçekimi dışındaki üç kuvveti kullanarak bir metrenin mil-

yar kere milyarda birine (10^{-18}) kadar inebiliriz ve hiç kimse fazladan boyutlara ilişkin bir ipucu bulamamıştır. Ama zar dünyalar senaryosuna göre, kütleçekimi dışındaki kuvvetler zarın kendisine hapsolmuş durumda olduklarından, fazladan boyutların araştırılmasında rol oynayamazlar. Yalnızca kütleçekimi fazladan boyutların doğası konusunda fikir verebilir ve fazladan boyutlar bir insan saçı kadar kalın olabilir ama yine de en hassas aletlerle bile saptanamayabilirler. Şu anda hemen sizin yanı başınızda, hemen benim yanı başımda, hemen herhangi birisinin yanı başında bir başka uzay boyutu -sol/sağ, ileri/geri, aşağı/yukarının dışında- kıvrılmış olmasına rağmen bu sayfayı yutabilecek kadar büyük bir boyut bulunabilir ve yine de tümüyle bizim kavrayışımızın dışında kalabilir.

Büyük Fazladan Boyutlar ve Büyük Sicimler

Zar dünyalar senaryosu dört kuvvetten üçünü hapsederek fazladan boyutların büyüklüğü üzerindeki deneysel sınırlamaları büyük ölçüde serbest bırakmıştır ama, fazladan boyutlar bu yaklaşımın büyük olmalarına izin verdiği tek şey değildir. Witten'ın görüşlerini izleyen Joe Lykken, Constantin Bachas ve arkadaşları, Ignatos Antoniadis ve Arkani-Hamed, Dimopoulos ve Dvali, zar dünyalar senaryosunda uyarılmamış, düşük-enerjili sicimlerin bile, önceden düşünüldüğünden çok daha büyük olabileceklerini fark ettiler. Gerçekten de iki ölçek -fazladan boyutların büyüklüğü ve sicimlerin büyüklüğü- birbirleriyle yakından bağlantılıdır.

Önceki bölümden, bir sicimin temel büyüklüğünün, onun kütleçekimsel titreşim deseninin gözlenen güçteki bir kütleçekimi oluşturmaları gerektirmesinden hareket ederek belirlendiğini hatırlayalım. Kütleçekiminin zayıflığı sicimin çok kısa, yaklaşık Planck uzunluğunda (10^{-33} cm) olduğu anlamına gelir. Ama bu

Harvard'dan Lisa Randall ve Johns Hopkins'ten Raman Sundrum'un, kütleçekimin bile yapışkan bir zar tarafından değil ama doğru biçimde kıvrılmış olan fazladan boyutlar tarafından hapsedilmiş olduğunu ileri süren, böylece de üzerlerinde başka sınırlamaların da olduğu bir önerisi bile vardır.

sonuç, fazladan boyutların büyüklüğüne sıkı sıkıya bağlıdır. Bunun nedeni, sicim/M-kuramında, üç uzun boyutumuzda gözlediğimiz kütleçekimi kuvvetinin gücünün iki faktöre birden bağlı olmasıdır. Bu faktörlerden biri yapısal olup, kütleçekimi kuvvetinin temel gücüdür, ikinci faktörse fazladan boyutların büyüklüğüdür. Fazladan boyutlar büyüdükçe bunlar daha fazla kütleçekimi taşıyabilir ve kütleçekiminin bildiğimiz boyutlardaki gücü daha az *görünür*. Tıpkı suyun daha fazla dağılması için yeterince hacim sağlayan büyük borularda su basıncının daha düşük olması gibi, fazladan boyutlar da kütleçekiminin dağılması için daha fazla yer sağlayarak gücünün azalmasına neden olurlar.

Sicimlerin uzunluğunun hesaplanmasında kullanılan özgün hesaplar fazladan boyutların çok küçük, Planck uzunluğu kadar olduğunu, bu nedenle de bunların fazla kütleçekimi taşıyamayacağını varsayıyorlardı. Bu varsayıma göre kütleçekimi zayıf görünür çünkü *zayıftır*. Ama şimdi, zar dünyalar senaryosuna bağlı kalarak çalışır ve fazladan boyutların önceden düşünüldüğünden çok daha büyük olmasına izin verirsek, kütleçekiminin gözlenen zayıflığı artık onun yapısal olarak zayıf olduğunu göstermez. Kütleçekimi, görelilik olarak güçlü olan ama çok sayıdaki fazladan boyutların, tıpkı büyük borular gibi, onun gücünü sanki azmış gibi gösterdiği bir kuvvet olabilir. Bu düşünüş mantığını izlersek, eğer kütleçekimi, bir zamanlar düşünüldüğünden çok daha güçlü ise, o zaman sicimler de bir zamanlar düşünüldüklerinden çok daha uzun olabilirler.

Günümüzde, sicimlerin tam olarak ne kadar uzun olduğu sorusunun belirli, tek bir cevabı yoktur. Hem sicimlerin büyüklüğü, hem de fazladan boyutların büyüklüğü konularında önceden düşünüldüğünden daha fazla değişiklik yapılabileceğinin anlaşılmış olmasıyla, birkaç olasılık ortaya çıkmıştır. Dimopoulos ve çalışma arkadaşları, hem parçacık fizikinden hem de astrofizikten elde edilen sonuçların, uyarılmamış sicimlerin uzunluğunun bir metrenin milyar kere milyarda birinden (10^{-18}) daha büyük olamayacağını gösterdiğini ileri sürmüşlerdi. Gündelik standartlarla büyük olmakla birlikte, bu Planck uzunluğunun yüz mil-

yon kere milyar (10^{17}) katı, önceden düşünöldüğünün *nerdeyse yüz milyon kere milyar kat daha büyük olduğu* anlamına gelir. Şimdi göreçegimiz gibi bu, sicimlerin izlerinin parçacık hızlandırıcılarının gelecek kuşağı tarafından saptanabileceğı bir büyüklüktür.

Sicim Kuramı Deneyle Yüzleşiyor

Elbette bir üç-zar içinde yaşıyor olabileceğimiz olasılığı gerçekten yalnızca şudur: Bir olasılık. Zar dünyalar senaryosunda fazladan boyutların bir zamanlar düşünöldüğünden çok daha büyük olabileceğı olasılığı ve buna bağılı olarak, sicimlerin de bir zamanlar düşünöldüğünden daha büyük olabileceğı olasılığı da yalnızca olasılıklardır. *Ama bunlar, olağanüstü beyecan verici olasılıklardır.* Doğru, zar dünyalar senaryosu doğru olsa bile, fazladan boyutların ve sicimlerin boyutları hâlâ Planck ölçeklerinde olabilir. Ama sicim/M-kuramında sicimlerin ve fazladan boyutların çok daha büyük -günümüz teknolojisinin erişiminin birazcık ötesinde- olmaları olasılığı fantastiktir. Önümüzdeki birkaç yıl içinde sicim/M-kuramının gözlenebilir fizikle en azından bir temasta bulunma ve deneysel bir bilim olma şansının olması demektir.

Ne kadarlık bir şans? Bilmiyorum ama hiç kimse de bilmiyor. Sezgilerim bu olasılığın küçük olduğunu söylüyor ama bu sezgiler onbeş yıldan daha uzun süredir Planck büyüklüğündeki sicimlerle ve Planck büyüklüğündeki fazladan boyutlarla çalışmaya koşullanmış durumda. Belki de benim içgüdülerimin modası artık geçmiştir. Neyse ki bu konu artık hiç kimsenin sezgileriyle bağlantılı olmayacak bir şekilde çözölme yolunda: Eğer sicimler büyükse, veya eğer fazladan boyutların bazıları büyükse, bunun gelecekteki deneyler üzerindeki sonuçları gerçekten görölmeğe değer olacaktır.

Gelecek bölümde, diğere şeylerin yanı sıra, görelili olarak büyük sicimlerin ve fazladan boyutların bulunma olasılıklarını sınavan bazı deneyleri göz önüne alacağız, bu yüzden iştahınızı şimdi biraz açayım. Eğer sicimler bir metrenin milyar kere milyar-

da biri kadar (10^{-18}) büyükse, Şekil 12.4'teki daha yüksek harmonik titreşimlere karşı gelen parçacıkların kütleleri, standart senaryodaki gibi çok büyük, Planck kütesinden daha büyük olmayacaktır. Bunların kütleleri bir protonun kütesinin bin katı ile birkaç bin katı arasında olacaktır ve bu da, CERN'de şimdi inşa edilmekte olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın erişebileceği kadar düşüktür. Eğer bu sicim titreşimleri yüksek enerjili çarpışmalar tarafından uyarılıyorsa, hızlandırıcıların detektörleri yılbaşı gecesinde Times Meydanındaki kristal küre gibi ışıyacaktır. Şimdiye kadar hiç görülmemiş bir dizi parçacık üretilcek ve bunların kütleleri birbirleriyle tıpkı bir viyolonsel'in çeşitli harmoniklerinin birbirleriyle ilişkili olduğu gibi, ilişkili olacaktır. Sicim kuramının imzası verilere John Hancock'u bile etkileyecek bir şekilde atılmış olacaktır. Araştırmacıların bunu gözüksüz bile gözden kaçırmaları mümkün olmayacaktır.

Üstelik, zar dünyalar senaryosunda, yüksek enerjili çarpışmalar -buna dikkat edin- mini kara delikler bile üretebilirler. Her ne kadar normal olarak biz kara delikleri uzayın derinliklerinde bulunan devasa yapılar olarak düşünüyorsak da, genel göreliliğin ilk günlerinden beri eğer avucunuzda yeterli maddeyi sıkıştırabiliyor olsaydınız minik bir kara delik yaratabileceğiniz biliniyor. Bu olmuyor çünkü hiç kimsenin -ve hiçbir mekanik aracın- sıkması böyle bir sıkıştırma yaratmak için yeterli değil. Kara deliğin oluşması için kabul edilen tek mekanizma, çok büyük kütleli bir yıldızın nükleer kaynaşım (füzyon) süreci sonucu dışarı doğru uyguladığı basıncı yenecek kadar büyük bir kütleçekimi kuvveti uygulayarak yıldızı kendi üzerine çökertmesidir. Ama eğer kütleçekiminin küçük ölçeklerdeki yapısal gücü, önceden düşünüldüğünden çok daha büyükse, minik kara delikler önceden düşünüldüğünden çok daha küçük sıkıştırmalar sonucunda üretiliyor olabilirler. Hesaplar Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın protonlar arasındaki yüksek-enerjili çarpışmalar yoluyla çok sayıda mikroskobik kara delik yaratmak için yeterli sıkıştırma-yı üretebileceğini gösterdi.⁷ Büyük Hadron Çarpıştırıcısı mikroskobik kara delikler üreten bir fabrikaya dönüşebilir! Bu kara

delikler o kadar küçük olur ve öylesine kısa süre yaşarlar ki, bize en küçük bir tehditte bulunamazlar (yıllar önce Stephen Hawking bütün kara deliklerin kuantum süreçleri yoluyla dağıldığını göstermişti, büyükler çok yavaş, küçükler çok hızlı) ama bunların üretilmesi, ortaya atılan en egzotik iddialardan bazılarının doğrulanması demek olacak.

Zar Dünyaları Kozmolojisi

Çağdaş araştırmaların dünyanın her tarafındaki bilim insanları (bunların aralarında ben de varım) tarafından sıkı sıkıya izlenen temel bir amacı, kozmolojinin sicim/M-kuramının getirdiği yeni fikirlerle uyuşan bir formülleştirmesini yapmaktır. Bunun nedeni açıktır: Kozmoloji yalnızca büyük, boğazda düğümlenen sorularla boğuşmaz ve biz de yalnızca tanıdık şeylerin -zamanın oku gibi- evrenin doğumu sırasındaki koşullara bağlı olduğunu öğrenmekle kalmadık, kozmoloji bir kuramcıya, New York'un Frank Sinatra ya verdiği şeyi verir: Mükemmel bir kanıtlanma arenası. Eğer bir kuram görevini evrenin ilk anlarının karakteristik özelliği olan uç koşullarda yapabiliyorsa, her yerde yapabilecek demektir.

Günümüzde, sicim/M-kuramına göre kozmoloji, araştırmacıların iki temel yola yöneldiği, gelişmekte olan bir çalışmadır. İlk ve daha geleneksel olan yaklaşım, tıpkı şişmenin standart Büyük Patlama kuramına kısa ama önemli bir cephe sağladığı gibi, sicim/M-kuramının da şişmeye belki daha eski ama çok daha önemli bir cephe sağladığını varsayar. Sicim/M-kuramının evrenin ilk anlarını anlamadaki eksikliğimizi göstermek üzere kullandığımız bulanık bölgenin bulanıklığını gidereceği ve daha sonra da kozmolojik oyunun şişme kuramının çok başarılı senaryosuna göre gelişeceği yolundaki görüş, daha önceki bölümlerde işlenmişti.

Bu görüşün gerektirdiği özel ayrıntılar konusunda ilerleme varsa da (neden evrendeki yalnızca üç boyutun genişlemeye maruz kaldığını anlamaya çalışmak ve şişme öncesinde yaşanmış olabilecek uzaysız/zamansız ortamı çözümlemeye yarayabilecek

matematiksel yöntemleri geliştirmek), eureka anları henüz gelmemiştir. Sezgimiz, şişme kozmolojisinin gittikçe daha eski zamanlarda gözlenebilir evrenin gittikçe daha küçük -bu yüzden de daha sıcak, daha yoğun ve daha yüksek enerjili- olduğunu varsayıyor olsa da, sicim/M-kuramının bu dışı (fizik diliyle tekil) davranışı, daha altında yeni ve daha az tekil niceliklerin ortaya çıktığı bir "en küçük" ölçü (350-351.ci sayfalardaki tartışmamız gibi) ortaya koyarak aştığı yolundadır. Bu mantık, sicim/M-kuramının genel görelilikle kuantum mekaniğini başarıyla birleştirmesinin temelinde yer alır ve birçok araştırmacı kısa bir süre sonra, aynı mantığı kozmoloji bağlamında nasıl uygulayabileceğimizi bulacağımızı umuyor. Ama, şimdilik bulanık bölge hâlâ bulanık görünüyor ve ne zaman berraklaşacağı tam olarak bilinmiyor.

İkinci yaklaşımda zar dünyalar senaryosunu kullanılır ve bunun en köktenci türünde, yepyeni bir kozmolojik yapı ileri sürülürler. Bu yaklaşımın ayrıntılı bir matematiksel çözümleme sonrasında yaşayıp yaşamayacağı henüz açık olmamakla birlikte, temel kuramdaki atılımların iyi bilinen bir alanda nasıl yeni yollar ortaya koyduğunun iyi bir örneğidir. Bu öneri *cyclic (yinelenen) kozmoloji* adını alır.

Yinelenen Kozmoloji

Zaman açısından gündelik yaşantılar bizi iki tür olguyla karşı karşıya getirir: Kesin bir biçimde belirlenmiş bir başı, ortası ve sonu olanlar (bu kitap, bir beysbol maçı, insan hayatı) ve yinelenen, tekrar tekrar olanlar (değişen mevsimler, Güneş'in doğuş ve batışları, Larry King'in evlenmeleri). Elbette daha yakından bakıldığında yinelenmeler genel olarak sonsuza kadar sürmediğinden, yinelenen olguların da bir başı ve bir sonu olduğunu anlarız. Güneş 5 milyar yıldır her gün doğuyor ve batıyor, yani Dünya 5 milyar yıldır hem kendi eksenini çevresinde dönüyor hem de Güneş'in çevresinde dolanıyor. Ama bunun öncesinde Güneş ve güneş sistemi henüz oluşmamıştı. Bir gün, günümüzden yaklaşık beş milyar yıl sonra, Güneş kırmızı dev bir yıldız

za dönüşecek, Dünya da içinde olmak üzere bütün iç gezegenleri yutacak ve artık Güneş'in doğması ya da batması gibi bir kavram olmayacak, en azından burada.

Ama bunlar çağdaş bilimsel görüşler. Eskilere göre yinelenen olgular sonsuza kadar yineleniyor gibi görünüyordu. Birçoklarına göre süresini doldurup yeniden başa dönen yinelenen olgular temel olgulardı. Günlerin ve mevsimlerin döngüleri çalışmanın ve hayatın ritmini belirler, bu yüzden en eski yazılı kozmolojilerin, Dünyanın gelişmesine yinelenen bir olgu olarak bakmalarına şaşırmamak gerekir. Yinelenen kozmoloji, belirli bir başlangıç, orta ve son yerine Dünya'nın tıpkı Ay'ın evreleri gibi yinelenen evrelerden geçtiğini varsayar: Bir tam döngüyü yaşadıktan sonra koşullar her şeyin yeniden başlaması ve yeni bir döngüyü başlatması için olgunlaşır.

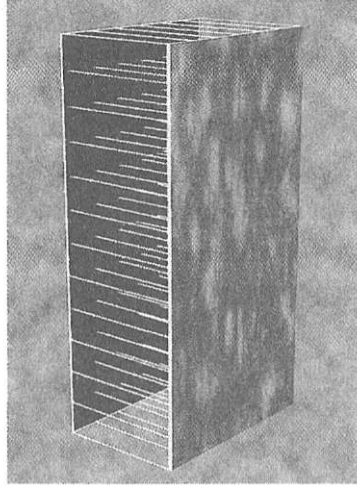
Genel göreliliğin keşfinden bu yana bazı yinelenen kozmolojik modeller ortaya atıldı; bunlardan en iyi bilineni 1930'larda Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nden Richard Tolman tarafından geliştirilmişti. Tolman evrenin gözlenen genişlemesinin yavaşlayabileceğini, bir gün durabileceğini ve bunu, evrenin giderek küçüleceği bir büzülme evresinin izleyeceğini öne sürüyordu. Ama kendi üzerine çökerek yok olmak yerine Tolman evrenin *sekeceğini* öne sürüyordu: Evren büzülerek küçük bir boyuta ulaşabilir ve sonra seker, yeni bir büzülme tarafından izlenecek bir genişleme evresini yeniden başlatır. Bu çevrimi -genişleme, büzülme, sekme, yeniden genişleme vb.- sonsuza kadar yineleyen bir evren, kökenle ilişkili zorlu konulardan zarif bir biçimde kurtulmuş olur: Böyle bir senaryoda köken kavramı uygulanamaz çünkü evren her zaman vardı ve her zaman var olacaktır.

Ama Tolman günümüzden geriye doğru bakıldığında yinelenmelerin bir süre devam etmiş olabileceğini ama süresiz olarak devam edemeyeceğini anlamıştı. Bunun nedeni, her yinelenmede termodinamiğin ikinci yasasının entropinin ortalama olarak artacağını söylemesidir.⁸ Ve genel göreliliğe göre, her yinelenme başlangıcındaki entropi miktarı, o yinelenmenin ne kadar süreceğini belirler. Daha fazla entropi, dışarı doğru genişleme yavaşla-

yıp durmadan ve içeri çöküş başlamadan önce daha uzun süreli bir genişleme dönemi anlamına gelir. Bu nedenle her ardışık çevrim kendinden öncekinden uzun sürer; eşdeğer olarak daha önceki çevrimler giderek daha kısalır. Matematiksel olarak çözümlendiğinde, çevrimlerin sürekli kısalması, bu çevrimlerin geçmişte sonsuza kadar uzanamayacağı anlamına gelir. Tolman'ın yinelenen yapısında bile evrenin bir başlangıcı olmak zorundadır.

Tolman'ın önerisi küresel bir evren gerektiriyordu ki, bu da, görmüş olduğumuz gibi, gözlemler tarafından olasılık dışına itilmişti. Ama son zamanlarda düz bir evren gerektiren, yinelenen kozmolojinin kökten yeni bir türü sicim/M-kuramının içinde geliştirilmişti. Fikir Cambridge Üniversitesi'nden Paul Steinhardt ve çalışma arkadaşı Neil Turok'a (Burt Ovrut, Nathan Seiberg ve Justin Khoury ile birlikte yaptıkları çalışmanın sonuçlarını yoğun bir biçimde kullanarak) ait ve kozmik evrimi harekete geçiren, radikal bir biçimde yeni bir mekanizma öneriyor.⁹ Araştırmacılar, kısaca her birkaç trilyon yılda bir, bir başka, paralel üç-zarla şiddetle çarpışan bir üç-zar içinde yaşamakta olduğumuzu öne sürüyorlar. Çarpışma sırasında oluşan "patlama", yeni bir kozmolojik döngüyü başlatıyor.

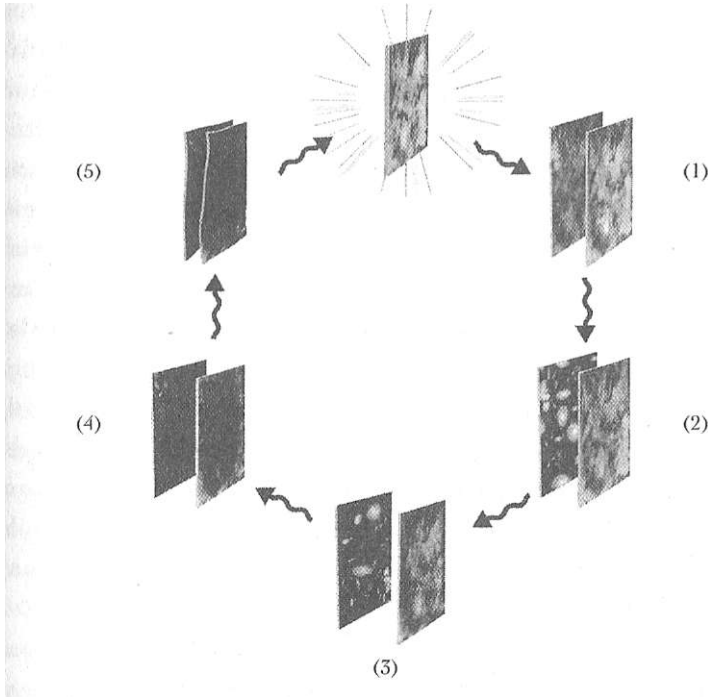
Önerinin Şekil 13.7'de görülen temeli birkaç yıl önce kozmoloji dışı bir bağlamda Horava ve Witten tarafından ortaya atılmıştı. Horava ve Witten, Witten tarafından ileri sürülen beş sicim kuramı arasındaki birliği tamamlamaya çalışıyorlardı. Eğer M-kuramındaki yedi fazladan boyuttan biri çok basit bir şekle sahip ise -Şekil 12.7'deki gibi bir çember değil, Şekil 13.7'deki gibi küçük bir doğru parçası- ve "dünyanın sonu" adı verilen ve kitap kapaklarına benzeyen zarlar tarafından sınırlandırılmışsa, o zaman, Heterotik-E sicim kuramıyla bütün diğerleri arasında doğrudan bir bağlantı kurmak mümkün olur. Bu bağlantıyı nasıl kurdukları açık olmadığı gibi önemli de değildir (ilgiliyorsanız, *Evrenin Zarafeti*, Bölüm 12'ye bakabilirsiniz); burada önemli olan, bunun kuramın kendisinden çıkan bir başlangıç noktası olmasıdır. Steinhardt ve Turok bunu kozmolojik önerileri için destek olarak kullandılar.



Şekil 13.7 (a) Kısa bir arayla ayrılmış iki üç-boyutlu zar

Özel olarak Steinhardt ve Turok, Şekil 13.7'deki her zarın üç uzay boyutu olduğunu, bunlar arasındaki doğru parçalarının da dördüncü uzay boyutunu oluşturduğunu varsayıyorlar. Geriye kalan altı uzay boyutu da, sicim titreşim desenlerinin bilinen parçacık türlerini açıklayabilmesi için uygun olan Calabi-Yau uzayında (şekilde gösterilmemiştir) kıvrılmış durumdadır.¹⁰ Doğrudan haberdar olduğumuz evren bu üç-zarlardan birine karşılık gelir; eğer hoşunuza gidiyorsa ikinci üç-zarı bir başka evren olarak düşünebilirsiniz. Eğer varsa, bu evrende yaşayanlar da, deneysel teknolojileri ve uzmanlıklarının bizimkinden çok ileri olmadığını varsayarsak, yalnızca üç uzay boyutundan haberdar olacaklardır. Bu durumda diğer üç-zar -diğer evren- hemen yakınımızda demektir. Bu evren milimetrenin küçük bir kesri kadar bir uzaklıkta havada duruyor (aradaki uzaklık, Şekil 13.7'deki gibi, dördüncü uzay boyutudur) ama bizim üç-zarımız o kadar yapışkan ve hissettiğimiz kütleçekimi o kadar zayıf ki, ne bizim bu evrenin varlığı konusunda doğrudan bir kanıtımız var, ne de diğer evrenin olası sakinlerinin bizim hakkımızda doğrudan kanıtları olabilir.

Ama Steinhardt ve Turok'un yinelenen kozmolojik modeline göre, Şekil 13.7, herşeyin şimdiye kadar nasıl olduğunu ve bundan sonra nasıl olacağını göstermez. Onların yaklaşımında, iki tane üç-zar birbirine doğru çekilir -sanki minik lastik bantlarla birbirlerine bağlanmışlar gibi- ve bu da her birinin, diğerinin kozmik evrimini etkilediği anlamına gelir: Zarlar sonsuz bir yaklaşma, çarpışma, uzaklaşma, yeniden çarpışma çevrimindedirler, sonsuza kadar, genişlemekte olan dünyalarını yeni baştan üretirler. Bunun nasıl olduğunu görmek için, tam bir çevrimi adım adım gösteren Şekil 13.8'e bakın. 1. Evre de iki tane üç-zar birbirlerine doğru çekilmişler, çarpışmışlar ve yeniden uzaklaşmak üzereler. Çarpışmanın devasa enerjisi birbirlerinden geri seken her iki üç-zarda da önemli miktarda yüksek sıcaklıkta ışınım ve madde birikmesine neden olur ve -önemli nokta buradadır- Steinhardt ve Turok *bu madde ve ışınımın*



Şekil 13.8 Döngüsel zar-dünya kozmoloji modelinde çeşitli aşamalar

ayrıntılı özelliklerinin, şişme modelinde üretilenlerle hemen hemen aynı olduğunu iddia ediyorlar. Her ne kadar bu konu üzerinde hâlâ biraz tartışma var ise de, Steinhardt ve Turok bu yüzden iki tane üç-zar arasındaki çarpışmanın, Bölüm 10 da incelenen daha konvansiyonel şişme genişleme patlamasından bir an sonra sahip olacakları fiziksel koşulların çok benzerlerine sahip olmalarıyla sonuçlanacağını öne sürüyorlar. O zaman, bizim üç-zarımızdaki varsayımsal bir gözlemci için sürpriz olmayacak biçimde, yinelenen kozmolojik modeldeki diğer birkaç evre, temel olarak Şekil 9.2'de gösterilmiş olan standart yaklaşımdakilerle temelde aynıdır (o şekli şimdi iki tane üç-zarın evrimini gösteriyor olarak yorumluyoruz). Yani bizim üç-zarımız çarpışmadan sonra geri sekerken genişler ve soğur, bu arada 2.Evrede görebileceğiniz şekilde, ilkel plazmadan yıldız ve galaksi gibi kozmik yapılar oluşur. Daha sonra, Bölüm 10'da incelenen son süpernova gözlemlerinin verdiği esinle, Steinhardt ve Turok modellerini 7 milyar yıl sonra -3. Evre- bildiğimiz madde ve ışıınımdaki enerjinin, zarın genişlemesiyle yeterince zayıflayacağı ve bir karanlık enerji bileşeninin baskın geleceği ve onun negatif basıncının ivmeli bir genişleme başlatacağı şekilde kuruyorlar. (Bu, ayrıntıların keyfi olarak ayarlanmasını gerektirir ama modelin gözlemlerle uyuşmasını sağlar ve bu yüzden de yinelenen modeli ortaya atanların güdülenmeleri yüksektir.) Yaklaşık 7 milyaryıl sonra, biz insanlar, en azından şu andaki çevrimde, kendimizi yeryüzünde bulur ve ivmeli evrenin ilk dönemlerini yaşarız. Daha sonra, kabaca gelecek *trilyon* yılda, bizim üç-zarımızın süren ivmeli genişlemesi dışında yeni pek bir şey olmaz. Bu da bizim üç-boyutlu uzayımızın devasa bir faktörle gerilmesi, bu yolla da madde ve ışıının neredeyse yok oluncaya kadar seyrelmesi ve geriye neredeyse tümüyle boş ve tümüyle birörnek gibi görünen bir zar dünyası bırakmasına yetecek kadar uzundur: 4. Evre.

Bu noktada üç-zarımız ilk çarpışma sonrası geri sekmesini tamamlamış ve diğer üç-zara doğru yeniden yaklaşmaya başlamıştır. Diğer çarpışmaya giderek yaklaşırken, bizim zarımıza

bağlı olan sicimlerin kuantum titreşimleri, onun boşluğunu minik dalgacıklarla doldurur, 5.Evre. Biz hızlandıkça, dalgacıklar da büyümeye devam eder; sonra şiddetli bir şekilde diğer üç-zarla çarpışır ve geri sekeriz, çevrim de yeniden başlar. Kuantum dalgacıkları, çarpışma sırasında ortaya çıkan ısıtım ve maddede minik türdeşlik bozukluklarına neden olur ve tıpkı şişme senaryosunda olduğu gibi, bu mükemmel birörneklikten sapışlar kümelenmelere dönüşür ve sonuçta yıldız ve galaksileri oluştururlar.

Bunlar, yinelenen modeldeki ana evrelerdir. Ön koşulu -çarpışan zar dünyalar- başarılı şişme modelininkinden çok farklıdır ama yine de iki yaklaşım arasında önemli temas noktaları vardır. Bu temel benzerliklerden biri her ikisinin de başlangıçtaki birörneklik bozukluklarının yaratılmasını kuantum çalkantılarına bağlamasıdır. Gerçekten de Steinhardt ve Turok, yinelenen modeldeki kuantum dalgacıklarını yöneten denklemlerin, şişme modelindekilerle hemen hemen aynı olduğunu, bu yüzden iki kuramın sonuçta ortaya çıkacağını hesapladıkları birörneklik bozukluklarının da neredeyse aynı olduğunu öne sürüyorlar." Üstelik, yinelenen modelde bir şişme patlaması olmasa da, trilyon yıl süreli, (3.Evrede başlayan) daha yumuşak bir ivmeli genişleme vardır. Ama bu gerçekten bir acele ya da sabır sorunudur; şişme modelinin bir patlamada elde ettiğini yinelenen model neredeyse görelî olarak sonsuz bir zamanda elde eder. Yinelenen modeldeki çarpışma evrenin başlangıcı olmadığı için, kozmolojiye ilişkin konuları (düzlük ve ufuk problemi gibi), her önceki çevrimin son trilyon yıllarında yavaş yavaş çözme lüksü vardır. Her yinelenmenin sonundaki uzun süren yumuşak ama sürekli ivmeli genişleme, üç-zarımızı güzel ve düz bir biçimde gerer ve minik ama önemli bir kuantum dalgalanması dışında onu son derece birörnek hale getirir. Her çevrimin sonunda, diğer çevrimin başındaki bir çarparak yamyassı oluş tarafından izlenen uzun, son aşaması, şişme yaklaşımındaki kısa süreli şiddetli genişlemenin ortaya çıkardığına çok benzer bir ortama yol açar.

Kısa Bir Değerlendirme

Şu andaki gelişme düzeyleriyle hem şişme modeli hem de yinelenen model, kozmolojik yapıların kavranmasını sağlar ama hiçbirisi tam bir kuram ortaya koymaz. Evrenin ilk anlarındaki baskın koşulları bilmemek, şişme kozmolojisini önerenleri, kuramsal doğrulama olmaksızın, şişmenin başlamasını gerektiren koşulların ortaya çıktığını varsaymaya zorlar. Eğer bu koşullar ortaya çıktıysa, kuram pek çok kozmolojik bilmeceyi çözer ve zamanın okunu başlatır. Ama böyle başarılar ilk planda şişmenin olmasına bağlıdır. Üstelik şişme kozmolojisi sicim kuramının içine dikişsiz bir şekilde gömülü olmadığı için, henüz kuantum mekaniği ve genel göreliliğin tutarlı bir birleşiminin bir parçası değildir.

Yinelenen modelin de kendine has eksiklikleri vardır. Tolman'ın modelinde olduğu gibi, entropi birikmesi (ve kuantum mekaniğinin gözönüne alınması¹²) yinelenen modelin yinelenmelerinin sonsuza kadar sürememesine neden olur. Yinelenmeler geçmişte, belirli bir zamanda başlar ve şişmede olduğu gibi, ilk çevrimin nasıl başladığını açıklamak zorunda kalırız. Eğer başladıysa, o zaman kuram, yine şişmede olduğu gibi, temel kozmolojik problemleri çözer ve zamanın okunun her düşük-entropili çarpışmadan başlayarak ileriye, Şekil 13.8'deki evrelere doğru yönelmesini sağlar. Ama şimdilerde düşünüldüğü gibi, yinelenen model evrenin neden ve nasıl kendini Şekil 13.8 için gerekli olan bir durumda bulduğu sorusuna bir açıklık getirmez. Örneğin, neden fazladan boyutların biri görevini yapar biçimde iki tane üç-zarı ayıran bir uzaysal parça şeklini alırken altı boyut kendilerini özel bir Calabi-Yau şeklinde kıvrıyor? Nasıl oluyor da dünyanın-sonu üç-zarlar mükemmel bir şekilde hizalanıyor ve birbirlerini tam olması gereken kuvvetle çekerek Şekil 13.8'deki evrelerin anlattığımız gibi ilerlemelerine neden oluyor? Ve kritik önemde bir soru olarak, yinelenen modelin patlamasında iki tane üç-zar çarpıştığında gerçekte ne oluyor?

Bu son soruda, yinelenen modeldeki çarpmanın şişme kozmolojisinde sıfır anında karşılaşılan tekillikten daha az sorunlu ola-

cağı umudu vardır. Uzayın tümünün sonsuz derecede sıkışması yerine, yinelenen yaklaşımda zarlar arasındaki tek boyut sıkıştırılır; her yinelenmede zarların kendileri sıkışmaz, tam tersine genel olarak genişlerler, işte Steinhardt, Turok ve çalışma arkadaşları bunun, zarların kendilerinde *sonlu* sıcaklığa ve *sonlu* yoğunluğa sahip olmalarını gerektirdiğini öne sürüyorlar. Ama bu, geçici bir sonuçtur çünkü şimdiye kadar hiç kimse denklemlerden daha iyi bir şey elde edememiş ve zarlar birbirleriyle çarpıştığında tam olarak ne olduğunu ortaya koyamamıştır. Gerçekten, şu ana kadar tamamlanan çözümlemeler, çarpmanın şişme kuramındaki sıfır anındaki problemin bir benzeriyle karşılaştığını gösteriyor: Matematik çöküyor. Bu yüzden, ister evrenin gerçek başlangıcı, isterse şimdiki yinelenmenin başlangıcı olsun, kozmolojinin tekil başlangıç konusuna kesin bir çözüm getirmesi gereği vardır.

Yinelenen modelin en zorlayıcı özelliği, karanlık enerjiyi gözlenen ivmeli genişlemeyle birleştirme yoludur. 1998'de, evrenin ivmelenerek genişlediği keşfedildiğinde, bu, birçok fizikçi ve astronom için sürpriz olmuştu. Karanlık enerji, evrenin tam, doğru miktarda karanlık enerji içerdiği varsayılarak şişme kozmolojik yapısının içine katılabilirse de, ivmeli genişleme hantal bir yama gibi duruyor. Yinelenen modelde, tersine, karanlık enerjinin rolü doğal ve çok önemlidir. Karatahtayı silmek, gözlenebilir evreni hiçlik sınırına kadar seyreltmek ve koşulları gelecek yinelenmeye hazırlamak için trilyon-yıl süren yavaş ama sürekli ivmelenen bir genişlemenin hayati önemi vardır. Bu açıdan, hem şişme modeli hem de yinelenen model ivmeli genişlemeye dayanır -şişme modeli başlangıca yakın ve yinelenen model her çevrimin sonunda- ama doğrudan gözlemsel kanıtı olan, ikincisidir.(Yinelenen yaklaşımın, bizim tam şimdi trilyon yıllık ivmeli genişleme evresine girmekte olduğumuz şeklinde tasarlandığını, böylesi bir genişlemeninse son dönemde gözlendiğini hatırlayın.) Bu, yinelenen modelin hanesine yazılmış bir artıdır, ama aynı zamanda, eğer ivmeli genişleme gelecekteki gözlemler tarafından doğrulanamazsa, şişme modelinin yaşayabileceği (her ne kadar evrenin

enerji bütçesinin kayıp olan yüzde 70'i bilmececi yeniden ortaya çıkacaksa da) ama yinelenen modelin varlığını sürdüremeyeceği anlamına gelir.

Uzay zamana İlişkin Yeni Algılamalar

Zar dünyalar senaryosu ve onun ürettiği yinelenen kozmolojî modeli son derece tartışmaya açıktır. Bunları burada doğru oldukları konusunda emin olduğum için değil, içinde yaşadığımız uzay ve onun geçirdiği evrim konularında sicim/M-kuramının esinlediği, çarpıcı yeni yolları göstermek istediğim için tartışmaya açtım. Eğer bir üç-zarın içinde yaşıyorsak, o zaman üç-boyutlu uzayın fizikselliğine ilişkin soru, en kesin cevabına kavuşur: Uzay bir zar olur, böylece de kesinlikle "bir şey" olur. Değişik boyutlarda, sicim/M-kuramının daha yüksek-boyutlu açılımında yer alan pek çok başka zar olacağı için, özel bir şey de olmayabilir. Eğer bizim üç-zarımız üzerindeki kozmolojik evrim, yakındaki bir başka zar ile süre giden çarpışmalar tarafından yönlendiriliyorsa, bildiğimiz zaman evrenin pek çok çevriminden yalnızca birini kapsayacak, bir büyük patlamayı bir diğeri, sonra bir diğeri izleyecektir.

Bana göre, bu hem heyecan verici, hem de alçakgönüllü olmamızı gerektiren bir görüştür. Beklediğimizden çok daha uzay ve zaman olabilir; eğer varsa, "her şey" olarak gözönüne aldıklarımız, çok daha zengin bir gerçekliğin çok küçük bir bölümü olabilir.

5 Gerçeklik ve Hayal Gücü

XIV. Bölüm

Yukarıda Göklerde ve Aşağıda Yerde

Uzay ve Zamanla Deneyler

Empedocles ve Agrigento'nun evreni toprak, hava, ateş ve suyla la açıkladığından bu yana çok yol aldık. Newton'dan yirminci yüzyılın devrimci keşiflerine kadar kaydettiğimiz ilerlemelerin çoğu, gösterişli bir biçimde kesin kuramsal öngörülerin deneylerce doğrulanması şeklinde ortaya çıkmıştır. Ama 1980'lerin ortalarından bu yana, kendi başarımızın kurbanı olduk. Kavrayışımızın sınırlarını durmak bilmeksizin daha ötelere itmesiyle kuramlarımız, çağdaş teknolojinin erişemediği alanlara girdiler.

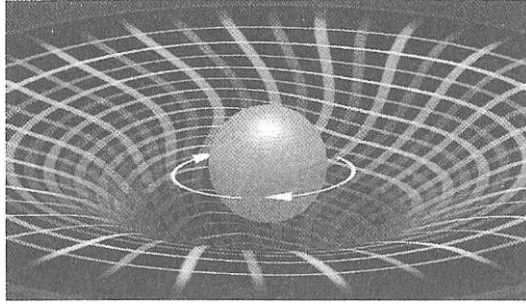
Bununla birlikte, biraz çaba ve şansın yardımıyla, birçok uç fikir önümüzdeki birkaç onyılda sınanabilecektir. Bu bölümde inceleyeceğimiz gibi, planlanan ya da gerçekleşme aşamasında olan deneyler fazladan boyutlar, karanlık madde ve karanlık enerjinin bileşimi, kütle ve Higgs okyanusunun kökeni, evrenin ilk dönemlerinin kozmolojik özellikleri, süpersimetrisinin

ilişkisi ve büyük olasılıkla sicim kuramının kendisinin doğruluğu konularında çok daha fazla fikir verme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, biraz da şansın yardımıyla, birleştirme, uzay ve zamanın doğası ve bizim kozmik kökenimiz belki de sonunda sınanabilecektir.

Sürüklenen Einstein

Genel göreliliği formülleştirmek için on yıl süren savaşımında Einstein, çok çeşitli kaynaklardan esinlendi. Hepsinin en etkili, on dokuzuncu yüzyılda aralarında Carl Friedrich Gauss, Janos Bolyai, Nikolai Lobachevsky ve Georg Bernhard Riemann'ın da bulunduğu parlak matematikçiler tarafından geliştirilen, bükülmüş şekillerin matematiği ile ilgili görüşlerdi. Bölüm 3'te incelediğimiz gibi Einstein, Ernst Mach'ın görüşlerinden de esinlenmişti. Mach'ın ilişkisel uzay kavramını savunduğunu hatırlayın: Ona göre uzay bir cismin diğerine göre yerinin belirlenmesini sağlayan bir dil oluşturuyordu ama kendisi başlıbaşına bağımsız bir varlık değildi. Başlangıçta Einstein, Mach'ın bakış açısını heyecanla destekliyordu, çünkü göreliliği bir kuramın olabileceği kadar göreliydi. Ama Einstein'ın genel görelilik kavrayışı derinleştikçe, göreliliğin Mach'ın fikirlerini tam olarak paylaşmadığını fark etti. Genel göreliliğe göre, bomboş bir evrende dönmekte olan Newton'un kovalarındaki su içbükey bir şekil alacaktı ve bu da, mutlak bir ivme kavramı öngördüğü için Mach'ın tümüyle ilişkisel bakış açısıyla çelişiyordu. Bu durumda bile, genel görelilik Mach'ın görüşlerinin bazı yönlerini paylaşmaktadır ve gelecek birkaç yılda, kırk yıla yakın bir süredir geliştirilmekte olan 500 milyon dolarlık bir deney, Mach'ın görüşlerinin en parlak özelliklerinden birini sınamaya hazırlanmaktadır.

incelenecek fizik, Joseph Lense ve Hans Thirring adlı Avusturyalı araştırmacıların, genel göreliliği kullanarak büyük kütleli bir cismin uzayı eğilttiğini -bir trampolin üzerinde duran bir bowling topu gibi- ve bu nedenle de dönen cisimlerin uzayı (ve zamanı), tıpkı bir kova suya atılan dönmekte olan bir taşın suyu sürüklediği gibi sürüklediğini gösterdikleri 1918 yılından



Şekil 14.1 Dönmekte olan büyük kütleli cisimler uzayı, serbestçe düşmekte olan cisimleri çevrelerinde döndürerek sürükler.

beri biliniyor. Bu olay *yapı sürüklenmesi* olarak bilinir ve örneğin hızla dönmekte olan bir nötron yıldızına doğru serbestçe düşen bir asteroidin, dönmekte olan uzayın yarattığı anafora kapılacağını ve nötron yıldızının yüzeyine doğru yoluna devam ederken döneceğini ima eder. Bu etkiye yapı sürüklenmesi adı verilmiştir çünkü asteroidin bakış açısından bakıldığında asteroid dönerek düşmemektedir. Uzaysal bir ızgara boyunca doğru düşmektedir ama uzay döndüğü için (Şekil 14.1'de olduğu gibi) ızgara da bükülür, bu yüzden de "doğrudan aşağı"nın anlamı uzak, dönmeyen bir perspektiften bakılana göre farklılaşır.

Mach'a olan bağlantıyı görebilmek için, dönmekte olan büyük kütleli cismin içi boş olan dev bir küre olduğu bir yapı sürüklenmesini düşünün. Einstein tarafından 1912'de (henüz genel göreliliği bile tamamlamadan önce) başlatılan, 1965'te Dieter Brill ve Jeffrey Cohen tarafından sürdürülen ve sonunda 1985'te Herbert Pfister ve K. Braun adlı Alman fizikçiler tarafından tamamlanan hesaplar, boş kürenin içindeki uzayın da dönme hareketi sonucunda sürükleneceğini ve anfor benzeri bir dönme hareketi oluşturacağını göstermiştir¹. Eğer içi su dolu olan durağan bir kova -uzaktaki bir gözlemcinin bakış açısına göre durağan- dönmekte olan böyle bir kürenin içine konursa, hesaplar dönen uzayın durağan su üzerinde bir kuvvet uygulayacağını ve suyun kovanın kenarlarında yükseleceğini ve yüzeyinin içbükey bir şekil alacağını göstermiştir.

Bu sonuç Mach'ın hoşuna giderdi. Her ne kadar "dönen uzay" tanımlamasını beğenmese de -çünkü bu tanım uzayı bir şey olarak kabul ediyor- küre ve kova arasındaki *görelî* hareketin su yüzeyinin şeklinin değişmesine neden olmasından hoşlanırdı. Gerçekten, yapılan hesaplar bütün evrenin içerdiği kadar kütleye sahip olan içi boş bir küre için, kürenin mi kovanın dışında döndüğünü yoksa kovanın mı kürenin içinde döndüğünü düşünmenizden bir önemi olmadığını gösteriyor. Mach'ın savunduğu gibi, önemli olan tek şey ikisinin arasındaki görelî harekettir. Sözüünü ettiğim hesaplar genel görelilikte kullanılanlardan başkası olmadığı için bu, Einstein'ın kuramının Mach'çı yanını gösteren açık bir örnektir. (Bununla birlikte, standart Mach'çı düşünüş, kovanın sonsuz, boş bir evrende dönüyor olması halinde su yüzeyinin düz kalacağını öne sürerse de genel görelilik bu görüşe katılmaz. Pfister ve Braun'un sonuçlarının gösterdiği şey, dönmekte olan yeterince büyük kütleli bir kürenin, dışarıdaki uzayın etkilerini tümüyle engelleyebildiği yolumdadır.)

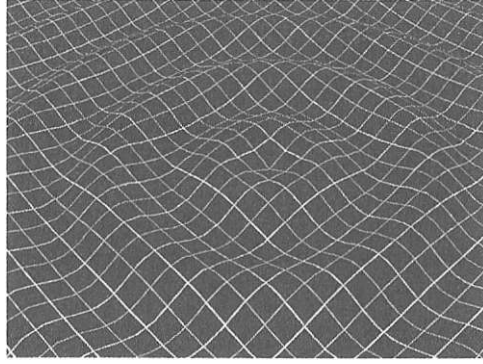
1960'ta, Stanford Üniversitesi'nden Leonard Schiff ve A.B.D Savunma Bakanlığı'ndan Goerge Pugh birbirlerinden bağımsız olarak genel görelilikteki "uzay sürüklenmesi" fikrinin Dünya'nın dönme hareketi kullanılarak deneysel olarak doğrulanabileceğini öne sürdüler. Schiff ve Pugh, Newton fiziğine göre, Dünya'nın yörüngesinde dolanan, dönmekte olan bir jiroskopun -belirli bir eksen çevresinde dönen bir tekerlek- sabit bir yönü göstereceğini anlamışlardı. Ama genel göreliliğin hesaplarına göre jiroskopun eksenini, Dünya'nın dönerken çevresindeki uzayı sürüklemesi nedeniyle hafifçe yön değiştirecekti. Dünya'nın kütlesi, Pfister ve Braun'un hesaplarında kullandıkları varsayımsal, içi boş kürenin kütlesi yanında çok küçük olduğundan, Dünya'nın dönmesinden kaynaklanan uzay sürüklenmesi çok çok küçüktür. Ayrıntılı hesaplar gösterdi ki, eğer jiroskopun eksenini başlangıçta bir yıldız gösterecek şekilde ayarlanmış olsa, bir yıl sonra yavaşça sürüklenen uzay, eksenini bu yönden bir derecenin yüzbinde biri kadar saptırabilecekti. Bu da bir

saat yelkovanının milyonda iki saniyede süpüreceği bir açı olduğu için, bize önemli bir bilimsel, teknolojik ve mühendislik problemi sunar.

Kırk yıllık gelişme ve yaklaşık yüz doktora çalışması sonrasında Francis Everitt tarafından yönetilen ve mali olarak NASA tarafından desteklenen bir Stanford ekibi bu deneyi yapmaya hazırdı. Birkaç yıl sonra, bu ekibin hazırladığı, yeryüzünden yaklaşık 600 km yukarıdaki yörüngesinde dolanan ve o zamana kadar yapılmış en hassas dört jiroskobu taşıyan *Kütleçekimi Sondası B* adlı uydu, Dünya'nın dönmesinden kaynaklanan uzay sürüklenmesini ölçme girişiminde bulunacaktır. Eğer deney başarılı olursa, genel göreliliğin günümüze kadar elde edilmiş en hassas deneysel doğrulamasını yapmış olacak ve Mach'çı etkinin ilk doğrudan kanıtını ortaya koymuş olacaktır.² Aynı derecede heyecan verici bir başka olasılık da deneylerde, genel göreliliğin hesaplarından bir sapma bulunmasıdır. Genel göreliliğin temellerinde ortaya çıkabilecek böylesi minik bir çatlak, belki de uzay-zamanın şimdiye kadar gizli kalmış olan özelliklerine bir göz atmak için ihtiyacımız olan bir şeydir.

Dalgayı Yakalamak

Genel görelilikten çıkarılacak temel ders, kütle ve enerjinin uzay-zamanın dokusunu eğilttiğidir; bunu Şekil 3.10'da Güneş'in çevresini eğrilmiş olarak çizerek göstermiştik. Durağan şeklin bir eksikliği, kütle veya enerjinin dağılımı bir şekilde değiştiğinde uzaydaki eğilmelerin nasıl değiştiğini göstere-memesidir.³ Genel görelilik, tıpkı bir trampolinin üzerinde sabit durduğunuzda değişmeyen bir şekil alması ama yukarı sıçrayıp aşağı düştüğünüzde şeklini değiştirmesi gibi madde durağan olduğunda uzayın da Şekil 3.10'da görüldüğü gibi eğrilmiş ama sabit bir şekil aldığını, ama madde hareket ettikçe uzayın dokusunda dalgacıkların yayılacağını öngörür. Einstein bu kavrayışa 1916 ve 1918'de, yeni bulduğu genel görelilik denklemlerini kullanarak -tıpkı bir anten üzerinde aşağı-yukarı hareket eden elektrik yüklerinin elektromanyetik dalgalar üretmesi gibi (rad-



Şekil 14.2 Kütleçekimi dalgaları uzay-zamanın dokusundaki dalgacıklardır.

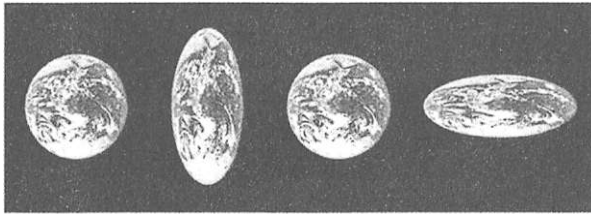
yo ve televizyon dalgaları böyle üretilir)- şu veya bu yöne hareket eden maddenin de (bir süpernova patlamasında olduğu gibi) kütleçekimi dalgaları üreteceğini gösterdiğinde ulaşmıştı. Kütleçekimi eğrilik demek olduğu için, kütleçekimi dalgası da bir eğrilik dalgasıdır. Nasıl havuza atılan bir çakıl taşı, dışarı doğru yayılan dalgacıklar oluşturursa, dönen madde de dışarı doğru yayılan uzaysal dalgacıklar oluşturur; genel göreliliğe göre uzaklardaki bir süpernova patlaması, Şekil 14.2'de gösterildiği gibi, uzay-zaman havuzuna atılan kozmik bir çakıl taşı gibidir. Şekil kütleçekimi dalgalarının önemli, ayırt edici bir özelliğini gösteriyor: Elektromanyetik dalgalardan, ses ve su dalgalarından farklı olarak -bunlar uzayda yayılan dalgalardır- kütleçekimi dalgaları uzayın kendisindedir. Bunlar uzay-zamanın geometrisinin hareket eden çarpılmaları veya eğrilmeleridir.

Kütleçekimi dalgaları artık genel göreliliğin kabul edilmiş bir öngörüsü olsa da, yıllar boyunca bu konu, en azından kısmen Mach'çı felsefeye yakınlığı nedeniyle kafa karışıklıklarına ve tartışmalara neden olmuştur. Eğer genel görelilik Mach'ın fikirleriyle tam olarak uyuşsaydı, o zaman "uzay-zamanın geometrisi" yalnızca büyük kütleli bir cismin konumunu ve hareketini bir diğerine göre ifade etmek için uygun olan bir dil olacaktı. Bu düşünüş biçimine göre boş uzay, boş bir kavram olurdu, bu durumda boş uzayın dalgalanmasından nasıl anlamlı bir şekilde söz

edilebilirdi? Birçok fizikçi uzayda varlığı önerilen dalgaların genel göreliliğin matematiğinin yanlış yorumlanmasından kaynaklandığını kanıtlamaya çalıştı. Ama bu arada kuramsal çözümler bir doğru sonuçta odaklandı: Kütleçekimi dalgaları gerçektir ve uzay *dalgalanabilir*.

Her geçen dalga tepesi ve çukuruyla, bir kütleçekimi dalgasının çarpılan geometrisi uzayı -ve içindeki her şeyi- dikey bir doğrultuda, Şekil 14.3'te abartılı bir biçimde gösterildiği gibi gerer, ilke olarak kütleçekimi dalgalarının geçişini, çeşitli konumlar arasındaki uzaklıkları sürekli olarak ölçerek ve bu uzaklıkların oranlarının anlık olarak değiştiğini bulmak yoluyla saptayabilirsiniz.

Pratikte bunu hiç kimse yapamamıştır, bu yüzden hiç kimse bir kütleçekimi dalgasını doğrudan gözlemleyememiştir. (Bununla birlikte, kütleçekimi dalgaları için inandırıcı, dolaylı kanıtlar vardır.⁴⁾ Güçlük, geçen bir kütleçekimi dalgasının çarpıtma etkisinin miktarının tipik olarak çok küçük olmasıdır. Trinity'de 16 Temmuz 1945'te denenen 20 kiloton TNT'ye eşdeğer atom bombası o kadar parlaktı ki, ürettiği elektromanyetik dalganın gözlerine zarar vermemesi için kilometrelerce uzaktaki gözlemcilerin koruyucu gözlük takması gerekmişti. Buna rağmen, eğer üzerine bombanın konduğu 30 metrelik çelik kulenin hemen altında bulunsaydınız bile, patlamanın yarattığı kütleçekimi dalgaları vücudunuzu bir yönde ya da diğerinde bir atom çapının çok küçük bir kesri kadar minik bir miktarda gerebilirdi. Kütleçekimsel bozulmalar görelî olarak işte bu kadar küçüktür ve bu da saptanmaları ile ilgili teknolojik zorluklar konusunda bir ipucu verir. (Kütleçe-



Şekil 14.3 Geçen bir kütleçekimi dalgası bir cismi önce bir yönde sonra diğer yönde gerer. (Bu görüntüde tipik bir kütleçekimi dalgasının yaratacağı çarpıtma büyük ölçüde abartılmıştır.)

kimi dalgası eşgüdümlü bir şekilde hareket eden devasa miktarda graviton olarak da düşünülebileceği için -tıpkı elektromanyetik dalganın eşgüdüm altında hareket eden devasa sayıda fotonlardan oluşması gibi- bu, aynı zamanda *tek bir* gravitonu saptamanın ne kadar zor olduğu hakkında da bir fikir verebilir.)

Elbette biz nükleer silahlar tarafından üretilen kütleçekimi dalgalarıyla ilgilenmiyoruz ama astrofiziksel kaynaklarda da durum daha kolay değildir. Astrofiziksel kaynak ne kadar yakın ve büyük kütleli olursa ve madde hareketi ne kadar şiddetli ve enerjik olursa, alacağımız kütleçekimi dalgaları o kadar kuvvetli olur. Ama 10.000 ışık yılı uzaklıktaki bir yıldızda bir süpernova patlaması olsa bile, ortaya çıkan kütleçekimi dalgaları Dünyaya ulaştıklarında bir metrelik bir çubuğu bir santimetrenin milyon kere milyarda biri kadar uzatabilir ki, bu da bir atom çapının neredeyse yüzde biri kadardır. Bu yüzden, görelilik olarak yakında hiç beklenmedik çok şiddetli bir astrofiziksel olay olmadıkça, kütleçekimi dalgalarını saptamak için olağanüstü küçük uzunluk değişimlerini ölçebilecek bir araca ihtiyacımız var.

Lazer Interferometre Kütleçekimse] Dalga Gözlemeyini (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, LIGO) (Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü ve Massachusetts Teknoloji Enstitüsü tarafından ortak olarak işletilmekte ve Ulusal Bilim Vakfı'nca mali olarak desteklenmektedir) tasarlayıp yapan bilim insanları çıtayı yükselttiler. LIGO etkileyicidir ve beklenen hassasiyet çarpıcıdır. Her biri *dört kilometre* uzunluğunda ve bir metreden biraz daha büyük çaplı iki boru L şeklinde monte edilmiştir. Havası boşaltılmış bu tüplerde aynı anda iki lazer ışını gönderilmekte ve bu ışınlar çok iyi parlatılmış aynalardan yansıtılarak tüplerin görelilik uzunluğunu olağanüstü yüksek bir hassasiyetle ölçmektedir. Fikir, eğer bir kütleçekimi dalgası geçerse, tüplerden birini diğerine göre uzatacağı için, eğer bu uzama yeterince fazlaysa gözlemcilerin bunu saptayabilecekleri üzerine kuruludur.

Kütleçekimi dalgasının yarattığı uzama ve büzülme birikmeli olduğu için tüplerin boyu uzun tutulmuştur. Eğer bir kütleçe-

kimi dalgası dört metrelik bir tüpü, diyelim 10^{-20} metre uzatırsa, dört kilometrelik bir tüpü bin kat, yani 10^{-17} metre uzatacaktır. Bu yüzden izlenen uzunluk ne kadar büyük olursa, bu uzunluktaki bir değişikliği saptamak da o kadar kolay olur. Buna yatırım yapmak için LIGO deneycileri aslında her tüpün uçlarındaki aynalarda lazer ışınlarının yüz kereden fazla yansımaları ve böylece izlenen uzunluğun her lazer demeti için 800 kilometreden uzun olmasını sağlıyorlar. Böylesi zekice tasarlanmış mühendislik hileleriyle LIGO, tüplerin uzunluğunda ortaya çıkabilecek olan, insan saçının trilyonda biri kadar bir değişikliği -bir atomun çapının yüz milyarda biri- saptayabilecektir.

Aslında bu L şeklindeki deney araçlarından iki tane var. Birisi Louisiana'daki Livingston'da, diğeri ise 3000 kilometreden daha uzakta, Washington'daki Hanford'da. Eğer uzaktaki astrofiziksel kaynaklardan birinin yarattığı bir kütleçekimi dalgası Dünyaya ulaşırsa, her iki detektörü de aynı şekilde etkileyecektir, bu yüzden detektörlerden birinin algıladığı bir dalgayı diğeri de algılamalıdır. Detektörlerin yalıtılması için harcanan bütün çabalara rağmen gündelik hayatta oluşan sarsıntılar (geçen kamyonların sarsıntıları, büyük zincirli testerelerin etkileri, yıkılan ağaç gövdelerinin sarsıntıları vb.) kütleçekimi dalgaları olarak algılanabilir. İki detektör arasında eşzamanlılık aranması bu sahte alarmların önüne geçebilir.

Araştırmacılar, aralarında süpernova patlamaları, küresel olmayan nötron yıldızlarının dönme hareketleri ve kara delikler arasındaki çarpışmalar da olmak üzere, kütleçekimi dalgaları yaymasını bekledikleri astrofiziksel kaynaklardan gelecek kütleçekimi dalgalarının frekanslarını da -detektörden her saniye geçmesi gereken dalga tepesi ve çukuru sayısı- dikkatli bir biçimde hesapladılar. Bu bilgi olmaksızın deneycilerin yaptıkları samanlıktaki iğne aramak gibi olur; bu bilgi elde olduğunda detektörleri fiziksel olarak ilgilendikleri, kesin olarak belirlenmiş frekans aralıklarına yönlendirebilirler. İlginçtir, hesaplar bazı kütleçekimsel dalga frekanslarının saniyede birkaç bin çevrim aralığında olduğunu göstermiştir; eğer bunlar ses dalgası olsalardı,

insan kulağının duyabileceği aralıkta olacaktı. Birleşen nötron yıldızlarının sesi gittikçe incelen bir cıvıltıya benzeyecekti, çarpışan kara deliklerin sesi ise bir serçenin ötüşünü andıracaktı. uzay-zamanın dokusunda titreşen pek çok kütleçekimi dalgası vardır ve her şey planlandığı gibi giderse, LIGO bunları alabilecek ilk araç olacaktır⁵. Bunu bu kadar heyecan verici yapan şey, kütleçekimi dalgalarının, kütleçekiminin işe yarayan iki temel özelliğini en üst düzeye çıkarmasıdır: Zayıflığı ve her yerde bulunma özelliği. Dört kuvvetin içinde maddeyle en zayıf etkileşen, kütleçekimidir. Bu, kütleçekimi dalgalarının ışığa geçirgen olmayan ortamlardan da geçebileceği ve daha önce gizli kalmış olan astrofiziksel alanlara ulaşmamızı sağlayabileceği anlamına gelir. Üstelik *her şey* kütleçekiminin etkisi altında olduğundan (oysa, örneğin elektromanyetik kuvvet, yalnızca elektrik yükü taşıyan cisimleri etkiler) her şey kütleçekimi dalgaları üretme kapasitesine sahiptir ve bu yüzden gözlenebilir bir iz bırakır. Bu nedenle LIGO, evreni inceleme yöntemlerimizde keskin bir dönüş noktasını temsil eder.

Geçmişte tüm yapabildiğimizin, başımızı yukarı kaldırıp gökyüzüne bakmak olduğu bir dönem vardı. Hans Lippershey ve Galileo Galilei teleskop yardımıyla bunu değiştirdi; böylece evrenin büyük manzarası insanların görüş alanına girdi. Ama zamanla, görünür ışığın elektromanyetik spektrumun ancak çok küçük bir bölümünü temsil ettiğini fark ettik. Yirminci yüzyılda kızılötesi, radyo, X-ışını ve gamma ışını teleskoplarının yardımıyla, evren önümüzde yeniden açılarak gözlerimizin almak üzere evrim geçirdiği görünür ışıkla göremediğimiz görkemini ortaya serdi. Şimdi, yirmi birinci yüzyılda göklere bir kez daha bakıyoruz. LIGO ile ve onun getirdiği gelişmelerle * evrene yep-

* Bunlardan henüz planlanma aşamasında olup LIGO'nun uzaydaki benzeri olan Lazer Interferometresi Uzay Anteni (LISA), LIGO'nun uzaydaki benzeri olup LIGO'nun dört kilometre uzunluğundaki tüplerinin rolünü oynamak üzere birbirlerinden milyonlarca kilometre uzakta birden fazla uzay aracı gerektiriyor. Kütleçekimi dalgaları araştırmalarında kritik rol oynayan, aralarında Alman-İngiliz detektörü GE0600, Fransız-İtalyan detektörü VIRGO ve Japon detektörü TAMA300'ün de bulunduğu başka detektörler de vardır.

yeni bir şekilde bakacağız. Elektromanyetik dalgalar yerine kütleçekimi dalgalarını; elektromanyetik kuvvet yerine kütleçekimi kuvvetini kullanacağız.

Bu yeni teknolojinin ne kadar devrimci olduğunu görebilmek için, üzerinde şu anda gezegen dışı bilimcilerin elektromanyetik dalgaları -ışığı- nasıl saptayacaklarını keşfettikleri bir gezegeni gözünüzün önüne getirin ve bu buluşun, onların evrene bakışını kısa sürede nasıl değiştireceğini düşünün. Biz de kütleçekimi dalgalarını henüz keşfetmekte olduğumuzdan benzer bir durumda olabiliriz. Binlerce yıldır evrene yalnızca baktık, şimdi ise insanlık tarihinde ilk defa onu sanki dinleyecek gibiyiz.

Fazladan Boyutları Arayış

1996 öncesi, fazladan boyutları içeren kuramsal modellerin çoğunda, bu boyutların uzunluğunun kabaca Planck boyutlarında (10^{-33} cm) olduğunu varsayıyordu. Bu da çağdaş aletlerle çözümlenebilecek herhangi bir şeyden on yedi büyüklük mertebesi daha küçük olduğu için, mucizevi yeni bir teknoloji bulunmadığı sürece Planck fiziği erişimimizin ötesinde kalacaktır. Ama eğer fazladan boyutlar "büyük" iseler, ki bunun anlamı bir metrenin milyon kere milyon kere yüzde birinden (10^{-20}) daha küçük, yani bir atom çekirdeğinin yaklaşık milyonda biri kadar olmalarıdır, o zaman umut vardır.

Bölüm 13'te incelediğimiz gibi, eğer fazladan boyutların herhangi biri "çok büyük" ise -milimetre boyutlarının birkaç büyüklük mertebesi civarında- o zaman kütleçekiminin kuvvetinin çok hassas ölçümleri bunların varlığını ortaya çıkarabilir. Böyle deneyler birkaç yıldır geliştiriliyor ve teknikler hızla mükemmelleşiyor. Şimdiye kadar, üç boyutlu uzayın bir karakteristiği olan ters kare yasasından hiçbir sapma bulunamadı, bu yüzden araştırmacılar daha küçük uzaklıkları araştırmaya başladılar. Olumlu bir sinyal, deyim yerindeyse fiziği temellerinden sarsacaktır. Böyle bir sinyal, fazladan boyutlara yalnızca kütleçekimi ile ulaşılabilceği konusunda ikna edici bir kanıt ortaya koyacak ve bu

da sicim/M-kuramının zar dünyalar senaryosuna önemli bir destek sağlayacaktır.

Eğer fazladan boyutlar büyüklerse ama çok büyük değilse, hassas kütleçekimi deneylerinin bunların varlığını ortaya çıkar-ması olasılığı zayıftır ama diğer dolaylı yollar hâlâ kullanılabilir kalır. Örneğin, fazladan boyutların büyük olmaları, kütleçekiminin yapısal gücünün önceden düşünüldüğünden daha büyük olduğu anlamına gelir. Kütleçekiminin gözlenen zayıflığı, kütleçekiminin fazladan boyutlara sızması olarak yorumlanır, gerçekten zayıf olduğuna değil; küçük uzaklık ölçeklerinde böyle bir sızma ortaya çıkmadan önce kütleçekimi güçlüdür. Diğer öngörülerin yanı sıra bu, minik kara deliklerin yaratılmasının kütleçekiminin çok daha zayıf olduğu bir evrende gerektireceğinden çok daha az kütle ve enerji gerektireceği anlamına gelir. Bölüm 13'te, şimdi İsviçre'nin Cenevre kentinde inşa edilmekte olan ve 2007'de bitirilmesi planlanan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki yüksek enerjili proton-proton çarpışmalarında böyle minik kara deliklerin oluşmuş olma olasılığını incelemiştik. Bu önemli bir beklentidir. Ama Kentucky Üniversitesi'nden Alfred Shapere ve Irvine'deki Kaliforniya Üniversitesi'nden Jonathan Feng'in ortaya attıkları bir başka olasılık daha var. Bu araştırmacılar, kozmik ışınların da -uzaydan gelen ve sürekli olarak atmosferi döven temel parçacıklar- mikroskopik kara deliklerin oluşumunu başlatmış olabileceğini öne sürüyorlar.

Kozmik ışın parçacıkları 1912 yılında Avusturya'lı bilim insanı Victor Hess tarafından keşfedildi; doksan yıldan daha uzun bir süre sonra hâlâ pek çok sır barındırıyorlar. Her saniye kozmik ışınlar atmosfere çarpıyor, aşağıya doğru hareket eden, sizin ve benim vücudumuzun içinden geçen milyarlarca parçacıktan oluşan parçacık yağmurları başlatıyorlar; bunlardan bazıları tüm Dünya da bu iş için yapılmış olan detektörler tarafından saptanıyorlar. Ama hiç kimse atmosfere çarpan parçacıkların ne tür olduğundan tam emin değil (her ne kadar, bunların proton olduğu yolunda giderek artan bir fikir birliği olsa da) ve bu yüksek enerjili parçacıklardan bazılarının süpernova patlamala-

rından geldiği gerçeğine rağmen hiç kimsenin en yüksek enerjili kozmik parçacıkların nereden kaynaklandığı konusunda herhangi bir fikri yok. Örneğin, 15 Ekim 1991'de Utah çölündeki Sinek Gözü kozmik ışın detektörü, gökyüzünde hareket eden ve enerjisi 30 milyar proton kütesine eşit olan bir parçacık saptadı. Bu hemen hemen tek bir atom-altı parçacığındaki bir Mariano Rivera topunun enerjisine ve yaklaşık olarak Büyük Hadron Çarpıştırıcısında üretilecek parçacık enerjilerinin 100 milyon katına eşit.⁶ Şaşırtıcı olan, bilinen hiçbir tür astrofiziksel sürecin böylesine yüksek enerjili parçacıklar üretmemesi; deneyciler, bu sırrı çözmek umuduyla daha hassas detektörler yapıyor ve daha fazla veri topluyorlar.

Shapere ve Feng için süper-enerjili kozmik ışın parçacıklarının kökeni ikincil öneme sahip. Onlar, bu parçacıklar nereden geliyor olurlarsa olsunlar, eğer kütleçekimi mikroskopik ölçeklerde önceden düşünüldüğünden daha güçlüyse, en yüksek enerjili kozmik parçacıklar atmosfere çarptıklarında minik kara delikler oluşturmaya yetecek kadar yüksek hızlara sahip olacaklarını anlamışlardı.

Atom çarpıştırıcılarında üretilmeleri sırasında böyle minik kara deliklerin deneycilere ya da genelde dış dünyaya bir tehlike oluşturmaları kesinlikle söz konusu değildir. Ortaya çıktıktan hemen sonra bunlar, daha sıradan, karakteristik bir parçacık yağmuru vererek hızla bozunurlar. Gerçekten mikroskobik kara delikler o kadar kısa ömürlüdürler ki, deneyciler onların varlığını doğrudan araştıramaz; detektörlerin üzerine yağın parçacıkları ayrıntılı olarak inceleyerek kara deliklerin kanıtını bulmaya çalışırlar. Dünyadaki en hassas kozmik ışın detektörlerinden olan Pierre Auger Gözlemevi -ki gözlem alanı Rhode Island kadardır- şu anda Arjantin'in batısında devasa bir alan üzerinde inşa halindedir. Shapere ve Feng, eğer fazladan boyutların hepsi 10^{-14} metre kadar büyükse, bir yıllık bir veri toplama süresinden sonra Auger detektörünün atmosferin üst katmanlarında üretilen on kadar minik kara delikten kaynaklanan parçacık yağmurlarını saptayabileceğini hesaplıyorlar. Eğer böyle kara delik izle-

ri bulunmazsa, fazladan boyutların daha küçük olduğu sonucuna varılacaktır. Kozmik ışın çarpışmalarında üretilen kara deliklerin kalıntılarını bulmak elbette zor bir iştir ama başarı fazladan boyutlar, kara delikler, sicim kuramı ve kuantum kütleçekimi konularında ilk deneysel pencereyi açacaktır. Kara delik üretilmesinin ötesinde, önümüzdeki on yılda araştırmacıların fazladan boyutları aramak amacıyla kullanacakları hızlandırıcı-temelli bir yol daha vardır. Fikir, cebinizden kaybolan bozuk paraları açıklamakta kullanılan "koltuk minderleri arasındaki uzay" ın bir çeşitlemesidir.

Fiziğin temel ilkelerinden biri enerjinin korunumudur. Enerji kendini birçok biçimde gösterebilir -beyzbol sopasından seken topun kinetik enerjisi, yukarı doğru uçan topun kütleçekimsel potansiyel enerjisi, top yere çarpıp her türden titreşim yarattığında ortaya çıkan ses ve ısı enerjisi, topun kendisinde gizli olan kütle enerjisi vb- ama bütün enerji taşıyıcıları hesaba katıldığında, sonuçtaki enerji her zaman başlangıçtakine eşittir.⁷ Bu güne kadar bu mükemmel enerji dengesiyle çelişen hiçbir deney olmamıştır.

Ama varsayılan fazladan boyutların kesin büyüklüğüne bağlı olarak son dönemde yenilenen Fermilab ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısındaki aletlerde yapılacak olan deneyler, enerji korunumunu ihlal ediyormuş gibi görünen bir süreci ortaya çıkarabilir: Çarpışmanın sonrasındaki enerji, öncesindeki enerjiden az olabilir. Bunun nedeni, tıpkı kaybolan bozuk paralarınız gibi, (gravitonlar tarafından taşınan) enerjinin, fazladan boyutların ortaya çıkardığı çatlaklara -minik ek uzaylar- sızması ve böylece enerji dengesi hesabında gözden kaçmasıdır. Böylesi bir "ek-sik enerji işareti" olasılığı, evrenin dokusunun doğrudan görebildiğimiz ötesinde bir karmaşıklığa sahip olduğunun bir başka göstergesi olacaktır.

Kuşkusuz iş fazladan boyutlara geldiğinde ben biraz önyargılıyım. Fazladan boyutların özellikleri üzerinde on beş yıldan daha uzun süre çalıştım, o yüzden onlar kalbimde özel bir yere sahip. Ama itiraf etmeliyim ki, pek az keşif benim için bildiğimiz

üç temel boyutun ötesindeki boyutlar konusunda kanıtların bulunmasından daha heyecan verici olabilir. Benim düşünceme göre şu anda doğrulanması fiziki temellerinden bu kadar güçlü saracak ve gerçekliğin temel, görünüşe göre kanıtları ortada olan öğelerini sorgulamamızı gerektirecek bir başka ciddi öneri ortada yok.

Higgs, Süpersimetri ve Sicim Kuramı

Bilinmezliğe doğru yapılan araştırmaların meydan okuyuculuğu ve fazladan boyutlara ilişkin kanıtlar bulma şansının ötesinde, Fermilab'daki hızlandırıcıyı yenilemenin ve dev Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nı inşa etmenin altında yatan özel bazı güdüler de var. Bunlardan biri Higgs parçacıklarını bulmaya çalışmak. Bölüm 9'da incelediğimiz gibi, ele geçmesi zor olan Higgs parçacıkları Higgs alanının -fizikçilerin öne sürdüğü Higgs okyanusunu oluşturan ve diğer temel parçacık türlerine kütlelerini kazandıran alan- en küçük bileşenleridir. Son dönemlerdeki kuramsal ve deneysel çalışmalar Higgs'ın kütlelerinin, proton kütlelerinin yüz ile bin katı arasındaki bir aralıkta olması gerektiğini gösteriyor. Eğer bu aralığın alt ucu doğruysa, Fermilab'ın yakın bir gelecekte bir Higgs parçacığı saptama şansı oldukça yüksektir. Elbette, eğer Fermilab başarısız olursa ve tahmin edilen kütle aralığı yine de doğruysa, on yıl içinde Büyük Hadron Çarpıştırıcısı pek çok Higgs parçacığı bulmalıdır. Higgs parçacıklarının saptanması, kuramsal parçacık fizikçilerinin ve kozmolojistlerin onlarca yıldır öne sürdükleri alan türlerinin varlığını doğrulayacağı için, destekleyen başka herhangi bir kanıt olmaksızın önemli bir kilometre taşı olacaktır.

Hem Fermilab'ın hem de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nın bir başka temel amacı da, süpersimetri kanıtlarını saptamaktır. Bölüm 12'den hatırlayacağımız gibi, süpersimetri parçacıkları spinleri yarım birim farklı olan çiftlere ayırır ve özgün olarak 1970'lerde yapılan sicim kuramı çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Eğer süpersimetri gerçek dünya ile bağlantılı ise, o zaman spini $1/2$ olan, bilinen her parçacık türü için spini 0 olan bir tür olma-

lıdır; spini 1 olan bilinen her parçacık türü için, spini $1/2$ olan bir parçacık türü olmalıdır. Örneğin, spini $1/2$ olan elektron için spini 0 olan ve *süpersimetrik elektron* veya kısaca *selektron* adı verilen bir tür olmalıdır; spini $1/2$ olan kuarklar için spini olan *süpersimetrik kuarklar* veya *skuarklar*, spini $1/2$ olan nötrinolar için spini 0 olan *snötrinolar*, spinleri 1 olan gluonlar, fotonlar, W ve Z parçacıkları için spinleri $1/2$ olan *ghuinolar*, *fotinolar*, *winolar* ve *zinolar* olmalıdır. (Evet, fizikçiler coştı.)

Şimdiye kadar hiç kimse varlıkları öne sürülen bu çiftlerin herhangi birini saptayamadı ve fizikçiler bunun açıklamasının, süpersimetrik parçacıkların, bilinen karşılıklarından çok daha büyük kütleli olmaları olduğunu umuyorlar. Kuramsal çalışmalar, süpersimetrik parçacıkların fotondan bin kat daha büyük kütleli olabileceğini gösteriyor ki, bu durumda bunların deneysel verilerde kendilerini göstermemeleri gizemli olmaktan çıkar: Var olan atom çarpıştırıcıları bunları üretmek için yeterli güce sahip değildir. Gelecek on yılda bu değişecektir. Fermilab'de yenilenen bir hızlandırıcı şimdiden bazı süpersimetrik parçacıkları keşfetmeyi hedefliyor. Tıpkı Higgs'te olduğu gibi, eğer Fermilab süpersimetrinin kanıtlarını bulmakta başarısız olursa ve eğer süpersimetrik parçacıklar için beklenen kütle aralığı doğru ise, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı bunları kolaylıkla üretebilmeli.

Süpersimetrinin doğrulanması parçacık fiziğinde son yirmi yılda ortaya çıkan en büyük gelişme olacaktır. Kavrayışımızda parçacık fiziğinin başarılı standart modelinin ötesindeki adımımızı belirleyecek ve sicim kuramının doğru yolda olduğunun belirtirlerini bulacaktır. Ama dikkat ederseniz sicim kuramının kendisini kanıtlamayacaktır. Süpersimetri, simetri kuramının geliştirilmesi sırasında keşfedilmiş olsa da, fizikçiler çok uzun zamandan beri süpersimetrinin geleneksel nokta-parçacık yaklaşımıyla da kolayca uyushabilecek, daha genel bir ilke olduğunu anlamışlardı. Süpersimetrinin doğrulanması sicim yapısının hayatı önemde bir ögesini ortaya koyacak ve daha sonra yapılacak araştırmalara yol gösterecektir ama sicim kuramının namlusundan hâlâ duman tüten silahı olmayacaktır.

Öte yandan, eğer zar dünyalar kuramı doğru ise, yakın gelecekteki hızlandırıcı deneylerinin sicim kuramını doğrulama potansiyeli vardır. Bölüm 13'de kısaca söz edildiği gibi, eğer zar dünyalar senaryosundaki fazladan boyutlar 10^{-16} cm kadar büyüksse, yalnızca kütleçekimi yapısal olarak önceden düşünöldüğünden daha güçlü olmakla kalmayacak, sicimler de önemli ölçüde daha uzun olacaklardır. Uzun sicimler daha esnek olacaklarından titreşmek için daha az enerjiye ihtiyaç duyarlar. Klasik sicim yapısında sicim titreşim desenleri deneysel olarak erişebileceğimizin milyar kere milyar ötesinde iken, zar dünyalar senaryosunda sicim titreşim desenlerinin enerjileri protonun kütleşinin *bin* katı kadar küçük olabilir. Eğer durum böyle ise, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki yüksek enerjili çarpışmalar, bir piyanonun içinde seken hızlı bir golf topunu andırır; çarpışmalar sicim titreşim desenlerinin birçok "oktav"ını tetikleyecek kadar yüksek enerjilidir. Deneyciler, enerjileri sicim kuramının harmonik rezonanslarına karşılık gelen, yepyeni, daha önce hiç görölmemiş parçacıkların tam bir takımını, yani yeni, daha önce hiç görölmemiş sicim titreşim desenlerinin tam bir takımını saptayacaklardır.

Bu parçacıkların özellikleri ve aralarındaki ilişkiler, yanılgıya yer bırakmayacak şekilde aynı kozmik oyunun bir parçası olduklarını, hepsinin birbirlerinden farklı ama birbirleriyle ilişkili notalar olduklarını, hepsinin tek tür bir nesnenin -bir sicimin- farklı titreşim desenleri olduğunu gösterir. Öngörölebilir bir gelecek için bu, sicim kuramının doğrulanması bakımından en olası senaryodur.

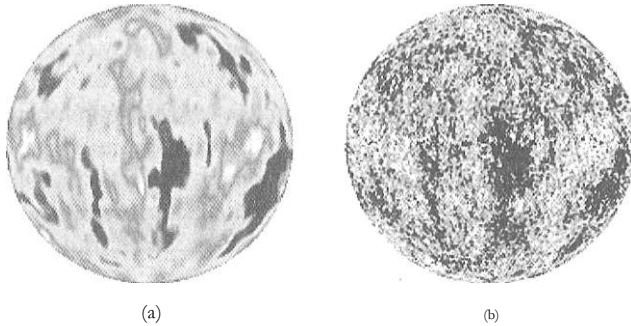
Kozmik Kökenler

Daha önceki bölümlerde gördüğümüz gibi, kozmik mikrodalg fon ışıınımı, 1960'ların ortalarındaki keşfinden bu yana kozmik araştırmalarda önemli bir rol oynamıştı. Bunun nedeni açıktır: Evrenin erken dönemlerinde uzay, elektromanyetik kuvvet aracılığıyla fotonlarla durmaksızın şurada burada çarpışan elektrik yüklü parçacıklarla -elektron ve protonlarla- doluydu. Ama patlamadan yalnızca 300.000 yıl sonra evren, elektronlar

ve protonların elektriksel olarak yüksüz olan atomları oluşturmak üzere bir araya gelebilecekleri kadar soğumuştur ve bu andan itibaren ışıınım, evrenin ilk dönemlerinin bir fotoğrafını verecek şekilde, uzayda çoğunlukla hiç engellenmeden yayılmıştır. Bu ilkel kozmik mikrodalga fotonlarından uzayın her metre küpünden geçen, kabaca 400 milyon tane vardır ki, bunlar ilkel evrenin asıl kalıntılarıdır.

Mikrodalga fon ışıınının ilk ölçümleri, ışıınının sıcaklığının son derece bir örnek olduğunu gösterdi ama Bölüm 11 de incelediğimiz gibi, ilk kez 1992'de Kozmik Fon Kaşifi (Cosmic Background Explorer, COBE) tarafından gerçekleştirilen ve o zamandan buyana geliştirilen yakından inceleme teknikleri ile Şekil 14.4'te gösterildiği gibi bazı küçük sıcaklık değişimlerinin kanıtları bulundu. Veriler gri yelpaze ile kodlanmıştır, açık ve koyu renkli bölgeler bir derecenin yaklaşık binde biri kadar sıcaklık değişimlerini gösterir. Şeklin lekeli görüntüsü, ışıınının gökyüzündeki dağılımındaki küçük ama inkâr edilemeyecek ölçüde gerçek farklılıkları gösteriyor.

Kendi başına etkileyici bir keşif olmakla birlikte COBE deneyi aynı zamanda kozmolojik araştırmaların niteliğinde temel bir değişikliği simgeliyor. COBEDen önce kozmolojik veriler kabaydı. Bir kozmoloji kuramı da ancak astronomi gözlemlerinin



Şekil 14.4 (a) COBE uydusu tarafından toplanan kozmik mikrodalga fon ışıınının verileri. Bu ışıınım, Büyük Patlama'nın yaklaşık 300.000 yıl sonrasında beri Hiçbir engelle karşılaşmadan yayılıyor, o yüzden bu şekil, evrende hemen hemen 14 milyar yıl önce var olan sıcaklık farklılıklarını gösteriyor, (b) WMAP uydusu tarafından toplanan geliştirilmiş veriler

kaba verilerine uyuyorsa, uygulanabilir sayılıyordu. Kuramcılar, gözlemsel sınırlamaları en düşük düzeyde göz önünde bulundurarak birbiri ardı sıra şemalar üretebiliyorlardı. Çok fazla gözlemsel sınırlama yoktu ve olanlar da çok hassas değildi. Ama COBE standartların oldukça yükseltildiği yeni bir dönem başlattı. Şimdi kuramcıların göz önüne alınmak için başarıyla açıklaması gereken, gittikçe artan miktarlarda çok hassas veriler var. 2001'de NASA ve Princeton Üniversitesi'nin ortak girişimi olan Wilkinson Mikrodalga Anizotropi (Yönsüzlük) Sondası (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP), mikrodalga fon ışıınımını COBE'nin yaklaşık kırk katı çözünürlük ve hassasiyetle ölçmek üzere fırlatıldı. Şekil 14.4b'de görülen WMAP'in ilk sonuçlarını, Şekil 14.4a'da görülen COBE'nin sonuçlarıyla karşılaştırırsanız, WMAP'in nasıl daha hassas ve ayrıntılı bir görüntü sağladığını hemen görebilirsiniz. Avrupa Uzay Ajansı tarafından geliştirilen bir başka uydu olan *Planck*'ın 2007 de fırlatılması planlanmıştır ve her şey yolunda giderse, uydunun çözünürlüğü WMAP'inkinin on katı olacaktır.

Hassas verilerin toplanması, kozmolojideki öneriler alanında ayrışmalara neden oldu, şişme modeli savaşımını açık ara en önlere veriyordu. Ama Bölüm 10'da söz ettiğimiz gibi, şişme kozmolojisi tek kuram değildir. Kuramcılar bunun *birçok* farklı versiyonunu önermişlerdir (birkaçının adını vermek gerekirse, eski şişme, yeni şişme, ılık şişme, hibrid şişme, hiperşişme, yardım alan şişme, sonsuz şişme, genişletilmiş şişme, kaotik şişme, çift şişme, zayıf-ölçekli şişme, hiperdoğal şişme). Bunlardan her birinin ayırt edici özelliği kısa süreli bir şişme patlaması olup, her birinin ayrıntıları farklıdır (alan sayıları ve alan değerlerinin kaldığı platoların yer aldığı potansiyel enerji şekilleri vb). Bu farklar mikrodalga fon ışıınımının özellikleri konusunda birbirinden biraz farklı öngörülere yol açar (farklı enerjilere sahip olan farklı alanlar, birbirlerinden hafifçe farklı kuantum dalgalanmalarına yol açarlar). WMAP ve Planck verileriyle karşılaştırma, pek çok öneriyi eleyerek kavrayışımızı önemli ölçüde artırır

Aslında veriler alanı daha da daraltabilir. Her ne kadar şişme genişlemesi tarafından gerilen kuantum dalgalanmaları, gözlenen sıcaklık değişimleri için ikna edici bir açıklama getiriyorsa da, bu modelin bir rakibi vardır. Bölüm 13'te tarif edilen Steinhart ve Turok'un yinelenen kozmolojik modeli bir öneri seçeneği sunar. Yinelenen modeldeki iki tane üç-zar yavaşça birbirlerine doğru yaklaşırken, kuantum dalgalanmaları farklı bölgelerin çok az farklı hızlarla yaklaşmalarına neden olur. Trilyonlarca yıl sonra tam olarak çarpıştıklarında zarlar üzerindeki farklı noktalar çok az farklı anlarda temas eder. Bunu, iki zımpara kâğıdını yüz yüze bir araya getirmeye benzetebiliriz. Mükemmel birörnek temastan minik sapmalar, zarların her birinde mükemmel birörnek bir evrimden minik sapmalara yol açar. Bu zarlardan birinin bizim üç boyutlu uzayımız olduğu varsayıldığı için, birörneklikten sapmalar, bizim saptayabileceğimiz sapmalar olmalıdır. Steinhart, Turok ve çalışma arkadaşları, türdeşlikteki bozuklukların şişme yapısından kaynaklanana benzer sıcaklık farklılıklarına yol açtığını öne sürmüşlerdi ve bu yüzden, günümüzün verileriyle yinelenen model, gözlemler için aynı derecede uygulanabilir bir model oluşturmaktadır.

Bununla birlikte, önümüzdeki on yılda toplanacak olan daha rafine veriler iki yaklaşım arasındaki farkı ortaya koyabilir. Şişme yapısında yalnızca şişme alanındaki kuantum dalgalanmaları üstel genişleme patlaması tarafından gerilmekle kalmaz, bunun yanı sıra uzayın dokusundaki minik kuantum dalgacıkları da dışarıya doğru yoğun gerilmenin etkisiyle üretilirler. Uzaydaki dalgacıklar kütleçekimsel dalgalardan başka bir şey olmadıklarından (daha önce LIGO'yu incelerken gördüğümüz gibi), şişme yapısı kütleçekimi dalgalarının evrenin ilk anlarında üretildiklerini öngörür.⁸

Bunları, daha yakın zamanlarda şiddetli astrofiziksel olaylarda üretilenlerden ayırt etmek için, bunlara çoğunlukla *ilkel kütleçekimsel dalgalar* adı verilir. Yinelenen modelde, tersine, mükemmel birörneklikten sapış çok yavaş, zarlar birbirlerine doğru trilyonlarca yılda yavaş yavaş yaklaşırlarken, hemen hemen

ölçülemeyecek kadar uzun bir zamanda gerçekleşir. Zarların ve uzayın geometrisinde hızlı ve şiddetli bir değişiklik olmaması uzaysal dalgacıkların üretilmediği anlamına gelir, o yüzden yinelenen modelde ilkel kütleçekimsel dalgaların yeri yoktur.

Bu nedenle, eğer ilkel kozmolojik kütleçekimsel dalgalar saptanırsa, bu, şişme yapısının bir başka zaferi olacak ve böylece yinelenen yaklaşımı ortadan kaldıracaktır.

LIGO'nun, şişmenin öngördüğü kütleçekimsel dalgaları algılayabilecek kadar hassas olması pek olası değildir ama bu dalgaların dolaylı yoldan ya Planck ya da şu anda planlanma aşamasında olan Kozmik Mikrodalga Fon Polarizasyon deneyi (Cosmic Microwave Background Polarization experiment, CMPBPol) tarafından algılanması olasılığı vardır. Planck ve özellikle CMBPol yalnızca mikrodalga fon ışınlamındaki sıcaklık değişikliklerine odaklanmayacaklar, saptanan mikrodalga fotonlarının ortalama spin yönlerini, yani *polarizasyonlarını* da ölçeceklerdir. Burada inceleyemeyeceğimiz kadar karmaşık bir düşünüş mantık zinciriyle, Büyük Patlama'dan kaynaklanan kütleçekimi dalgaları, mikrodalga fon ışınlamı fotonlarının polarizasyonları üzerinde belirgin izler bırakır. Bu izler belki de ölçülecek kadar büyük olabilir.

Böylece, on yıl içinde, patlamanın aslında bir çarpışma olup olmadığı, farkında olduğumuz evrenin gerçekten bir üç-zar olup olmadığı yolunda kesin bir fikre sahip olabiliriz. Kozmolojinin altın çağına en inanılmaz fikirlerin bazıları gerçekten sınanabilir.

Karanlık Madde, Karanlık Enerji ve Evrenin Geleceği

Bölüm 10'da evrenin içeriğinin yalnızca yüzde 5'inin bildiğimiz maddeyi meydana getiren bileşenlerden, protonlar ve nötronlardan (elektronlar bildiğimiz maddenin kütlesinin yüzde 0,05'inden daha azını oluşturur) oluşurken, yüzde 25'inin karanlık maddeden, yüzde 70'ininse karanlık enerjiden oluştuğu yolunda güçlü kanıtlar görmüştük. Ama bu karanlık şeyin ayrıntılı kimliği konusunda hâlâ önemli belirsizlikler var. Doğal bir

tahmin, karanlık maddenin yine proton ve nötronlardan oluştuğu, bunların ışık-sağan yıldızları oluşturmak üzere bir araya gelmekten bir şekilde kaçınabilen parçacıklar olabileceğidir. Ama bir başka kuramsal görüş bu olasılığı çok zayıflatıyor.

Ayrıntılı gözlemler aracılığıyla astronomlar evrene saçılmış durumda olan hafif elementlerin -hidrojen, helyum, döteryum ve lityum- ortalama göreceli bolluğu konusunda net bir bilgiye sahiptir. Bu bolluklar büyük bir kesinlikle evrenin ilk dakikalarında bu çekirdekleri sentezleyen süreçlerin kuramsal hesaplarıyla uyum içindedir. Bu uyum, modern kuramsal kozmolojinin en büyük başarılarından biridir. Bununla birlikte bu hesaplar, karanlık maddenin çok büyük bir bölümünün proton ve nötronlardan *oluşmadığını* varsayıyor; eğer, proton ve nötronlar kozmolojik ölçeklerde başat bileşenlerse, kozmik reçete bir kenara fırlatılır ve hesaplar, gözlemlerin doğrulamadığı sonuçlara ulaşırlar.

O zaman, eğer proton ve nötronlar değilse, karanlık maddeyi oluşturan nedir? Bugün için kimse bilmiyor, ama öneriden bol bir şey yok. Adayların adları axionlardan zinolara kadar bir gamda yer alıyor ve hiç kuşkusuz cevabı bulan Stockholm'ü ziyaret edecek. Şimdiye kadar hiç kimsenin bir karanlık madde parçacığı saptamamış olması bütün önerileri baskılıyor. Bunun nedeni, karanlık maddenin yalnızca uzayda yer almaması, evrene dağılmış olması ve bu yüzden burada, yeryüzünde bizim de içinde yüzüyor olmamızdır. Birçok öneriye göre şu anda milyarlarca karanlık madde parçacığı her saniye vücudumuzun içinden geçiyor, bu nedenle mantıklı adaylar yalnızca büyük miktarda maddenin içinden önemli hiçbir iz bırakmadan geçen parçacıklar olabilir.

Nötrinolar bir olasılıktır. Hesaplar, Büyük Patlama da üretilmelerinden bu yana, kalıntı bolluklarının uzayın her metre kübünde 55 milyon olduğunu gösteriyor, bu nedenle eğer üç nötrino türünden birinin kütlesi, proton kütlesinin yaklaşık yüz milyonda biri (10^{-8}) kadar olsa, karanlık maddeyi oluşturabilir. Her ne kadar son dönemlerdeki deneyler nötrinoların kütlesi olduğu yolunda güçlü kanıtlar ortaya koymuş olsa da, şu andaki verilere

göre kütleleri karanlık maddeyi oluşturamayacak kadar küçük; olması gerekenin neredeyse yüz kat altında kalıyorlar.

Gelecek vadeden bir diğer öneri, süpersimetrik parçacıkları, özellikle de *fotino*, *zino*, ve *biggsino*'yu (foton, Z parçacığı ve Higgs'in süpersimetrik parçacıkları) öne sürüyor. Bunlar süpersimetrik parçacıkların en utangaçlarındandır -yerkürenin içinden büyük bir kolaylıkla, hiçbir iz bırakmadan geçebilirler- ve bu yüzden saptanmaktan kolayca kurtulmuş olabilirler⁹. Bu parçacıklardan kaç tanesinin Büyük Patlama'da üretilip günümüze kadar varlıklarını sürdürdüğüne ilişkin hesaplardan fizikçiler karanlık maddeyi oluşturabilmek için, proton kütesinin yaklaşık 100 ile 1000 katı arasında kütleye ihtiyaç duyulacağını tahmin ediyorlar. Bu, merak uyandırıcı bir sayıdır, çünkü süpersimetrik parçacık modellerine ve süpersicim kuramına ilişkin çeşitli çalışmalarda, karanlık maddeye ya da kozmolojiye bir bağlantı olmaksızın bu parçacıklar için aynı kütle aralığı bulunmuştur. Elbette karanlık madde gerçekten süpersimetrik parçacıklardan oluşmuyorsa bu, şaşırtıcı ve tümüyle açıklanamayan bir ortak varış noktasıdır. Bu yüzden, Dünya'da halen çalışan ve ya beklemedeki hızlandırıcılarda süpersimetrik parçacıkların araştırılmasına karanlık maddenin en favori adayı konusundaki araştırmalar gözüyle de bakılabilir.

Dünyanın içinden geçen karanlık madde parçacıkları konusunda daha doğrudan araştırmalar, her ne kadar bunlar son derece iddialı deneyler olsa da, bir süreden beri hazırlık aşamasındaydı. Madeni para boyutlarındaki bir bölgeden her saniye geçen bir milyon ya da daha fazla karanlık madde parçacığının, en fazla günde bir tanesi farklı deneycilerin yaptığı özel tasarımı detektörlerde bir iz bırakabilir. Bugüne kadar doğrulanmış bir karanlık madde saptanması gerçekleşmedi.¹⁰ Ödül hâlâ ortada olduğundan, araştırmacılar geleceğe yönelik olarak yoğun biçimde çalışıyorlar. Karanlık maddenin kimliğinin önümüzdeki birkaç yıl içinde açıklığa kavuşma olasılığı oldukça yüksektir.

Karanlık maddenin varlığının kesin doğrulanması ve bileşiminin belirlenmesi büyük bir ilerleme olacaktır. Tarihte ilk defa

son derece temel ve şaşırtıcı biçimde ele geçmez bir şey öğreneceğiz: Evrenin madde içeriğinin ezici çoğunluğunun bileşimini.

Yine de, Bölüm 10'da gördüğümüz gibi, son dönemde elde edilen veriler, karanlık maddenin kimliği tanımlanmış olsa bile, geriye deneysel olarak doğrulanmak zorunda olan bir konunun kalacağını gösteriyor: Evrendeki toplam enerjinin yüzde 70'ini açıklayan, dışarıya doğru iten kozmoloji sabiti konusunda kanıtlar sağlayan süpernova gözlemleri. Son on yılın en heyecan verici ve beklenmedik keşfi olarak, kozmoloji sabiti konusundaki kanıtın -uzayı dolduran enerji- kesin bir biçimde doğrulanmaya ihtiyacı vardır. Bu konuda birçok yaklaşım ya planlanmış ya da uygulanmaya başlamıştır.

Mikrodalga fon deneyleri de burada önemli rol oynar. Şekil 14.4'teki lekelerin boyutu -her leke sıcaklığın sabit olduğu bir bölgedir- uzaysal dokunun genel şeklini yansıtır. Eğer uzay Şekil 8.6a'daki gibi küre biçiminde şekillenmişse, dışarıya doğru şişme lekelerin Şekil 14.4b'de olduğundan daha büyük olmalarına neden olur; eğer uzay Şekil 8.6c'deki gibi eyer şeklindeyse, içeriye doğru büzülme lekelerin biraz daha küçük olmalarına neden olur; eğer uzay Şekil 14.4b'deki gibi düzse, lekelerin büyüklüğü bu ikisinin arasına bir yerde olur. COBE tarafından başlatılan ve WMAP tarafından geliştirilen hassas ölçümler uzayın **düz** olduğu yolundaki öneriyi kuvvetle destekliyor. Bu, yalnızca şişme modellerinden gelen kuramsal beklentilerle uyuşmakla kalmaz, aynı zamanda süpernova sonuçları ile de mükemmel bir biçimde tutarlıdır. Görmüş olduğumuz gibi, uzaysal olarak düz bir evren toplam kütle/enerji yoğunluğunun kritik yoğunluğa eşit olmasını gerektirir. Bildiğimiz ve karanlık madde yüzde 30 katkı yaparken karanlık enerjinin katkısı da yüzde 70 olur ve her şey etkileyici bir biçimde uyuşur.

Süpernova sonuçlarının daha dolaysız doğrulanması SüperNova/İvme Sondası'nın (SuperNova/Acceleration Probe, SNAP) amacıdır. Lawrence Berkeley Laboratuvarı'ndaki bilim insanlarınca önerilmiş olan SNAP, şimdiye kadar gözlenmiş olan süpernovaların yirmi katından daha fazlasını gözleme ve

ölçme kapasitesine sahip, uyduda çalışan bir yörünge teleskobu olacaktır. SNAP evrenin yüzde 70'inin karanlık enerji olduğu yolundaki eski sonuçları doğrulamakla kalmayacak, aynı zamanda karanlık enerjinin doğasını daha büyük bir kesinlikle belirleyebilecektir.

Gördüğünüz gibi, her ne kadar karanlık enerjiyi Einstein'ın kozmoloji sabitinin -uzayı genişlemeye zorlayan sabit, değişmeyen bir enerji- bir türü olarak tanımlamışsam da, bununla yakından bağlantılı, farklı bir olasılık daha vardır. Şişme kozmolojisi (ve sıçrayan kurbağa) tartışmamızdan, değeri en düşük değerinin üzerinde kalan bir alanın, uzayın genişlemesini sağlayan ama bunu kısa bir süre için yapan bir kozmoloji sabiti olarak davranabileceğini hatırlayın. Er ya da geç, alan bir yolunu bularak potansiyel enerji kâsesinin dibine kayacak ve genişleme ortadan kalkacaktır. Şişme kozmolojisinde bu, saniyenin küçük bir kesrinde olup biter. Ama fizikçiler, yeni bir alan oluşturarak ve potansiyel enerjinin şeklini dikkatlice seçerek ivmeli genişlemenin çok daha yumuşak olmasını ama çok daha uzun sürmesini sağlayacak yollar bulmuşlardır. Alan, en düşük enerji değerine doğru yavaşça kayarken genişlemeyi görelî olarak daha yavaş bir oranda sürdürür ama bunu saniyenin kesri yerine milyarlarca yılda yapar. Bu durumda şöyle bir olasılık ortaya çıkıyor: Şu anda biz, evrenin ilk anlarında gerçekleştiğine inanılan şişme patlamasının son derece yumuşak bir türünü yaşıyor olabiliriz.

Gerçek bir kozmoloji sabiti ile ikinci olasılık arasında öz olarak bilinen farkın günümüzdeki önemi çok az olmakla birlikte, evrenin uzun-dönemli geleceği üzerinde derin etkileri vardır. Kozmoloji sabiti bir *sabitir*. Hiç bitmeyen ivmeli bir genişleme sağlar, öyle ki, evren giderek daha hızlı genişleyecek, içeriği seyrekeleşecek ve sonunda bomboş kalacaktır. Ama öz, bir noktada neredeyse durmaya yaklaşan ivmeli bir genişleme sağlayarak uzak gelecekte, sonsuz genişlemenin gerektirdiğinden daha az kasvetli, daha az çıplak bir evren ortaya koyar. SNAP; uzun dönemlerde uzayın ivmesindeki değişiklikleri ölçerek (çeşitli uzaklıklardaki, dolayısıyla geçmişte çeşitli zamanlardaki süpernova-

ları gözlenmesi yoluyla) iki olasılığı birbirinden ayırabilir. Karanlık enerjinin gerçekten bir kozmoloji sabiti olup olmadığını belirlemek yoluyla SNAP bize, evrenin uzun-dönemdeki kaderi konusunda bir fikir verecektir.

Uzay, Zaman ve Spekölasyon

Uzay ve zamanın doğasını keşfetmek için yapılan yolculuk uzun olup birçok sürprizlerle doludur ve kuşkusuz henüz ilk aşamalarındadır. Son birkaç yüzyıl boyunca art arda gelen, uzay ve zaman konularındaki kavrayışımızı sürekli bir biçimde kökten yeniden biçimlendiren atılımlar gördük. Bu kitapta incelediğimiz kuramsal ve deneysel öneriler bu fikirlerin bizim kuşağımızca yeniden biçimlendirilmelerini temsil eder ve büyük olasılıkla bizim bilimsel mirasımızın büyük bölümünü oluşturacaktır. Bölüm 16'da bu yolculuğun sonraki birkaç adımı olabilecek gelişmelere ışık tutmaya çabalarken en son ve tahmini gelişmelerden bazılarını tartışacağız. Ama önce, Bölüm 15'te farklı yönde tahminlerde bulunacağız.

Bilimsel keşif için bilinen bir kalıp olmasa da, tarih, genelde derin kavrayışın teknolojik kontrole yönelik ilk adım olduğunu gösteriyor. 1800'lerde elektromanyetik kuvveti kavrayışımız, bizi sonunda telgraf, radyo ve televizyona götürdü. Bu bilgiyi daha sonra geliştirilen kuantum mekaniği kavrayışıyla birleştirerek bilgisayarları, lazerleri ve burada sayamayacağımız kadar çok olan elektronik aletleri geliştirebildik. Nükleer kuvvetlerin anlaşılması, Dünya'nın gördüğü en güçlü silahlar konusunda bize tehlikeli bir uzmanlık sağladı ve belki de bütün Dünyanın enerjisini bir gün biraz tuzlu sudan sağlayabilmemize olanak verecek teknolojileri geliştirmemize yardımcı oldu. Uzay ve zaman konusunda giderek derinleşen kavrayışımız da acaba benzer bir keşif ve gelişme kalıbının ilk adımı olabilir mi? Acaba bir gün uzay ve zamanın efendisi olarak bugün yalnızca bilim-kurgu konusu olabilecek şeyleri yapabilecek miyiz?

Bunu kimse bilmiyor. Ama gelin ne kadar ilerlediğimizi ve bunu sürdürmek için nelerin gerekli olduğunu görelim.

Tele-Taşıyıcılar ve Zaman Makineleri

Uzay ve Zamanda Yolculuk

Belki de 1960'larda hayal gücünden yoksundum ama beni gerçekten şaşırtan ve inanılmaz gelen şey, *Atılgan*'da bulunan bilgisayardı. İlkokulda edindiğim anlayış, yoldan çıktığım gibi soluğu sular seller misali İngilizce konuşan uzaylılarla dolu bir evrende alma konusunda şiirsel bir ehliyet kazandırmıştı bana. Ama istendiği anda tarihte yaşamış herhangi bir kimsenin fotoğrafını gösteren, üretilmiş herhangi bir aletin teknik ayrıntılarını veren ya da yazılmış herhangi bir kitaba ulaşmanızı sağlayan bir makine? Kuşkuculuğumu rafa kaldırmaya zorlayan da *bu oldu*. 1960'ların sonlarında bu kadar çok bilgiyi bir araya getirmenin, saklamanın ve bu bilgiye anında ulaşmanın hiçbir yolunun olmadığına kalıbımı basabilirdim. Ama yarım yüzyıldan daha kısa bir süre sonra dizüstü bilgisayarım, kablolu internet bağlantım ve ses tanıma yazılımımla mutfakta oturuyor ve kimi önemli, kimi önemsiz olan devasa bir

bilgi denizinin içinde parmağımı kımıldatmadan Kaptan Kirk'i oynuyorum. Doğru, *Atılgan'*ı yirmi üçüncü yüzyılında betimlenen bilgisayarların hızı hâlâ imrenilecek gibi ama o zaman geldiğinde bizim teknolojimizin de hayalleri kurulan beklentileri aşacağı kolayca öngörülebilir.

Bu örnek, bilim kurgunun geleceği önceden sezme yeteneğinin artık klişe haline gelmiş örneklerinden yalnızca biridir. Ama ya birisinin içine girip bir düğmeye basarak çok uzak bir yere veya bir başka zamana gittiği, aletlerin en gizemlisi? Acaba günün birinde çok uzun zamandır içine hapsolmuş olduğumuz uzaysal mekândan ve zamansal dönemden sıyrılıp uzayın ve zamanın en uzak köşelerini araştırmamız mümkün olabilecek mi? Yoksa bilim kurgu ile gerçeklik arasındaki çizgi sonsuza kadar hep öyle mi kalacak? Çocukluğumdaki bilgi devrimini önceden tahmin etme başarısızlığını yaşamış biri olarak gelecekteki teknolojik atılımları öngörme yeteneklerimi sorguluyor olabilirsiniz. O yüzden bu bölümde neyin olabileceği üzerine tahminlerde bulunmak yerine, tele-taşıyıcılar ve zaman makinelerini gerçekleştirmeye doğru hem kuramsal hem de deneysel olarak gerçekten ne kadar ilerlediğimizi ve daha da ileri giderek uzay ve zamanda tam kontrolü elde etmenin neye malolacağını anlatmaya çalışacağım.

Bir Kuantum Dünyasında Tele-Taşıma

Geleneksel bilim kurgu betimlemelerinde *tele-taşıyıcı* (veya *Uzay Yolu* ağzıyla ışınlayıcı) ayrıntılı bileşimini belirlemek için bir cismi tarar ve bu bilgiyi cismin tekrar oluşturulduğu uzak bir konuma gönderir. Bir kurgudan diğerine değişmekle birlikte, ya cismin kendisi "maddesizleştirilerek" atom ve molekülleri tekrar birleştirilmek üzere bir planla birlikte gönderilir ya da alıcı tarafındaki atom ve moleküller cismin tam bir kopyasını oluşturmak üzere birleştirilir. Göreceğimiz gibi, son on yılda tele-taşıma için geliştirilen bilimsel yaklaşım, bu ikinciye daha uygundur ve bu durumda ortaya iki temel soru çıkar. Birincisi zorlu bir felsefi bilmedir: Eğer başarılabilirse, tam kopya ne zaman aslı imiş gibi tanımlanacak, adlandırılacak, çağırılacak ya da ona aslı imiş

gibi davranılacaktır? İkincisi de, ilke olarak bile olsa, bir cisim i inceleyerek bileşimini, onu yeniden oluşturmaya sağlayacak bir planını çıkarmaya yetecek bir mükemmellikte belirlemenin mümkün olup olmadığıdır.

Klasik fizik yasalarıyla yönetilen bir evrende, ikinci soruya verilecek cevap evet olacaktır. İlke olarak bir cisim i oluşturan her parçacığa ilişkin bilgiler -her parçacığın kimliği, konumu, hızı vb- tam bir kesinlikle ölçülebilir, uzak bir yere gönderilebilir ve cisim i yeniden yaratmak için bir el kitapçığı olarak kullanılabilir. Bir avuç temel parçacıktan daha fazla sayıda parçacıktan oluşan bir cisim için bunu yapmak olanaksız derecesinde güçtür ama klasik evrende engel fizik değil karmaşıklık olacaktır.

Kuantum fiziğı yasalarıyla yönetilen bir evrende -bizim evrenimiz- durum çok daha zordur. Ölçme işleminin, bir cismin olası bütün durumlarının bir arada bulunduğu kuantum pusunun içinden bir anda sıyrılıp belirli bir değ er almasına neden olduğunu öğrenmiştik. Örneğ in, bir parçacığı gözlediğ imizde bulduğ umuz kesin nitelikler, genel olarak ona bakmamızdan bir an önce içinde bulunduğu niteliklerin bulanık kuantum karışımının bir yansıması değildir.¹ Bu yüzden eğer bir cismin aynısını yapmak istiyorsak, bir kuantum yakalama oyunuyla karşı karşıyayız demektir. Aynısını yapmak için, neyin aynısını yapacağımızı gözlemeliyiz. Ama gözlem işlemi değ işime neden olur, bu yüzden eğer gördüğümüzün aynısını yapacaksak bu, biz bakmadan önceki şeyin aynısı olmaz. Bu da bir kuantum evreninde tele-taşımanın, yalnızca karmaşıklıktan kaynaklanan pratik sınırlamalar nedeniyle değil, kuantum mekaniğinin yapısında bulunan temel sınırlamalar nedeniyle gerçekleştirilemeyeceğı anlamına gelir. Bununla birlikte gelecek bölümde göreğ imiz gibi, 1960'larda uluslararası bir fizikçi ekibi, bu sonucu engelleyen, zekice bir yol bulmuştu.

İlk soruya gelince, cismin aslı ve kopyası arasındaki ilişkiler bakımından kuantum fiziğı hem kesin hem de cesaret verici olan bir cevap verir. Kuantum mekaniğ ine göre evrendeki her elektron diğ eriyle aynıdır. Hepsinin kütleleri, elektrik yükleri, zayıf ve güçlü nükleer kuvvet özellikleri ve toplam spinleri tam olarak

diğerleri ile aynıdır. Üstelik iyi sınanmış olan kuantum mekaniğine özgü tanımlamalarımız, bunların bir elektronun sahip olabileceği özelliklerin *tamamı* olduğunu söyler: Elektronların bütün bu özellikleri birbirleri ile aynıdır ve başkaca göz önüne alınması gereken özellik yoktur. Aynı anlamda her yukarı-kuark diğerleriyle aynıdır, her aşağı-kuark diğerleriyle aynıdır, her foton diğerleriyle aynıdır, bütün diğer parçacık türleri için de bu, böyledir. Kuantum uygulayıcıları tarafından onlarca yıl önce anlaşıldığı gibi, parçacıklar bir alanın olası en küçük paketçikleri olarak düşünülebilirler (örneğin fotonlar elektromanyetik alanın en küçük paketçikleridir) ve kuantum fiziği aynı alanın böyle en küçük bileşenlerinin her zaman aynı olduğunu gösterir. (Veya sicim kuramı yapısında, aynı türden parçacıkların özellikleri aynıdır çünkü bunlar tek bir sicim türünün aynı titreşimleridir.)

Aynı türden iki parçacık arasında değişebilecek olan, bunların farklı konumlarda bulunabilme olasılıkları, spinlerinin belirli yönleri gösterme olasılıkları ve belirli hızlara ve enerjilere sahip olma olasılıklarıdır. Veya fizikçilerin daha kısa ve özlü olarak dedikleri gibi, iki parçacık farklı *kuantum durumlarında* bulunabilirler. Ama eğer aynı türden iki parçacık aynı kuantum durumunda ise -bir parçacığın yüksek bir olasılıkla *orada* olması, diğer parçacığınca yüksek bir olasılıkla *burada* olması dışında- kuantum mekaniği yasaları bunların yalnızca pratikte değil, ilke olarak da birbirinden ayırt edilememesine neden olur. Bunlar mükemmel ikizlerdir. Eğer birisi bu parçacıkların yerlerini değiştirirse (daha doğru bir deyişle, bu parçacıkların verilen bir konumda olma olasılıklarını değiştirirse) bunu anlamamanın kesinlikle hiçbir yolu yoktur.

Bu yüzden, eğer burada konumlanmış* bir parçacıkla başladığımızı varsayarsak ve aynı türden bir parçacığın uzak bir

** Tele-taşıma buradaki bir şeyin uzak bir yerde ortaya çıkması olduğu için, bu bölümde sık sık bu parçacıklardan sanki kesin konumlara sahipmişler gibi söz edebilirim. Daha kesin konuşmak gerekirse, her zaman "burada olma olasılığı yüksek olan bir parçacık" veya "yüzde 99 olasılıkla burada konumlanmış olan bir parçacık" demem, uzaktaki konum için de aynı terimleri kullanmam gerekir. Ama sözü çok uzatmamak için daha sıradan bir dil kullanacağım.

yerde, bir şekilde tam olarak aynı kuantum durumunda olmasını sağlarsak (spin yönü, enerji vb. için aynı olasılıklar), ortaya çıkan parçacık özgün parçacıktan ayırt edilemez ve bu süreç haklı olarak kuantum tele-taşıma adı verilebilir. Elbette özgün parçacık varlığını sürdürüyorsa bu sürece kuantum kopyalamaya da kuantum faksalama adını da verebilirsiniz. Ama göreceğimiz gibi, bu fikirlerin bilimsel olarak gerçekleştirilmesi özgün parçacığın korunmasını sağlamaz -parçacık tele-taşıma sırasında kaçınılmaz olarak değişikliğe uğrar- o nedenle bu ikilemle karşılaşmayacağız.

işin filozofların da çeşitli şekillerde yakından incelediği, daha baskılayıcı yanı, tek bir parçacık için doğru olan bir şeyin bir yığın için de doğru olup olmadığıdır. Eğer otomobilinizi oluşturan her parçacığı, her birinin kuantum durumunu ve aralarındaki ilişkileri koruyarak, yüzde 100 doğrulukla tele-taşıma ile başka bir yere taşıyabilseydiniz, otomobilinizi tele-taşımış olur muydunuz? Her ne kadar bize kılavuzluk yapacak deneysel bir kanıtımız yoksa da, tele-taşınmış bir otomobile sahip olma konusunda kuramsal destek güçlüdür. Bir cismin nasıl görüldüğünü, nasıl bir his uyandırdığını, nasıl ses çıkardığını, nasıl koktuğunu, hatta tadının nasıl olduğunu atom ve moleküller arasındaki ilişkiler belirler. O yüzden ortaya çıkan otomobil, özgün araca her şeyiyle benzemelidir -çarpıkları, çizikleri, gıcırdayan sürücü kapısı, içine sinmiş olan köpeğinizin kokusu, her şey- ve otomobil, tıpkı özgün araç gibi keskin dönemeç alabilmeli, gaz pedalına sonuna kadar basıldığında tam olarak aynı tepkiyi vermelidir. Aracın gerçekten özgün mü yoksa tam bir kopya mı olduğu sorusunun önemi yoktur. Eğer otomobilinizi New York'tan Londra'ya getirmeleri için Birleşik Kuantum Taşımacılık (United Quantum Van Lines) kargo şirketiyle anlaşmış olsanız ve onlar da size haber vermeden otomobilinizi, yukarda anlatıldığı gibi tele-taşımış olsalar, larkı, ilke olarak bile olsa anlayamazdınız.

Ama kargo şirketi aynı şeyi kedinize yapsaydı veya uçakta verilen yemeklerden bıktığınız için Atlas Okyanusu-ötesi yolculuğunuzu tele-taşıma yöntemiyle yapmaya karar verseydiniz? Alı-

cı odadan çıkan kedi veya insan, tele-taşıyıcıya girenle aynı olur mu? Kişisel olarak ben öyle düşünüyorum. Tekrarlayayım, elde bu konuda veri olmadığı için ancak tahminde bulunabilirim. Ama benim düşünce biçimime göre, bileşen atomları ve molekülleri benimkilerle tam olarak aynı kuantum durumunda olan birisi *benimdir*. Hatta özgün "ben ", "kopya" yapıldıktan sonra varlığını sürdürüyor olsa bile, hiç duraksamadan bunlardan ikisinin de ben olduğumu söyleyebilirim (söyleyebiliriz). İkimizin de aklı (zihni), hiçbirimizin diğerine önceliği olmadığı konusunda -tamamıyla- aynı olacaktır. Düşünceler, hatıralar, duygular ve kararların insan vücudunun atomik ve moleküler özelliklerinde fiziksel bir temeli vardır; bu temel bileşenlerin aynı kuantum durumunda olmaları aynı bilinç durumuyla sonuçlanmalıdır. Zaman geçtikçe deneyimlerimiz bizi farklılaştıracaktır ama bu andan sonra gerçekten iki ben olacağına inanıyorum. Bunlardan biri gerçek "ben", diğeri "kopya" olmayacaktır.

Aslında bu konuda biraz daha serbest olmak istiyorum. Fiziksel bileşimimiz sürekli olarak -kimi küçük, kimi büyük- dönüşümlere uğruyor ama aynı insan olarak kalmaya devam ediyoruz. Kanımızı yağ ve şekerle doyuran dondurmadan tutun, beynimizdeki çeşitli atomların spin eksenlerini değiştiren MRI çekimlerine, kalp nakline, yağ aldırma operasyonlarına, insan vücudunda ortalama olarak saniyenin her milyonda birinde değişen trilyonlarca atoma kadar sürekli bir değişim içinde olmamıza rağmen, kişisel kimliğimiz etkilenmiyor. O yüzden eğer tele-taşıma benim fiziksel durumumu tıpatıp kopyalamasa bile, yine de ortaya çıkan kişi benden ayırt edilemez. Bana göre, bu ben *olur*.

Elbette yaşamın, özellikle de bilinçli yaşamın fiziksel bileşiminin ötesinde bir şeyleri daha olduğuna inanıyorsanız, o zaman sizin başarılı tele-taşıma konusundaki standartlarınız benimkilerden daha katı olacaktır. Bu ilginç konu -kişisel kimliğimizin fiziksel yapımıza nereye kadar bağlı olduğu sorusu- çeşitli nedenlerle yıllarca tartışıldı ama herkesi doyuracak bir cevap bulunamadı. Ben kimliğin tümüyle fiziksel yapı tarafından belirlendiği-

ne inanıyor olsam da, diğerleri bu fikre katılmadı ve hiç kimse de kesin cevabı bildiğini iddia etmedi.

Ama canlı bir varlığı tele-taşımaya ilişkin bu varsayımsal soruya bakış açınızdan bağımsız olarak, bilim insanları, kuantum mekaniğinin mucizeleri yoluyla *tek tek parçacıkların tele-taşılabileceğini gösterdiler hatta onları tele-taşıdılar.*

Bunun nasıl olduğunu görelim.

Kuantum Dolanıklığı ve Kuantum Tele-Taşıma

1997'de başlarında o zamanlar Innsbruck Üniversitesi'nde çalışan Anton Zeilinger'in bulunduğu bir fizikçi ekibi ve Roma Üniversitesi'nden² A. Francesco De Martini'nin başkanlığını yaptığı bir diğer ekip birbirinden bağımsız olarak tek bir fotonu tele-taşıma deneyini başarıyla gerçekleştirdiler. Her iki deneyde de belirli bir kuantum durumundaki foton laboratuvar içinde kısa bir mesale öteye tele-taşındılar ama sürecin bu tele-taşımayı herhangi bir mesafeye de başarıyla yapacağına inanmak için çok neden vardı. Her iki ekip de 1993'te bir fizikçi grubunun -IBM'in Watson Araştırma Merkezinden Charles Bennett; Montrai Üniversitesi'nden Gilles Brassard, Claude Crepeau ve Richard Josza; İsraili fizikçi Asher Peres ve Williams Koleji'nden William Wothers- kuantum dolanıklığına (Bölüm 4) ilişkin makalelerindeki kuramsal görüşlere dayanan bir teknik kullandılar.

Dolanık iki parçacığın, diyelim iki fotonun, birbirleriyle garip ama yakın bir ilişkileri olduğunu hatırlayın. Her birinin şu veya bu yönde spine sahip olma olasılıkları belirli iken ve ölçüldüğünde her biri değişik olasılıklardan birini "seçiyor" gibi görünüyor olmalarına rağmen, aralarındaki uzaklık ne olursa olsun, biri neyi "seçerse" öbürü de aynı anda onu seçiyor. Bölüm 4'te dolanık parçacıkları kullanarak bir yerden diğerine ışık hızından daha büyük bir hızla haber göndermenin bir yolu olmadığını görmüştük. Eğer bir dizi dolanık parçacığın her birinin birbirinden uzak yerlerde ölçümü yapılırsa, her iki detektörde ölçülen veriler (şu ya da bu yönde spine sahip olma olasılıkları parçacıkların

olasılık dalgalarıyla tutarlı olmak üzere) olası sonuçların rasgele bir dizisi olur. Dolanıklık ancak iki sonuç listesi karşılaştırılıp birbirinin aynı olduğu görüldüğünde ortaya çıkar. Ama bu karşılaştırma bir tür sıradan, ışık hızından daha yavaş haberleşme türü gerektirir. Karşılaştırma yapılmadan önce dolanık olmanın hiçbir izi belirlenemeyeceği için, ışıktan hızlı bir sinyal göndermek olanaklı değildir.

Bununla birlikte, her ne kadar dolanıklık ışıktan hızlı haberleşme için kullanılamıyorsa da, parçacıklar arasındaki bağlantı öylesine gariptir ki, insan kendini bunun sıra dışı bir işe yaraması gerektiğini hissetmekten alıkoyamaz. 1993'te Bennett ve çalışma arkadaşları böyle bir olasılık keşfettiler. Kuantum dolanıklığının kuantum tele-taşıma amacıyla kullanılabileceğini gösterdiler. Işıktan daha hızlı haber gönderemiyor olabilirsiniz ama eğer bir parçacığın buradan oraya ışıktan daha yavaş tele-taşımasına razı olursanız, bunun yöntemi dolanıklık olabilir.

Bu sonucun ardındaki düşünüş mantığı matematiksel olarak basit olmakla birlikte, kurnazca ve zekicedir. Özetlemeye çalışalım.

New York'taki evimden Londra'daki arkadaşım Nicholas'a Foton A adını verdiğim özel bir fotonu tele-taşımak istediğimi varsayalım. Basit olsun diye fotonun spininin tam kuantum durumunu nasıl taşıyacağımı -yani Nicholas'ın alacağı fotonun spininin bir yönde ya da diğerinde olma özelliklerinin Foton A'nın spin özellikleriyle aynı olmasını nasıl sağlayacağımı- görelim.

Önce Foton A'nın spin özelliklerini ölçüp sonra Nicholas'ı telefonla arayarak, onun kendi tarafında spin özellikleri Foton A'nın spin özelliklerine uyan bir foton ayarlamasını isteyemem; bulacağım sonuç yaptığım gözlemden etkilenir, o yüzden Foton A'nın ben bakmadan önceki özelliklerini doğru olarak yansıtmam. O halde ne yapabilirim? İşte Bennett ve çalışma arkadaşlarına göre bunun ilk adımı Nicholas ve benim Foton B ve Foton C adını vereceğim dolanık iki fotondan birer tanesine sahip olmamız. Bu fotonları nasıl elde edeceğimizin önemi yok. Atlas Okyanusu'nun iki farklı yakasında olsak bile, Nicholas elinde-

ki fotonun herhangi bir eksen çevresindeki spinini ölçse, ben-
de elimdeki fotonun aynı eksen çevresindeki spinini ölçsem, tam
olarak aynı değerleri bulacağımızdan emin olduğumuzu varsayalım.
Bennett ve çalışma arkadaşlarına göre ikinci adım Foton A'yı -tele-taşıdığım fotonu- ölçmek *değildir* çünkü bu çok ciddi bir müdahale olur. Bunun yerine Foton A'nın ve dolanık Foton B'nin *ortak* özelliklerini ölçmeliyim. Örneğin, kuantum kuramı spinlerini ayrı ayrı ölçmeden Foton A ve Foton B'nin dik eksen çevresinde aynı spine sahip olup olmadıklarını ölçmeme olanak verir. Benzer biçimde kuantum kuramı spinlerini ayrı ayrı ölçmeden Foton A ve B'nin yatay eksen çevresinde aynı spine sahip olup olmadıklarını ölçmeme de olanak verir. Böyle ortak bir ölçümle Foton A'nın spinini öğrenemem ama Foton A'nın spininin Foton B'nin spinine nasıl bağlı olduğunu öğrenebilirim. Bu önemli bir bilgidir.

Uzaktaki Foton C, Foton B ile dolanıktır, o nedenle eğer Foton A'nın Foton B ile olan bağıntıyı öğrenebilirimsem, Foton A'nın Foton C ile olan bağıntıyı da öğrenebilirim. Eğer şimdi bu bilgiyi, Foton A'nın spininin Foton C'ye göre nasıl olduğunu telefonla Nicholas'a iletirsem, o da Foton C'nin kuantum durumunu Foton A'nınkine uyacak şekilde nasıl ayarlayacağını belirleyebilir. Gerekli ayarlamayı yaptıktan sonra onun fotonunun kuantum durumu Foton A ile aynı olacaktır ve bu da Foton A'nın başarılı bir biçimde tele-taşındığını söyleyebilmemiz için gereken bilginin tümüdür. En basit durumda, örneğin, ölçümlerim Foton B'nin spininin Foton A'ninkisi ile aynı olduğunu gösterirse, o zaman Foton C'nin spininin de Foton A'ninkisi ile aynı olduğu sonucuna varabiliriz ve daha fazlasına gerek kalmadan tele-taşıma tamamlanmış olur. Foton C, amaçlandığı gibi, Foton A ile aynı kuantum durumunda olur.

Ya da neredeyse diyelim. Fikir kabaca budur ama kuantum tele-taşımayı yönetilebilir adımlar halinde açıklayabilmek için şimdiye kadar bu öyküdeki kesinlikle en önemli öğeyi atlardım, şimdi bunu tamamlayayım. Foton A ve Foton B üzerinde ortak ölçümler yaparken, aslında Foton A'nın spininin Foton B'ninkisi

ile bağıını bulurum. Ama her ölçümde olduğu gibi, ölçümün kendisi fotonları etkiler. Bu yüzden ölçümden önce Foton A'nın spininin Foton B'ninki ile olan ilişkisini *bilemem*. Her ikisi de ölçüm eyleminden etkilendikten sonraki ilişkilerini bilirim. Bu yüzden, ilk bakışta, tanımladığım Foton Ayı uzakta kopyalamak konusunda aynı kuantum engeliyle karşı karşıyaymışız gibi gelir: Ölçüm eyleminin kaçınılmaz bozucu etkisi. İşte Foton C'nin imdada yetiştiği yer, burasıdır. Foton B ve Foton C bağlantılı olduğu için, Foton B üzerinde neden olduğum bozucu etki *Londra'daki Foton C'nin kuantum durumunda da kendini gösterir*. Bölüm 4'te ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, kuantum dolanıklığının mucizevi doğası budur. Gerçekten, Bennett ve çalışma arkadaşları, Foton B ile olan bağlantısından ötürü, benim ölçümlerimin bozucu etkisinin *uzakta bulunan Foton C üzerinde de ortaya çıktığını* matematiksel olarak gösterdiler.

İşte inanılmaz derecede ilginç olan budur. Benim ölçümümle Foton A'nın spininin Foton B'ninki ile olan ilişkisini öğreniyoruz, ama her iki fonda da benim işe karışmamdan kaynaklanan bozulma olduğunu ortaya koyan sorunla birlikte. Ama dolanıklık nedeniyle Foton C de benim ölçümüme bağlıdır -binlerce kilometre uzakta olsa bile- ve bu da bozulmanın etkisini ayırt etmemizi sağlar ve böylece normal olarak ölçüm sürecinde kaybolan bilgiye ulaşabiliriz. Şimdi Nicholas'ı arayarak ölçüm sonucumu söylersem, bozulmadan sonra Foton A ve Foton B'nin spinleri arasındaki ilişkiyi öğrenir ve Foton C aracılığıyla *bozulmanın etkisine ulaşabilir*. Bu da Nicholas'ın Foton C'yi kullanarak, aşağı yukarı benim ölçümümden kaynaklanan bozulmayı çıkarmasını ve Foton Ayı kopyalama işinin önündeki engeli böylece aşmasını sağlar. Gerçekte, Bennett ve çalışma arkadaşlarının ayrıntılı olarak gösterdiği gibi, Foton C'nin spinine basit bir müdahale ile (benim telefonda Foton A'nın spininin Foton B'ninki ile ilişkisini söylememle) Nicholas spin açısından Foton C'nin, *benim ölçümümden önceki* Foton A'nın kuantum durumunu kopyalamasını sağlayacaktır. Üstelik her ne kadar spin bir fotonun karakteristik özelliklerinden yalnızca biri ise de, Fo-

ton A'nın kuantum durumunun diğer özellikleri (belirli bir enerjiye sahip olma olasılığı gibi) aynı şekilde kopyalanabilir. Böylece, bu süreç kullanılarak Foton Ayı New York'tan Londra'ya tele-taşıyabiliriz.³

Görebileceğiniz gibi, kuantum tele-taşıma her biri kritik önemde olan ve diğerini tamamlayan bir bilgiyi taşıyan iki aşamadan oluşur. Birincisi, tele-taşımak istediğimiz fotonla birlikte dolanık foton çiftinden birini ortak olarak ölçeriz. Ölçümünden kaynaklanan bozulma, dolanık çiftin uzaktaki üyesinde de kuantum acayıplığı ve kuantumun yerel olmayışı nedenleriyle ortaya çıkar. Bu, tele-taşıma sürecinin net bir biçimde kuantum karakterli olan birinci aşamasıdır, ikinci aşamada ölçümün kendisinin sonucu, tele-taşımanın klasik kısmı olarak adlandırabileceğimiz bir süreçle uzaktaki alıcıya daha sıradan araçlarla (telefon, faks, e-posta...) iletilir. Birinci ve ikinci aşamalar birleştirildiğinde, tele-taşımak istediğimiz fotonun tam kuantum durumu, basit bir operasyonla (belirli eksenler çevresinde belirli miktarlarda döndürmek gibi) dolanık bir çiftin uzaktaki üyesinde yeniden oluşturulabilir.

Kuantum tele-taşımanın birkaç kilit özelliğine dikkat edin. Foton A'nın özgün kuantum durumu ölçüm tarafından bozulduğu için, *Londra'daki C Fotonu özgün durumda olan tek fotondur.* Özgün Foton A'nın iki kopyası bulunmadığı için bunu kuantum fakslaması değil, kuantum tele-taşıma olarak adlandırmak çok daha doğru olur.⁴ Üstelik Foton Ayı New York'tan Londra'ya taşımış olsak da -Londra'daki foton bizim New York'taki özgün fotonumuzdan ayırt edilemez olsa da- Foton A'nın kuantum durumunu bilemeyiz. Ben işe karışmadan önce Londra'daki fotonla Foton A'nın bir yönde ya da diğerinde spine sahip olma olasılıkları aynıdır ama bu olasılığın ne olduğunu biz bilmiyoruz. Gerçekten kuantum tele-taşımanın püf noktası budur. Ölçümünden kaynaklanan bozulma bizim Foton A'nın kuantum durumunu belirlememizi engeller, ama anlatılan yaklaşımda *fotonu tele-taşımak için onun kuantum durumunu bilmek zorunda değiliz.* Yalnızca onun kuantum durumundaki bir özelliği -Foton B ile

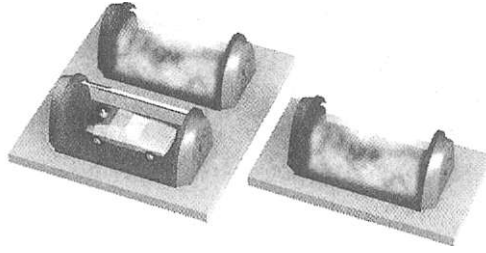
ortak ölçümden öğrendiğimiz şeyi- bilmek zorundayız. Uzaktaki Foton C ile kuantum dolanıklığı geri kalanı halleder.

Bu stratejiyi kuantum tele-taşıma için uygulamak kolay bir iş değildir. 1990'larm başlarında dolanık bir çift foton yaratmak sıradan bir süreçti ama iki fotonun ortak ölçümleri (teknik olarak *Bell-durumu ölçümleri* olarak adlandırılan, yukarıdaki Foton A ve B'nin ortak ölçümleri) hiç denenmemişti. Hem Zeilinger hem de De Martini ekiplerinin başarısı, ortak ölçümler için zekice deneysel teknikler icat etmek ve bunları laboratuvarında gerçekleştirmektir.⁵ 1997'de bu amaca ulaşarak tek bir parçacığın tele-taşımasını gerçekleştiren ilk gruplar oldular.

Gerçekçi Tele-Taşıma

Siz, ben, otomobiliniz ve her şey çok sayıda parçacıktan oluştuğu(muz) için, sonraki doğal adım kuantum tele-taşımayı böyle büyük parçacık kümelerine uygulayarak makroskobik cisimleri bir yerden diğerine "ışınlama"nın yolunu açmaktır. Ama tek bir parçacığı tele-taşımakla makroskobik bir parçacık kümesini tele-taşımak arasındaki fark akıllara durgunluk verici olup, araştırmacıların şu anda gerçekleştirebileceklerinin çok çok ötesindedir. Hatta bu alandaki çoğu önder araştırmacı uzak bir gelecekte bile bunun gerçekleştirilebileceğini pek düşünmüyor. Ama meraklılar için Zeilinger'in belki de günün birinde gerçeğe dönüşebilecek olan rüyası şöyle.

Otomobilimi New York'tan Londra'ya tele-taşımak istediğimi düşünelim. Nicholas ve benim dolanık bir foton çiftinin birer üyesine sahip olmamız yerine (tek bir fotonu tele-taşımak için gerektiği gibi), her birimizin yeterince proton, nötron, elektron ve bir otomobili yapmak için gerekli olan diğer parçacıklardan birer oda dolusu kadar parçacığa sahip olmamız, üstelik benim odamdaki parçacıkların Nicholas'ın odasındaki parçacıklarla kuantum dolanık olması gerekiyor (Şekil 15.1'e bakınız). Aynı zamanda otomobilimi oluşturan parçacıklarla odamda sağa sola hareket edip duran parçacıkların ortak özelliklerini ölçecek bir alete de sahip olmalıyım (Foton A ve Foton B'nin or-



Şekil 15.1 Tele-taşımaya hayalci bir yaklaşım, birbirlerinden uzakta olan ve kuantum dolanık parçacıklarla dolu iki odayı ve tele-taşınacık cismi oluşturan parçacıklarla birlikte odalardan birindeki parçacıkları aynı anda ölçebilecek bir aracı göz önüne alır. Bu ölçümlerin sonucu, daha sonra ikinci odadaki parçacıkları cismi kopyalayacak şekilde değiştirmek ve tele-taşımayı sonuçlandırmak için gerekli olan bilgileri sağlar.

tak özelliklerini ölçmenin benzeri). İki odadaki parçacıkların dolanık olması yoluyla New York'ta yaptığım ortak ölçümlerin etkisi, Nicholas'ın Londra'daki odasında bulunan dolanık parçacıklarda da görülecektir (Foton C'nin durumunun A ve B'nin ortak ölçümlerini yansıttasının benzeri). Eğer Nicholas'ı arar ve ölçümlerimin sonucunu ona aktarırsam (Nicholas'a 10^{30} sonuç aktaracağım için bu, pahalı bir görüşme olacaktır), veriler ona odasındaki parçacıkları nasıl değiştirebileceği konusunda bilgi verecektir (tıpkı önceki telelon görüşmemizde Foton Cyi nasıl değiştireceğini bildirmem gibi). Nicholas işini bitirdiğinde, odasında bulunan her parçacığın kuantum durumu otomobildeki her parçacığın durumuyla tam olarak aynı olacak (ölçüm yapılmadan önce) ve böylece, tıpkı önceki incelememizde olduğu gibi, şimdi Nicholas'ın bir otomobili *olacaktır*. * Otomobilin New York'tan Londra'ya tele-taşınması tamamlanmış olacaktır.

Ama dikkat ederseniz, günümüzde kuantum tele-taşımanın her adımı henüz hayaldir. Otomobil gibi bir cisim milyar kere milyar kere milyardan daha fazla sayıda parçacıktan oluşur. De-

* Parçacık toplulukları için -tek parçacıkların tersine- kuantum durumu aynı zamanda her parçacığın, topluluğun geri kalanıyla olan ilişkilerini de barındırır. O yüzden, otomobili oluşturan parçacıkların kuantum durumunu tam olarak yeniden üreterek diğerleriyle aynı ilişkiyi kurmasını sağlamış oluruz. Tek değişiklik, parçacıkların konumlarının bir bütün halinde New York'tan Londra'ya kayması olur.

neyciler bir çiftten daha fazla parçacığın dolanıklıklarıyla uğraşırken, makroskobik nesnelere ilişkin sayılara ulaşmanın henüz çok çok uzağındalar.⁶ İki oda dolusu dolanık parçacık hazırlayabilmek henüz saçma diyebileceğimiz ölçüde erişimimizin ötesindedir. Üstelik *iki* fotonun ortak ölçümü kendi başına bile son derece zor ve etkileyici bir başarıdır. Bunu milyarlarca ve milyarlarca parçacığa uygulayabilmek, bugün için hayal bile edilemez. Şu anda durduğumuz yerden bakıldığında, fazla tutkulu olmayan bir değerlendirme ile, makroskobik bir cismin en azından tek parçacığa uyguladığımız yolla tele-taşınmasının -eğer sonsuzluk değilse bile- çağlarca uzakta olduğu sonucuna varılacaktır.

Ama bilim ve teknolojiye tek değişmeyen şeyin "olmaz" kehanetlerinin aşıldığının görülmesi olduğundan yalnızca açık olan bir şeyi söyleyeceğim: Makroskobik cisimlerin tele-taşınması olanaksız görünüyor. Ama kim bilebilir? Kırkıyl önce *Atılgan*'ın bilgisayar da olanaksız gibi görünüyordu.⁷

Zamanda Yolculuğun Bilmeceleri

Eğer makroskobik cisimleri tele-taşımak FedEx'i çağırmak ya da metroya binmek kadar kolay olsaydı, hayatın çok farklı olacağı açıktır. Pratik olmayan veya olanaksız yolculuklar yapılabilecek ve uzayda yolculuk kavramında devrimci değişiklikler gerçekleşecekti.

Bu durumda bile, evreni algılayışımıza tele-taşımanın etkisi, zamanda isteğe bağlı yolculuk yapmanın alt-üst edici etkisiyle karşılaştırıldığında sönük kalırdı. Yeterince çaba gösterildiğinde, en azından ilke olarak, buradan şuraya gidebileceğimizi herkes bilir. Uzayda yolculuk konusunda bazı teknolojik sınırlamalar olsa da, bu sınırlar içinde uzaydaki yolculuklarımıza seçim ve istekler kılavuzluk eder. Amaya "şimdi"den "o zaman" a gitmek? Deneyimlerimiz bize bunun bir tek yolu olduğunu söyler: Beklemek, saniyelerin birbirini kovalaması "şimdi"den "o zaman" a gidebilmenin yolunu açar. Burada "o zamanın" "şimdiden" sonra geldiği varsayılır. Eğer "o zaman", "şimdiden" önce geliyorsa,

deneyimlerimiz bize oraya gitmenin herhangi bir yolu olmadığını söyler; geçmişe yolculuk bir seçenek gibi görünmez. Uzayda yolculuktan farklı olarak zamanda yolculuk seçim ve isteklerden bağımsızdır. Zaman söz konusu olduğunda isteyelim, istemeyelim bir yöne doğru sürükleniriz.

Eğer uzayda dolaşabildiğimiz kolaylıkla zamanda da dolaşabilseydik, hayata bakışımız değişmekle kalmaz, insanlık tarihindeki en büyük dönüşümü yaşardık. Bu inkâr edilemez etkinin ışığında geçen yüzyılın başlarında birkaç kişinin zamanda yolculuğun bir türünün -geleceğe doğru yolculuk- kuramsal temellerini keşfetmiş olmalarına şaşıyorum.

Einstein özel göreliliğin uzay-zamanının doğasını keşfettiğinde ileriye doğru hızlı sarmanın planlarını bulmuştu. Eğer Dünya da 1000 yıl veya 10.000 yıl veya 10 milyon yıl sonra neler olup-biteceğini görmek isterseniz, Einstein fiziğinin yasaları bunu nasıl yapabileceğinizi söyler. Hızı ışık hızının yüzde 99,999999996'sı olan bir araç yaparsınız. Tam gazla uzayın derinliklerine doğru uzay aracınızın saatiyle bir gün veya on gün veya yirmiyedi yıldan biraz daha uzun süreyle yol alır, keskin bir dönüş yapar ve yine tam gaz Dünyaya dönersiniz. Döndüğünüz zaman, Dünya zamanı ile 1000 veya 10.000 veya 10 milyon yıl geçmiş *olacaktır*. Bu, özel göreliliğin tartışılmaz ve deneysel olarak kanıtlanmış bir sonucudur; Bölüm 3'te işlediğimiz, hızın artırılarak zamanın yavaşlatılmasının bir örneğidir.⁸ Elbette böyle uzay araçları inşa edemeyeceğimiz için hiç kimse bu öngörülerini tanı olarak sınıyamadır. Ama daha önce tartıştığımız gibi, araştırmacılar öngörülen yavaşlamayı ışık hızının çok küçük bir kesri kadar hızla giden normal bir uçakta ve parçacık hızlandırıcılarında ışık hızına yakın hızlara ulaşan müon gibi parçacıklarda doğrulamışlardır (durağan müonlar yaklaşık olarak saniyenin milyonda ikisi kadar kısa bir zamanda başka parçacıklara bozunurlar ama hızla hareket ettiklerinde içsel saatleri yavaşladığı için müonlar bozunmadan daha uzun yaşarlar). Özel göreliliğin doğru olduğuna ve geleceğe ulaşmak için önerdiği stratejinin doğru işleyeceğine inanmak için her türlü neden vardır.

Bizim bu zamana mahkûm olmamıza neden olan fizik değil teknolojidir.*

Zamanda diğer yöne, geçmişe doğru yolculuğu düşündüğümüzde daha zor konular ortaya çıkar. Bunlardan bazılarını hiç kuşkusuz biliyorsunuz. Örneğin, geçmişe giderek kendi doğumunuzu önlediğiniz, standart bir senaryo vardır. Pek çok kurgusal tanımlamalarda bu, şiddet kullanılarak yapılıyorsa da, şiddet içermeyen ama aynı derecede etkili bir yol daha vardır: Anne ve babanızın karşılaşmasını önlemek. Buradaki çelişki açıktır: Eğer hiç doğmadıysanız, o zaman geçmişe giderek anneniz ve babanızın karşılaşmasını nasıl engellediniz? Geçmişe gidip onların karşılaşmasını engellemek için doğmuş olmanız gerekir; ama eğer doğmuşsanız, geçmişe ulaşmışsanız ve anne-babanızın karşılaşmasını engellemişseniz, o zaman *doğmamış olmanız* gerekir. Mantıksal bir çıkmaza girmiş durumdayız.

Oxford'lu bir filozof olan Michael Dummett'in ortaya koyduğu ve çalışma arkadaşı David Deutsch'un dikkat çektiği benzer bir çelişki aklı biraz farklı, belki biraz daha şaşırtıcı bir yolla çeler. Bir versiyonu şudur: Bir zaman makinesi yaptığımı ve on yıl geleceğe gittiğimi varsayalım. Tofu-4-U'da (büyük deli dana salgınının insanların cheeseburger yeme isteklerine set çekmesinden sonra McDonalds'ın yerini alan fast food zinciri) hızlı bir atıştırma sonra, bir internet kafe bulup sicim kuramındaki son gelişmeleri öğrenmek üzere çevrimiçi oluyorum. Mükemmel bir sürprizle karşılaşıyorum. Sicim kuramındaki bütün bilinmeyen konuların çözülmüş olduğunu okuyorum. Kuram tam anlamıyla ortaya konmuş ve bütün bilinen parçacıkların özelliklerini başarıyla açıklıyor. Fazladan boyutlar konusunda tartışmasız

* İnsan vücudunun kırılabilirliği bir başka pratik engeldir: Böyle yüksek hızlara makul sürelerde ulaşmak için gereken ivme, insan vücudunun dayanabileceğinin çok ötesindedir. Dikkat ederseniz zamanın yavaşlaması ilke olarak uzayda uzak bölgelere ulaşmak için de bir strateji sağlıyor. Eğer bir roket yeryüzünü terk ederek Andromeda galaksisine doğru ışık hızının yüzde 99,9999999999999999'u kadar hızla yol alırsa, dönüşü için 6 milyon yıl beklemek zorundayız. Ama, o hızda roketteki zaman yeryüzüne göre yavaşlamış olacağı için, dönüşünde astronot için yalnızca sekiz saat geçmiş olacaktır (bu arada astronotun roket hızlanıp yavaşlarken ve dururken ortaya çıkacak ivmelere dayanabileceğini varsayıyoruz).

kanıtlar bulunmuş ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda kuramın öngördüğü süpersimetrik parçacıklar -kütleleri, elektrik yükleri vb.- doğrulanmış. Artık kuşku yok: Sicim kuramı evrenin birleşik kuramı.

Bu büyük ilerlemelerde kimin katkısı olduğunu öğrenmek amacıyla biraz daha derin araştırmaya girdiğimde çok daha büyük bir sürprizle karşılaşıyorum. Atılımı getiren makale bir yıl kadar önce Rita Greene tarafından yazılmış. Annem. Şok geçiriyorum. Burada bir saygısızlık yaptığımı düşünmeyin: Annem mükemmel bir insandır, ama bilim insanı değildir, bir kimsenin neden bilim insanı olmak isteyebileceğini anlayamaz ve örneğin *Evrenin Zarafeti* kitabından birkaç sayfa okuduktan sonra bir kenara bırakıp, kitabın başını ağrıttığını söyler. Öyleyse nasıl olur da sicim kuramının kilit makalesini yazmış olabilir? Annemin makalesini çevrimiçi okuyor ve basit ama kavrayışla dolu mantığının güzelliğiyle havalara uçuyorum. Makalenin sonunda, korkularını yenip içindeki fizikçiyi uyandıran Tony Robbins'in bir seminerine katıldıktan sonra, yıllar süren yoğun matematik ve fizik öğretmenliğim için *bana* teşekkür ettiğini görüyorum. Evet, diye düşünüyorum. Ben geleceğe doğru yolculuğa çıkarken o seminere henüz kaydolmuştu. Kendi zamanıma geri gidip onu matematik ve fizik çalıştırmaya başlasam iyi olur.

Kendi zamanıma geri gidip anneme fizik ve matematik dersleri vermeye başlıyorum. Ama iyi gitmiyor. Bir yıl geçiyor. Sonra bir yıl daha. Her ne kadar sıkı çalışıyorsa da, bir sonuç yok. Endişelenmeye başlıyorum. Birkaç yıl daha çalışıyoruz ama elde ettiğimiz ilerleme son derece sınırlı. Artık gerçekten endişeleniyorum. Makalesinin çıkması için fazla zaman kalmadı. Nasılyazacak? Sonunda büyük kararı veriyorum. Gelecekte onun makalesini okuduğumdan, içeriğini gün gibi açık hatırlıyorum. Bu yüzden onun kendi kendine keşfetmesini beklemek yerine -ki bu, giderek uzaklaşan bir olasılık haline geliyordu- ne yazacağını gösteriyor, her şeyin tam olarak okumuş olduğum gibi kaptırmasın! sağlıyorum. Makale yayımlanıyor, kısa sürede fizik

dünyasında kıyamet kopuyor. Gelecekte, bugün hakkında okuduğum her şey gerçekleşiyor.

Şimdi sorun şu: Annemin büyük gürültü koparan bu makalesinde en büyük hak kimin? Elbette benim değil. Ben, sonuçları makaleden okuyarak öğrendim. Ama ona ne yazması gerektiğini ben söylediğime göre, bu hak nasıl yalnızca anneme ait olabilir? Buradaki gerçek sorun, bir hak sorunu değil, annemin makalesinde işlenen yeni bilginin, yeni görüşlerin ve yeni kavrayışın nereden geldiği. Kimi göstererek "Bu kişi ya da bu bilgisayar yeni sonuçlarla ortaya çıktı" diyebilirim? Bu görüşler ne bana aitti, ne de anneme. İşin içinde başka birisi yok. Bilgisayar da kullanmadık. Buna rağmen bütün bu parlak fikirler bir şekilde makaleye girdi. Görünüşe göre, hem geçmişe hem de geleceğe doğru yolculuğun olası olduğu bir dünyada bilgi havadan elde edilebiliyor. Her ne kadar kendi doğumunuzu engellemek kadar çelişkili değilse de, bu durum da oldukça garip.

Böyle çelişkileri ve gariplikleri ne yapacağız? Geleceğe yolculuğa fizik yasalarınca izin verilirken, geçmişe dönmeye yönelik herhangi bir girişimin başarısızlığa uğraması gerektiği sonucuna mı varmamız gerekiyor? Bazıları böyle düşünüyor. Ama şimdi göreceğimiz gibi, uğraşmakta olduğumuz bu ilginç konuları çözenin de yolları var. Bu, geçmişe yolculuğun olası olduğu anlamına gelmiyor -bu, biraz sonra ele alacağımız farklı bir konuma zamanda geriye gitmenin, biraz önce incelediğimiz bilmecelelere başvurularak bertaraf edilebileceğini gösteriyor.

Bilmeceleri Yeniden Düşünmek

Bölüm 5'te zamanın akışını klasik fiziğin perspektifinden incelediğimizi ve sezgisel manzaradan çok daha farklı bir görünümle karşılaştığımızı hatırlayın. Dikkati bir düşünüş, zamanı bizi bir andan diğerine, ileriye doğru taşıyan bir nehre benzettiğimiz bilindik düşüncenin tersine, uzay-zamanı her anın içinde bir noktada donmuş olarak bulunduğu bir buz küpü olarak ele almamıza yol açmıştı. Bu donmuş anlar, farklı hareket durumlarında olan gözlemciler tarafından farklı şekillerde şimdiler -ay-

rı anda olan olaylar- halinde gruplanır. Farklı şimdi kavramları için uzay-zaman bloğunu dilimleme esnekliği sağlamak amacıyla uzay-zamanın farklı açılarda dilimlenebilecek bir ekmek somunu olduğu benzetmesini kullanmıştık.

Ama bu benzetmeden bağımsız olarak Bölüm 5'ten çıkarılacak ders, onların -uzay-zaman somununu oluşturan olaylar olduğudur. Onlar zamandan bağımsızdır. Tıpkı uzayda her noktanın var olduğu gibi her an da -her olay- vardır. Anlar, bir gözlemcinin şimdisinin "spot lambasıyla" aydınlatıldıklarında, anlık olarak hayat bulmazlar; bu görünüm bizim sezgilerimizle uyumlu olmakla birlikte mantıksal bir çözümlemede ayakta kalamaz. Bir kez aydınlatıldığında hep aydınlatılmış olarak kalır. Anlar değişmez. Anlar vardır. Aydınlatılmış olmak, bir anı oluşturan pek çok değişmez özellikten yalnızca biridir. Bu, evrenin tarihini oluşturan bütün olayların manzaranın içinde olduğu, durağan ve değişmez olarak orada olduğu Şekil 5.1'in düşsel ama kavrayış dolu perspektifinde açıkça görülür. Farklı gözlemciler hangi olayların aynı anda olduğu konusunda anlaşamaz -bu gözlemciler uzay-zaman somununu farklı açılarda dilimler- ama somunun bütünü ve onun içindeki olaylar evrenseldir.

Kuantum mekaniği zamanın bu klasik perspektifinde belirli bazı değişiklikler önerir. Örneğin, Bölüm 12'de çok kısa ölçeklerde uzayın ve uzay-zamanın kaçınılmaz olarak dalgalı ve tümsekli olduğunu görmüştük. Ama (Bölüm 7), kuantum mekaniği ve zamanın tam doğrulanması, kuantum ölçüm probleminin çözümlenmesini gerektirir. Bunu yapmak üzere ileri sürülen önerilerden biri olan Birçok Dünya yorumu, zamanda yolculuktan kaynaklanan çelişkilerle başa çıkabilmekle özel olarak ilintilidir, bunu önümüzdeki alt-bölümde göreceğiz. Ama bu bölümde klasik kalalım ve uzay-zamanın buz bloğu/ekmek somunu gösterimini bu bilmecelere uygulamaya çalışalım.

Zamanda geriye giderek anne ve babanızın karşılaşmasını engellediğiniz, çelişkili örneği ele alalım. Bunun ne anlama gelmesi gerektiğini sezgisel olarak hepimiz biliyoruz. Ama siz geçmi-

şe yolculuk yapmadan önce anne ve babanız, diyelim 31 Aralık 1965 gecesi* yeni yıl partisinde karşılaşmış ve bir süre sonra anneniz doğum yapmış ve sizi dünyaya getirmiştir. Yıllar sonra geçmişe -31 Aralık 1965 gecesine- geri dönmeye karar veriyorsunuz ve oraya vardığınızda bazı şeyleri değiştiriyorsunuz, özellikle anne-babanızın karşılaşmalarını engelleyerek annenizin size hamile kalmasını ve sizi doğurmasını engelliyorsunuz. Ama şimdi bu sezgisel tanımlamayı, mantıksal olarak ayakları yere basan, zamanın uzay-zaman somunu tanımını içinde karşılayalım.

Bu sezgisel tanımlama daha temelinde anların değiştirilebileceğini varsaydığı için anlamsızlaşıyor. Bu görünüm, saatin 31 Aralık 1965 gece yarısını çalışını (standart Dünyalı zaman-dilimlemesi ile) "başlangıçta" anne ve babanızın karşılaştığı an olarak alıyor ama "sonradan", sizin işe karışmanızla her şeyi değiştiriyor öyle ki, 31 Aralık gecesi anne ve babanız ayrı kıtalarda olmasalar bile birbirlerinden kilometrelerce uzakta oluyorlar. Olayların yeniden sayılıp dökülmesindeki sorun, anların değişmemesidir; görmüş olduğumuz gibi, anlar yalnızca vardır. Sabit ve değişmez olarak uzay-zaman somunu vardır. Bir anın "önce" şöyle, "sonra" böyle olmasının bir anlamı yoktur.

Eğer 31 Aralık 1965'e geri gitmişseniz, oradasınız, hep oradaydınız, hep orada olacaksınız, hiçbir zaman orada değil değildiniz. 31 Aralık 1965, birincisini kaçırıp tekrarını yakaladığınız anlamında iki kere olmadı. Şekil 5.1 in zamanın dışındaki perspektifine göre siz -durağan ve değişmez olarak- uzay-zaman somununun içinde çeşitli konumlarda varsınız. Eğer şimdi zaman makinenizi ayarlayıp 31 Aralık gecesi saat 11:50'ye dönseniz, bu an da sizin uzay-zaman somununda bulunacağınız konumlar arasında olacaktır. Ama 1965 yılbaşı gece yarısındaki varlığınız, uzay-zamanın *ebedi ve değişmez* bir özelliği olacaktır.

Bu kavrayış bizi hâlâ tuhaf sonuçlara götürür ama artık çelişki yoktur. Örneğin, 31 Aralık gece yarısına doğru 11:50'de uzay-zaman somununda görünürsünüz ama bu andan önce varlığını-

* Elbette 1 Ocak 1966 demeliydim ama şimdilik bunu önemsemeyelim.

zın hiçbir kaydı yoktur. Bu tuhaf olmakla birlikte çelişkili değildir. Eğer birisi sizin saat 11:50'de hop diye birdenbire ortaya çıktığınızı görüp, korku dolu gözlerle nereden geldiğinizi sorarsa, sakın bir sesle "Gelecekten" cevabını verebilirsiniz. Bu senaryoda, en azından şimdiye kadar, mantıksal bir tutarsızlıkla karşılaşmadık. İşlerin daha da ilginç hale geldiği nokta, elbette görevinize devam edip anne ve babanızı ayırmanızdır. Ne olur? Uzay-zaman bloğu perspektifini dikkatli bir biçimde sürdürürsek, kaçınılmaz olarak başarısız olacağınız sonucuna varırız. Kaderi belirleyen o yılbaşı gecesinde ne yaparsanız yapın başarısız olursunuz. Her ne kadar yapabileceklerinizin arasında görünse de, anne-babanızı ayrı tutmak, mantıksal bir anlaşılmazlığa yol açar. Anne ve babanız saat gece yarısını çaldığında karşılaştılar. Siz oradaydınız. "Daima" orada olacaksınız. Her an, öyledir, değişmez. Bir "an" a değişimi uygulamaya kalkışmak, ancak bir kayaya psikoanaliz yapmak kadar anlamlıdır. Anne ve babanız 31 Aralık 1965 geceyarısı karşılaştılar ve bunu *hiçbir şey* değiştiremez çünkü onların karşılaşmaları, uzay-zamanda sonsuza kadar kendi yerini işgal edecek olan, değiştirilemez bir olaydır.

Gerçekten, şimdi düşünün, onlu yaşlarınızda bir gün babanızla, annenize nasıl evlenme teklif ettiğini sormuştunuz, o da size aslında evlenme teklif etmeyi planlamamış olduğunu söylemişti. O büyük soruyu sormadan önce annenizle neredeyse hiç karşılaşmamıştı. Ama yeni yıl partisinde, gece yarısından on dakika önce birdenbire ortaya çıkıp, gelecekten geldiğini söyleyen adam öylesine garibine gitmişti ki, on dakika sonra annenizle karşılaştığında, hemen oracıkta evlenme teklif etmişti.

Burada dikkat edilecek nokta, uzay-zamandaki tam ve değişmez bir olaylar dizisinin anlamlı ve kendiyile tutarlı bir bütün oluşturmasıdır. Evren anlamlıdır. Eğer zamanda geriye, 31 Aralık 1965'e giderseniz, gerçekte kendi kaderinizin gereğini yerine getiriyorsunuz demektir. Uzay-zaman somununda, 31 Aralık 1965'te, daha önce orada olmayan biri vardı. Şekil 5.1'e varsayımsal, dış bir perspektiften bakıldığında, bunu doğrudan görebiliriz; inkar edilemez bir biçimde bu kişinin, şimdiki yaşıınız-

daki *siz* olduğunuzu görebiliriz. Onlarca yıl öncede yer alan bu olayların anlamlı olması için, geriye, 1965'e gitmelisiniz. Dahası, dış perspektiften, çok korkmuş görünen babanızın 31 Aralık 1965 gecesi 11:50'den hemen sonra size bir şeyler sorduğunu, koşarak uzaklaştığını, gece yarısı biraz uzakta annenizle karşılaştığını; somunda biraz ileride onların düğününü, sizin doğumunuzu, çocukluktan çıkışınızı ve daha sonra da zaman makinesine girişinizi görürüz. Eğer geçmişe yolculuk olası olsaydı, bir andaki olayları artık yalnızca daha önceki olaylarla açıklayamazdık (herhangi bir perspektiften); ama olayların tamamı zorunlu olarak anlamlı, tutarlı ve çelişkiye düşmeyen bir öykü oluştururdu.

Son alt-bölümde vurgulandığı gibi bu, hayal gücünün zorlanmasıyla, geçmiş zamana yolculuğun olası olduğu anlamına gelmez. Ama güçlü bir şekilde kendi doğumunuzu önlemek anlamına gelen çelişkilerin mantıksal hatalardan kaynaklandığını ileri sürer. Eğer geçmiş zamana yolculuk yapabilirsiniz, geçmiş, pi sayısını değiştirebileceğinizin ötesinde değiştiremezsiniz. Eğer geçmişe gidebilirsiniz, geçmişin, sizin ona yolculuk yapmanıza yol açan geçmişin bir parçasısınız, parçası olacaksınız ve daima parçası idiniz demektir.

Şekil 5.1 'in dış perspektifinden, bu açıklama hem sıkı, hem de tutarlıdır. Uzay-zaman somunundaki olayların tamamını inceleysek, bunların kozmik bulmacayla iç içe geçmiş olduğunu görürüz. Ama yine de sizin 31 Aralık 1965'teki bakış açınızdan, her şey hâlâ şaşırtıcıdır. Yukarıda eğer anne-babanızı birbirlerinden uzak tutmakta başarılı olsaydınız bile, bu probleme klasik yoldan yaklaşamayacağınızı söylemiştim. Buluşmalarını izleyemezsiniz. Belki de anlattığım öyküdeki gibi buluşmalarını istemeyerek de olsa kolaylaştırabilirsiniz bile. Geçmiş zamana defalarca gidebilirsiniz, o yüzden her biri anne ve babanızın buluşmalarını engellemeye niyetli pek çok siz vardır. Ama anne ve babanızın buluşmalarını engellemekte başarılı olmanız, bir şeyi, değişim kavramının anlamsız olduğu başka bir şeye göre değiştirmek olur.

Ama bu soyut gözlemlerin sağladığı kavrayışla bile şunu sormadan edemiyoruz: Sizi başarılı olmaktan alıkoyan şey nedir? Eğer gece yarısına on kala partide iseniz ve annenizi gençken görmüşseniz, sizin onu oradan uzaklaştırmanızı engelleyen nedir? Veya babanızı gençken gördüğünüzde -olmaz ama diyelim- onu vurmaktan alıkoyan nedir? Özgür iradeniz yok mu? Bazılarının, kuantum mekaniğinin öyküye girebileceğini söyledikleri yer, işte burasıdır.

Özgür İrade, Birçok Dünya ve Zamanda Yolculuk

Özgür irade nazik bir konudur, yokluğuyla bile zamanda yolculuğu karmaşık hale getirir. Fizik yasaları belirleyicidir. Daha önce görmüş olduğumuz gibi, eğer her şeyin şimdi tam olarak nasıl olduğunu biliyorsanız (evrendeki her parçacığın konumu ve hızı), klasik fiziğin yasaları sizin belirleyeceğiniz herhangi bir başka anda her şeyin tam olarak nasıl olduğunu veya olacağını söyler. Denklemler, insan iradesinin varsayılan özgürlüğü karşısında tarafsızdır. Bazıları bunun, klasik bir evrende özgür iradenin aldatıcı bir görünüş, bir yanılsama olduğu anlamına geldiğini kabul eder. Siz bir parçacıklar kümesinden oluşuyorsunuz, o nedenle eğer klasik fizik sizi oluşturan parçacıklar hakkındaki her şeyi, her an belirleyebiliyorsa -neredeler, nasıl hareket ediyorlar vb.- sizin kendi eylemlerinizi belirlemeye yönelik özgür iradeniz tam anlamıyla tehlikede demektir. Bu mantık beni ikna ediyor ama bir parçacık kümesinden daha fazla birşey olduğumuzu düşünenler bu konuda aynı fikirde olmayabilir.

Her neyse, içinde yaşadığımız evren klasik değil bir kuantum evreni olduğu için, bu gözlemlerin uygun olup olmadığı tartışma götürür. Kuantum fiziğinde yani gerçek dünya fiziğinde bu klasik fizik perspektifiyle benzerlikler olmakla birlikte, çok temel farklar da vardır. Bölüm 7'de okumuş olduğunuz gibi, eğer şimdi evrendeki her parçacığın kuantum dalga fonksiyonunu biliyorsanız, Schrödinger denklemi, sizin belirleyeceğiniz herhangi bir başka anda bu parçacıkların dalga fonksiyonlarının nasıl olduğunu veya nasıl olacağını söyler. Kuantum fiziğinin bu

yanı tam anlamıyla klasik fizik gibi belirleyicidir. Ama yine de gözlem eylemi kuantum mekaniğine özgü öyküyü karmaşıklarır. Gördüğünüz gibi kuantum ölçüm problemi üzerinde hâlâ sürüp giden, sıcak bir tartışma vardır. Eğer fizikçiler günün birinde Schrödinger denkleminin kuantum mekaniğinin her şeyi olduğu sonucuna varırlarsa, o zaman kuantum fiziğı kendi bütünlüğü içinde klasik fizik kadar belirleyici olur. Klasik belirleyicilikte olduğu gibi bazıları bunun, özgür iradenin bir yanılsama olduğu anlamına geleceğini söyler; diğerleri ise buna katılmaz. Ama eğer şimdi kuantum öyküsünün bir bölümünü gözden kaçıırırsak -eğer olasılıklardan kesin sonuçlara geçiş standart kuantum yapısının ötesinde bir şey gerektiriyorsa- o zaman, en azından özgür iradenin fiziksel yasalar içinde sağlam bir kavrayışa oturma olasılığı var demektir. Günün birinde, bazı fizikçilerin tahminde bulunduğu gibi, bilinçli gözlemin, kuantum mekaniğinin belirli sonuçların kuantum pusunun içinden çıkarak gerçekleşmesini sağlayan, ayrılmaz bir parçası olduğunu anlayabiliriz.⁹ Kişisel olarak bu olasılığın çok düşük olduğunu düşünüyorum ama onu bertaraf etmenin bir yolunu da bilmiyorum.

Sonuçta özgür iradenin durumu ve temel fizik yasaları içindeki rolü çözümlenmemiş olarak kalıyor. O halde her iki olasılığı da, yanılsama olarak özgür iradeyi ve gerçek olarak özgür iradeyi göz önüne alalım.

Eğer özgür irade bir yanılsama ise ve geçmiş zamana yolculuk yapmak olası ise, o zaman anne ve babanızın karşılaşmasını önleyememeniz bir bilmece oluşturmaz. Her ne kadar sanki eylemleriniz üzerinde bir kontrolünüz varmış gibi hissediyor olsanız da, aslında her şeyi yapan fizik yasalarıdır. Annenizi oradan uzaklaştırmak veya babanızı vurmak için oraya gittiğinizde fizik yasaları oradadır. Zaman makinesi sizi şehrin yanlış tarafına indirir, bu yüzden olay yerine anne ve babanız karşılaştıktan sonra ulaşırsınız, tetiğı çektiğiniz anda tetik tutukluk yapar veya tetiğı çekersiniz ama babanızı değil onun en büyük rakibini vurur, böylece birleşmelerinin önündeki engeli ortadan kaldırırınız; veya belki de zaman makinesinden dışarıya adım attığınız-

da artık anne ve babanızın buluşmalarını engellemek istemiyorsunuzdur. Zaman makinesine girerken sahip olduğunuz eğilimlere bakmaksızın çıktığınız zamanki eylemleriniz, uzay-zamanın tutarlı öyküsünün bir parçasıdır. Fizik yasaları mantığı bozacak bütün girişimleri sonuçsuz bırakır. Yaptığınız her şeye tam olarak uyar. Her zaman öyleydi ve öyle olacaktır. Değiştirilemez olan bir şeyi değiştiremezsiniz.

Eğer özgür irade bir yanılsama değilse ve geçmiş zamana yolculuk yapmak olası ise, kuantum fiziği olabilecekler konusunda seçenek öneriler ileri sürer ve klasik fizik üzerine temellendirilen formüllerden belirgin bir biçimde farklıdır. Deutsch tarafından savunulan, inandırıcı bir öneride, kuantum mekaniğinin Birçok Dünya yorumunu kullanılır. Bölüm 7'den, Birçok Dünya yapısında kuantum dalga fonksiyonunda somutlaşan olası her sonucun -bir parçacığın bu veya şu yönde spine sahip olması, bir başka parçacığın burada veya şurada olması- kendi ayrı, paralel evreninde ortaya çıktığını hatırlayın. Herhangi bir anda haberdar olduğumuz evren, kuantum fiziği tarafından izin verilen her sonucun ayrı ayrı gerçekleştiği sonsuz sayıda evrenden yalnızca biridir. Bu yapıda şu veya bu seçimi yapmakta hissettiğimiz özgürlüğün, sonraki bir anda şu veya bu paralel evrene girmek zorunda olmamız olasılığını yansıttığını ileri sürmek çok çekicidir. Elbette sizin ve benim sonsuz sayıda kopyalarımız paralel evrenlere serpiştirilmiş durumda olduğu için, kişisel kimlik ve özgür irade kavramları, bu genişletilmiş bağlamda yeniden yorumlanmak zorundadır.

Zamanda yolculuk ve potansiyel çelişkiler için Birçok Dünya yorumu alışılmamış, yeni bir çözüm önerir. 31 Aralık 1965 gecesi 11:50 ye geri giderek silahınızı çeker, babanıza nişan alır, tetiği çekersiniz. Silah ateş alır ve hedefinizi vurursunuz. Ama sizin zamanda yolculuğa çıktığınız evrende olan bu olmadığı için, yaptığınız yolculuk yalnızca zaman içinde değil, *aynı zamanda bir paralel evrenden diğerine* olmalıdır. Şimdi kendinizi içinde bulduğunuz paralel evren, anne ve babanızın hiçbir zaman karşılaşmadığı -Birçok Dünya yorumunun bizi varlığı konusunda

ikna ettiği (kuantum fiziğiyle tutarlı, olası her evren var olduğu için)- bir evrendir. Bu yüzden, bu yaklaşımda, hiçbir mantıksal çelişkiyle karşılaşmayız, çünkü verilen her anın, her biri farklı paralel evrenlerde bulunan çeşitli versiyonları vardır; Birçok Dünya yorumunda sanki bir değil de sonsuz sayıda çok uzay-zaman somunları varmış gibidir. Sizin bulunduğunuz evrende anne ve babanız 31 Aralık 1965 gecesi karşılaştılar, siz doğdunuz, büyüdünüz, babanıza kin güttünüz, zamanda yolculuktan etkilendiniz ve 31 Aralık 1965'e doğru zamanda yolculuğa çıktınız. Ulaştığınız evrende babanız, gelecekte onun oğlu olduğunu iddia eden silahlı biri tarafından, annenizle karşılaşmadan önce, 31 Aralık 1965 gecesi öldürüldü. Sizin bu evrendeki versiyonunuz hiçbir zaman doğmadı, ama bu normaldir çünkü tetiği çeken kişinin (sizin) anne-babanız *vardır*. Onlar farklı, paralel bir evrende yaşamaktadırlar. Bu evrende herhangi birisinin sizin öykünüze inanıp inanmadığını veya size hayal olarak bakıp bakmadığını söyleyemem. Ama hal böyle olunca, her evrende -terk ettiğiniz ve ulaştığınız- kendisiyle çelişkili durumlardan kaçınabildiğimiz açıktır.

Dahası, bu genişletilmiş bağlamda bile zamanda yolculuk maceranız geçmişi değiştirmedir. Terk ettiğiniz evrende, o evrenin geçmişine gitmediğinizden, bu ortadadır. Ulaştığınız evrende 31 Aralık 1965 gecesi saat 11:50'deki varlığınız o anı değiştirmez: O evrende o anda vardınız ve daima var olacaksınız. Yine, Birçok Dünya yorumunda fiziksel olarak tutarlı olan her olaylar dizisi paralel evrenlerin birinde yer alır. Ulaştığınız evren, niyetlendiğiniz ölümcül eyleminizin gerçekleştiği bir evrendir. 31 Aralık 1965'teki varlığınız ve işlediğiniz suç, o evrenin değiştirilemez gerçeklik dokusunun bir parçasıdır.

Birçok Dünya yorumu, annemin sicim kuramında çığır açan makaleyi yazmasında olduğu gibi, bilginin görünüşe göre havadan ortaya çıkması konusuna da benzer bir çözüm öneriyor. Birçok Dünya yorumuna göre, sonsuz sayıdaki paralel evrenlerden birinde annem hızla bir sicim kuramı uzmanına *dönüşür* ve makalesinde okuduğum her şeyi kendi bulur. Geçmişe yolcu-

luk yapmak için yola çıktığımda, zaman makinesi beni o evrene götürür. Oradayken annemin makalesinde okuduğum sonuçlar gerçekten de annemin o evrendeki versiyonu tarafından keşfedilmiştir. Daha sonra, zamanda geriye doğru yolculuk yaptığında, paralel evrenlerden annemin fiziki anlamakta güçlük çektiği bir başkasına girerim. Yıllarca ona fizik öğretmeye çalıştıktan sonra, vazgeçer ve ona makalede ne yazması gerektiğini anlatırım. Ama bu senaryoda, atılımlardan kimin sorumlu olduğu konusunda bir bilmece yoktur. Atılımların sorumlusu, bir fizik uzmanı olduğu evrendeki annemin versiyonudur. Benim zamandaki çeşitli yolculuklarım sonucunda olup bitenler, annemin buluşlarının paralel bir başka evrende yaşamakta olan versiyonuna iletilmesidir. Paralel evrenleri kabul etmeyi, yazarsız makalelerden daha kolay bulduğunuzu varsayarsak -tartışılabilir bir önerme- bilgi ve zamanda yolculuk arasındaki ilişkiler, zihnimizi daha az bulandıracak bir şekilde açıklanabilir.

Bu ve bir önceki alt-bölümde tartıştığımız önerilerin hiçbirisi, zamanda yolculuğun bilmecelerinin ve çelişkilerinin çözümü olmayabilir. Bu öneriler, daha çok, şu anki kavrayışımızla fizik problemleri çözmek için çeşitli olası yollar sağladığından, bilmecelerin ve çelişkilerin zamanda yolculuğu bertaraf etmeyeceğini göstermek amacını taşırlar. Ama bir şeyi bertaraf etmek, onun olası olduğunu söylemekten çok uzaktır. O zaman, şimdi asıl soruyu soralım:

Geçmiş Zamana Yolculuk Olası mı?

Aklı başında bir fizikçi bu soruya hayır cevabını verir. Ben, hayır derim. Ama özel göreliliğin büyük kütleli bir cismin ışık hızına kadar ivmelendirilmesine ve cismin hızının ışık hızını geçmesine izin verip vermediğini; veya Maxwell kuramının bir birim elektrik yüküne sahip olan bir parçacığın, iki birim elektrik yüküne sahip olan parçacıklara bozunmasına izin verip vermediğini sorduğunuzda alacağınız kesin "hayır" olmayıp, koşula bağlı bir "hayır" dır. Gerçek şu ki, hiç kimse fizik yasalarının geçmiş zamana yönelik yolculuğu kesinlikle yasakladığını göster-

remedi. Tersine, bazı fizikçiler sınırsız teknolojik başarılarla sahhip olan bir uygarlığın tümüyle bilinen fizik yasaları içinde bir zaman makinesi (zaman makinelerinden söz ettiğimizde her zaman, hem geleceğe hem de geçmişe yolculuk yapabileceğimiz bir makineyi kastediyoruz) yapmaya yönelik varsayımsal yönergeler bile hazırlamışlardır. Önerilerin H. G. Wells tarafından tanımlanan uçan zimbirtıyla veya Doc Brown'ın sıvılaşılan aracıyla pek benzerliği yoktur. Tasarım öğeleri tümüyle bilinen fiziğin sınırları içindedir, bu da birçok araştırmacının, doğa yasalarını kavrayışımızda önümüzdeki dönemde ortaya çıkacak gelişmelerle birlikte, zaman makineleri konusunda var olan ve gelecekte ortaya atılacak projelerin, fiziksel olarak olası olmadıklarından kuşkulananmalarına yol açıyor. Ama bugün için bu kuşku sağlam ve güvenilir ispata değil, cesur duygulara ve koşullu kanıtlara dayanıyor.

Einstein'ın kendisi de genel görelilik kuramının yayımlanmasına yol açan yoğun araştırma yıllarında geçmişe yolculuk konusunda uzun uzun düşünmüştür.¹⁰ Doğrusunu söylemek gerekirse bunu düşünmemiş olması garip olurdu. Uzay ve zaman konusundaki köktenci çalışmaları uzun süredir kabul edilen dogmaların çöpe atılmasına neden olurken, çok eskiden beri varlığını sürdüren soru, bu alt-üst oluşun nereye kadar gideceği idi. Bilinen, gündelik, sezgisel zamanın hangi özellikleri varlıklarını sürdürebilecekti? Einstein zamanda yolculuk konusunda pek bir şey yazmamıştı çünkü kendi standartlarına göre bu konuda fazla ilerleme elde edememişti. Ama genel görelilik üzerine yazdığı makaleyi izleyen on yıllarda başka fizikçiler yavaş ama güvenli bir şekilde bu konuda makaleler yazdılar.

Zaman makineleriyle ilgili olarak yazılan genel görelilik makalelerinin öncüleri arasında 1937'de İskoç fizikçi W. J. Van Stokum" ve 1949'da Einstein'ın İleri Araştırmalar Enstitüsü'nden çalışma arkadaşı olan Kurt Gödel'in yazdıkları vardır. Van Stokum, genel görelilikte, çok yoğun ve sonsuz uzunlukta bir silindirin (sonsuz) uzun eksenini etrafında dönme hareketi yaptığı varsayımsal bir problemi inceledi. Her ne kadar sonsuz uzunluk-

taki silindir fiziksel olarak gerçekçi değilse de, Stockum'un çözümlmeleri ilginç bir sonuç ortaya koydu. Bölüm 14'te görmüş olduğumuz gibi, dönmekte olan büyük kütleli cisimler uzayı da anafor benzeri bir hareketle sürüklerler. Dönme hareketi zamanın yönünün yana dönmesine neden olur, böylece silindir etrafındaki dönme hareketi sizi geçmişe götürür. Eğer roketiniz silindir etrafında dönüyorsa, başladığınız noktaya, yolculuğa çıkmadan önce ulaşırsınız. Elbette hiç kimse sonsuz uzunlukta, dönen bir silindir yapamaz ama bu çalışma, genel göreliliğin geçmiş zamana yolculuğu yasaklamayabileceğim gösteren ilk ipuçlarındandır.

Gödel'in makalesi aynı zamanda dönme hareketini kapsayan durumu da inceliyordu. Ama uzayda dönen bir cisme odaklanmak yerine Gödel, uzayın tamamının dönme hareketi yaptığında ne olduğunu araştırıyordu. Mach bunu anlamsız bulurdu. Eğer evrenin tümü dönüyorsa, o zaman bu dönmenin, ona göre ölçüldüğü hiçbir şey yoktur. Mach, dönen bir evrenin duran bir evrenle aynı olduğu sonucuna varırdı. Ama bu, genel göreliliğin Mach'ın göreci uzay kavramı ile tam olarak uyuşmada başarısız olduğu bir başka durumdur. Genel göreliliğe göre bütün uzayın dönmesinden söz etmek anlamlı değildir ve bu olasılıkla basit gözlemsel sonuçlar ortaya çıkar. Örneğin, dönmekte olan bir evrende bir lazer demeti gönderseniz, genel görelilik ışığın doğrusal bir çizgi üzerinde değil, sarmal bir yol izleyerek yayılıyormuş gibi görüneceğini söyler (bir atlıkarıncada iken yukarıya doğru bir oyuncak silah ateşlerseniz, yavaş-çekimde hareket eden merminin izleyeceği yol). Gödel'in çözümlemesinin şaşırtıcı özelliği, uzay geminizin dönmekte olan bir evrende uygun yörüngeler izlemesi durumunda, başlangıç noktanıza hareket zamanınızdan önce varabileceğinizi kavramış olmasıdır. Bu yüzden, dönen evrenin kendisi bir zaman makinesidir.

Einstein Gödel'i buluşu nedeniyle kutladı ama ilerideki araştırmaların, genel görelilik denklemlerinin geçmiş zamana yolculuğa izin veren çözümlerinin temel fizik gereklerine ters düşerek bunların yalnızca matematiksel ilginçlikler olarak kalmaları-

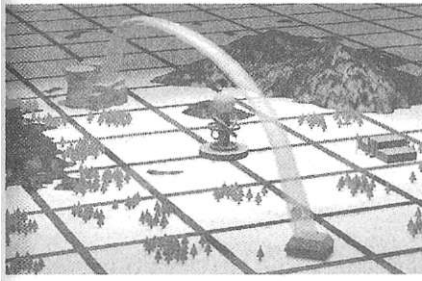
na neden olabileceğini söyledi. Gödel'in çözümü açısından, gidererek daha hassas gözlemler evrenimizin dönmediğini ortaya koyarak bu çözümün doğrudan ilişkisini azalttı. Ama van Stockum ve Gödel cini bir kere lambadan çıkarmışlardı; onbeş-yirmi yıl içinde Einstein'm denklemlerinin geçmiş zamana yolculuğa izin veren başka çözümleri de bulundu.

Son yıllarda varsayıma dayanan zaman makinesi tasarımlarına ilgi arttı. 1970'lerde Frank Tipler, van Stockum'un çözümünü yeniden inceledi ve 1991 de Princeton Üniversitesi'nden Richard Gott, kozmik sicimler (evrenin ilk dönemlerindeki faz geçişlerinin varsayıma dayalı, sonsuz uzunluktaki, ipliksi kalıntıları) adı verilen yapıları kullanarak zaman makinesi yapmanın bir başka yolunu keşfetti. Bunların tümü önemli katkılardır ama geçmiş bölümlerde geliştirdiğimiz kavramları kullanarak tarif etmenin en basit olduğu öneri Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde Kip Thorne ve öğrencileri tarafından bulunmuştur. Bu öneride solucan delikleri kullanılmıştır.

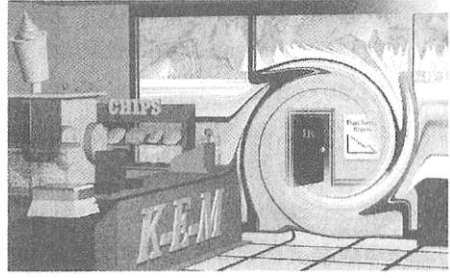
Bir Solucan Deliği Zaman Makinesinin Ayrıntılı Planları

Önce Thorne'un solucan deliği zaman makinesini yapmak için kullandığı temel stratejiyi açıklayacak ve gelecek alt-bölümde de Thorne'un planlarını gerçekleştirmek üzere kiralayacağı müteahhidin karşılaşacağı zorlukları anlatacağım.

Bir *solucan deliği* uzayda varsayıma dayalı bir tüneldir. Bir dağın bir yanından açılan, daha bilindik bir tünel, bir yerden diğerine kestirme bir yol sağlar. Solucan delikleri de benzer bir işlev görürler ama bildiğimiz tünellerden önemli bir bakımdan ayrılırlar. Bildiğimiz tüneller var olan uzayda yeni bir rota sağlarken -dağ ve işgal ettiği uzay, tünel yapılmadan önce de vardır- solucan deliği uzaydaki bir noktadan başka bir noktaya yeni, önceden orada olmayan bir uzay tüpü aracılığıyla tünel oluşturur. Dağdaki tüneli oradan çıkarsanız, kapladığı uzay hâlâ oradadır. Solucan deliğini çıkarırsanız, kapladığı uzay ortadan yok olur.

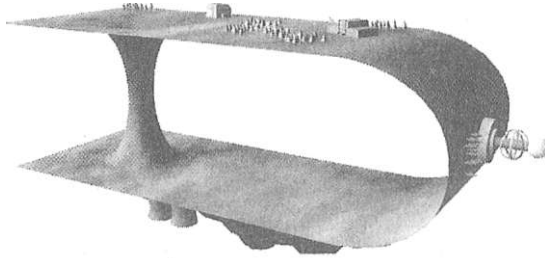


(a)



(b)

Şekil 15.2 (a) Kwik-E-Mart'tan nükleer santrale uzanan solucan deliği (b) Kwik-E-Mart'taki girişten nükleer santraldeki girişe doğru bakıldığında solucan deliğinden görülen manzara



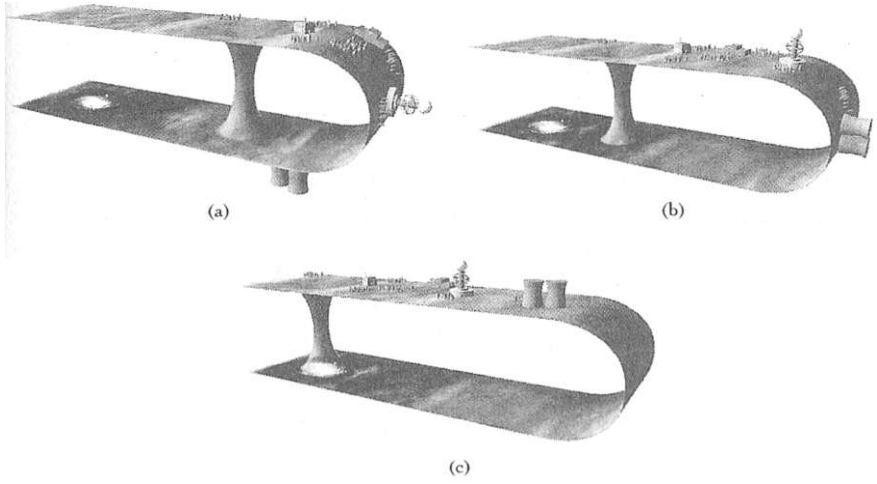
Şekil 15.3 Solucan deliğinin kestirme olduğunu daha açık bir biçimde gösteren geometri (Solucan deliği girişleri gerçekte Kwik-E-Mart'ın ve nükleer santralin içindedir ama bunu şekilde göstermek zordur.)

Şekil 15.2a Kwik-E-Mart'ı Springfield Nükleer Santraline bağlayan solucan deliğini gösteriyor ama solucan deliği Springfield göklerinden geçiyor gibi görüldüğü için şekil yanıltıcıdır. Doğrusu, solucan deliği uçlarından yani girişlerinden bildiğimiz uzaya bağlanan, yeni bir uzay bölgesi olarak düşünülmelidir. Eğer Springfield sokaklarında yürürken solucan deliği aramak için gökyüzüne bakarsanız, hiçbir şey görmezsiniz. Onu görmenin tek yolu normal uzayda bir açıklık, solucan deliği girişi göreceğiniz Kwik-E-Mart'a sıçramaktır. Açıklıktan baktığınızda Şekil 15.2b'deki gibi ikinci girişin yerini, nükleer santralin içini görürsünüz. Şekil 15.2a'daki çizimin bir başka yanıltıcı yanı, solucan deliğinin kestirme gibi görünmüyor olmasıdır. Bunu, çizim

mi Şekil 15.3'teki gibi yaparak düzeltebiliriz. Görebileceğiniz gibi, nükleer santralden Kwik-E-Mart'a giden normal yol gerçekten de solucan deliğinin yeni uzaysal geçişinden uzundur. Şekil 15.3'teki bükülmeler, genel görelilik geometrisini düz bir sayfa üzerine çizmenin güçlüklerini gösteriyor ama şekil, solucan deliğinin sağlayacağı yeni bağlantı konusunda sezgisel bir duygu veriyor.

Hiç kimse solucan deliklerinin var olup olmadığını bilmiyor ama onlarca yıl önce fizikçiler genel göreliliğin matematiğinin solucan deliklerine izin verdiğini, o nedenle de kuramsal çalışmalar yapılmasının doğru olduğunu belirlediler. 1950'lerde John Wheeler ve çalışma arkadaşları solucan delikleri konusunu en önce inceleyen araştırmacılar arasındaydılar ve solucan deliklerinin temel matematiksel özelliklerinden pek çoğunu keşfettiler. Son zamanlarda ise Thorne ve çalışma arkadaşları yalnızca uzayda değil, zamanda da kestirme yollar oluşturduklarını fark ederek, solucan deliklerinin tüm zenginliğini gözler önüne serdi.

Fikir şudur: Bart ve Lisa'nın, Springfield deki solucan deliğinin iki ucunda durduklarını -Bart nükleer santralde, Lisa Kwik-E-Mart'ta- ve Homer'e doğum gününde ne alacaklarını konuştuklarını varsayalım. Bart galaksilerarası kısa bir yolculuk yaparak Homer'e çok sevdiği Andromeda balık kroketlerinden almayı düşünürse de Lisa kendini böyle bir yolculuğa hazır hissetmez. Ama her zaman Andromeda'yı görmek istediği için Bart in solucan deliğinin onun tarafındaki ucunu uzay gemisine alarak yolculuğa öyle çıkmasını ister, böylece Andromeda'yı görebilecektir. Bunun, Bart'ın yolculuğu süresince solucan deliğini esneterek uzatması gerektiği anlamına geldiğini düşünebilirsiniz ama bu durumda Kwik-E-Mart'ı Bart'ın uzay gemisine bağlayan solucan deliğinin bildiğimiz uzayda olduğu varsayılmaktadır. Oysa öyle değildir. Şekil 15.4'te gösterildiği gibi, genel göreliliğin geometrisinin mucizeleri aracılığıyla, solucan deliğinin uzunluğu yolculuk süresince sabit kalır. Kilit nokta budur. Bart roketle Andromeda'ya gitse bile, solucan deliği aracılığıyla Lisa'ya olan



Şekil 15.4 (a) Kwik-E-Mart'ı nükleer santrale bağlayan bir solucan deliği (b) Solucan deliğinin alttaki ucu (nükleer santralden) uzaya (şekilde gösterilmeyen uzay gemisine) taşınır. Solucan deliğinin uzunluğu sabit kalır, (c) Solucan deliğinin ucu Andromeda galaksisine ulaşır; diğer uç bâlâ Kwik-E-Mart'ıdır. Solucan deliğinin uzunluğu tüm yolculuk boyunca değişmez.

uzaklığı değişmez. Bu da, solucan deliğinin rolünün uzayda kes-tirme yol sağlamak olduğunu apaçık gösterir.

Kesin biçimde konuşmak için, Bart'ın ışık hızının yüzde 99,999999999999999'i kadar bir hızla Andromedaya doğru dört saat yol aldığını varsayalım, bu süre içinde de, Lisa ile tıpkı uçuş öncesinde yaptıkları gibi solucan deliğinden sürekli olarak konuşuyor olsunlar. Uzay gemisi Andromedaya ulaştığında, Li-sa rahatsız edilmeden manzarayı izlemek için Bart'a sesini kes-mesini söyler. Bart'ın, Rokete Servis Balık Kroketçisi'nden pa-keti kaptığı gibi dönüş yoluna düşmesine çok sinirlenen Lisa, yi-ne de dönüş yolu boyunca onunla konuşmaya razı olur. Dört sa-at kadar sonra Bart gemisini güvenli bir şekilde Springfield'deki çim alana indirir.

Ama uzay gemisinin penceresinden baktığında Bart şok geçi-rir. Binalar tamamıyla farklı görünmekte ve stadyumun üzerin-deki tarih tabelası, gidişinden 6 milyon yıl sonraki bir tarihi gös-termektedir. "Olamaz!?" der kendi kendine, ama bir an sonra

her şeyi anlar. Özel göreliliğin, ne kadar hızlı giderseniz, saatini-
zin o kadar yavaşlayacağını söylediğini hatırlar. Eğer uzaya doğ-
ru çok yüksek bir hızla gider ve geri dönerseniz, uzay geminiz-
de yalnızca birkaç saat geçmiş olabilir ama hareketsiz duran bi-
rine göre binlerce, belki de milyonlarca yıl geçmiş olacaktır. Hız-
lı bir hesaplamaıyla Bart, yolculuk yaptığı hızla gemide sekiz sa-
at geçtiğini, bununla Dünya'da 6 milyon yıl geçmiş olduğu an-
lamına geldiğini bulur. Skor tabelasındaki tarih doğrudur; Bart
Dünya'nın geleceğine doğru yolculuk yapmıştır.

Lisa, solucan deliğine "Bart! Hey, Bart!" diye bağırır. "Beni
duyuyor musun?" Acele et. Akşam yemeğine zamanında yetiş-
mek istiyorum" Bart solucan deliğine bakar ve Lisa ya biraz önce
Springfield'e indiğini söyler. Solucan deliğine daha dikkatli ba-
kan Lisa, Bart'ın doğru söylediğini görür ama Kwik-E-Mart'tan
Springfield'e doğru baktığında, çim alanda Bart'ın uzay gemisi-
ni göremez. "Anlamıyorum" der.

"Aslında çok anlamlı "diye cevaplar Bart gururla. "Springfield'e
indim, ama 6 milyon yıl sonrasına. Kwik-E-Mart'ın penceresin-
den bakarak beni göremezsin. Doğru yere ama yanlış zamana
bakıyorsun. 6 milyon yıl önceye bakıyorsun."

"Evet, tamam, genel görelilikteki zamanın kısalması 'der Li-
sa. "Çok iyi, her neyse, akşam yemeği için eve zamanında yetiş-
mek istiyorum, onun için Solucan deliğinden geç. Acele etmemiz
gerekıyor." "Tamam" der Bart ve solucan deliğinde sürünmeye
başlar. Lisa ile birlikte eve doğru yola koyulurlar.

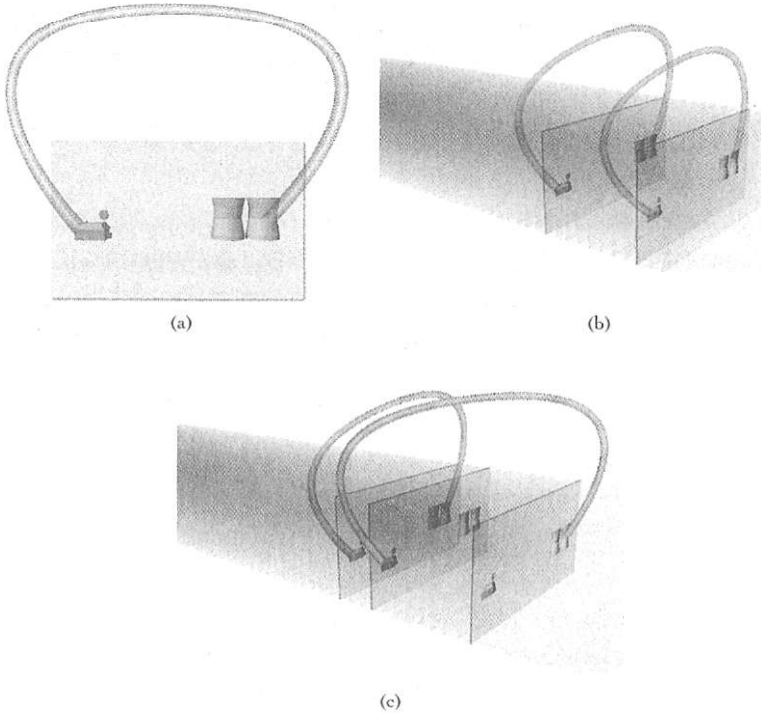
Dikkat ederseniz her ne kadar Bart'ın solucan deliğinde sü-
rünmesi onun yalnızca bir saniyesini almış olsa da, *onu zaman-
da 6 milyon yıl geriye götürmüştür.* Bart, gemisi ve solucan deli-
ği Dünya'nın uzak geleceğine inmişlerdir. Eğer dışarı çıkmış, in-
sanlarla konuşmuş ve gazetelere göz atmış olsaydı, her şey bu du-
rumu doğrulayacaktı. Ama solucan deliğinden geçip Lisa'yla bu-
luştığında kendini yine bugünde buldu. Aynı şey, Bart'ı solucan
deliği ağzında izlemekte olan birisi için de geçerlidir: O da zaman-
da 6 milyon yıl geriye gidecektir. Benzer şekilde, solucan deliği-
nin Kwik-E-Mart'taki ucuna giren ve diğer ucta Bart'ın gemisin-

deki uçtan çıkan birisi, zamanda 6 milyon yıl ileriye gider. Önemli nokta, Bart'ın uzaydaki yolculuğuna Solucan deliği çıkışlarından yalnızca birini götürmüş olması değildir. Yolculuk solucan deliği çıkışını zaman içinde de taşımıştır. *Bart'ın yolculuğu hem onu, hem de solucan deliğinin çıkışını geleceğe götürmüştür. Kısacası Bart, uzaydaki bir tüneli zamandaki bir tünele dönüştürmüştür; bir solucan deliğini bir zaman makinesi haline getirmiştir.*

Ne olup bittiği, kabaca Şekil 15.5'teki gibi gösterilebilir. Şekil 15.5a'da uzaydaki bir konumu diğerine bağlayan bir solucan deliği görüyoruz. Solucan deliği, bildiğimiz uzayın dışında olduğu vurgulanacak şekilde çizilmiş. Şekil 15.5b'de bu solucan deliğinin her iki çıkışı da sabit olacak şekilde (zaman dilimleri durağan bir gözlemcinin dilimleridir) zamanda evrimini görüyoruz. Şekil 15.5c'de solucan deliğinin çıkışlarından biri bir uzay gemisine konarak, başladığı noktaya dönen bir uzay yolculuğuna çıkarıldığında ne olduğu görülüyor. Hareket eden çıkış için zaman, tıpkı hareket eden bir saatin zamanı gibi, yavaşlıyor ve böylece solucan deliğinin hareket eden çıkışı geleceğe doğru bir yolculuk yapıyor. (Eğer hareket eden saat için yalnızca bir saat geçerken durağan saatler için binlerce yıl geçerse, hareket eden saat sabit saatlerin geleceğine gitmiş olur.) Böylece, sabit solucan deliğinin çıkışı, solucan deliği tüneliyle aynı zaman dilimindeki bir çıkışa değil de, Şekil 15.5c'deki *gibi gelecekteki bir zaman dilimindeki bir çıkışa* bağlanır. Solucan deliği çıkışları daha fazla hareket ettirilmedikçe, aralarındaki zaman farkı sabit kalacaktır. Herhangi bir anda bu çıkışların birinden girer, diğerinden çıkarsanız, zamanda yolculuk yapmış olursunuz.

Solucan Deliğinden bir Zaman Makinesi Yapmak

Artık zaman makinesi yapma yolunda bir planımız var. 1. Adım: Kendinizin ya da zaman içinde yolculuk yapmasını istediğiniz şeyin geçebileceği genişlikte bir solucan deliği bulun ve ya yaratın. 2. Adım: Birini diğerine göre hareket ettirerek solucan deliğinin çıkışları arasında bir zaman farkı yaratın. Bu kadar. Tabii yalnızca ilke olarak.



Şekil 15.5 (a) Herhangi bir anda yaratılan bir solucan deliği, uzaydaki bir konumu diğerine bağlar, (b) Eğer solucan deliğinin çıkışları birbirine göre hareket etmezse, zamanın içinden aynı hızla "geçerler", böylece tünel iki bölgeyi birbirine aynı zamanda bağlar, (c) Eğer solucan deliği çıkışlarından biri, başladığı yerde biten bir yolculuğa çıkarılırsa (gösterilmemiştir), o çıkış için daha az zaman geçecektir ve böylece tünel uzayın iki bölgesini birbirine farklı zamanlarda bağlayacaktır. Solucan deliği, bir zaman makinesi haline gelmiştir.

Ya pratiğe gelince? Başta da söylediğim gibi, hiç kimse solucan deliklerinin var olup olmadığını bile bilmiyor. Bazı fizikçiler uzaysal dokunun yapısında birçok mikroskobik solucan deliği olabileceğini, solucan deliklerinin kütleçekimi alanının kuantum dalgalanmaları nedeniyle sürekli olarak ortaya çıkıyor olabileceğini ileri sürdüler. Eğer öyle ise yapmamız gereken, bunlardan birini makroskobik boyutlara kadar büyütme. Bunun nasıl yapılabileceği konusunda önerilerde bulunulmuştur ama bunlar hayali uçuşların bile ötesindedir. Başka bazı fizikçilerse

büyük solucan delikleri yaratılması işine uygulamalı genel görelilikteki bir mühendislik projesi olarak bakmaktadır. Uzayın madde ve enerjinin dağılımına tepki verdiğini biliyoruz, o zaman madde ve enerji üzerinde yeterli kontrolü sağlayarak uzayın bir bölgesinin bir solucan deliğine dönüşmesini sağlayabiliriz. Bu yaklaşım, ek bir karmaşıklık getirir çünkü nasıl bir tünel girişi yapmak için dağın bir yüzünü delerek açmak zorunday-sak, bir solucan deliği girişi oluşturmak için de uzayın dokusunu bir yerde delerek açmak zorundayız.¹² Bu delip açmalara fizikte izin verilip verilmediğini henüz hiç kimse bilmiyor. Sicim kuramında, içinde benim de yer aldığım çalışma, uzaysal delme ve açmaların bazı türlerinin olası olduğunu göstermişti ama bu açmaların solucan deliği yaratmakla bir ilgisi olup olmadığı konusunda hiçbir fikrimiz yok. Şimdilik makroskobik solucan delikleri elde etme niyeti, en iyi olasılıkla bile gerçekleştirilmekten çok uzak bir hayaldir.

Üstelik makroskobik bir solucan deliği yapabilmiş olsak bile, işimiz bitmiş sayılmaz; aşmamız gereken birkaç önemli engel daha var. Bunlardan ilki, daha 1960'larda Wheeler ve Robert Fuller in genel görelilik denklemlerini kullanarak solucan deliklerinin kararsız olduklarını göstermiş olmalarıdır. Çeperleri saniyenin bir kesri kadar kısa bir sürede içeriye doğru çökme eğilimindedir ki bu, solucan deliklerinin herhangi bir yolculuk için kullanılmaları olasılığını yok eder. Ama daha yakın zamanlarda (aralarında Thorne, Morris ve Matt Visser'in de bulunduğu) fizikçiler bu çökme problemini bertaraf etmenin bir yolunu buldular. Eğer solucan deliği boş değilse, madde içeriyorsa -*egzotik madde* denen şey- bu madde dışarıya doğru bir basınç uygulayarak solucan deliğinin açık kalmasını ve kararlı olmasını sağlayabilir. Her ne kadar etki olarak kozmoloji sabitine benziyorsa da, egzotik madde negatif enerjiye sahip olduğu için (kozmo-
loji sabitinin yalnızca negatif basınç karakterini yansıtmakla kalmaz¹³) dışarıya doğru itme sağlayan itici kütleçekimi yaratır. Çok özel koşullar altında kuantum mekaniği negatif enerjiye izin verir¹⁴, ama egzotik maddeyi kullanarak bir solucan deliğini açık tut-

ma işi çok çok zordur. (Örneğin Visser, bir metre çapındaki bir solucan deliğini açık tutmak için gerekli olan negatif enerjinin, yaklaşık olarak Güneş'in on milyar yılda ürettiği toplam enerjiye eşit olduğunu hesaplamıştı.¹⁵⁾

ikincisi, eğer bir şekilde makroskobik bir solucan deliği bulmuş ya da yaratabilmiş olsak ve gene bir şekilde duvarlarını ani bir çökmeye karşı içeriden destekleyebilmiş olsak ve solucan deliğinin iki girişi arasında bir zaman farkı yaratabilmiş olsak bile (diyelim, girişlerden birinin yüksek bir hızla hareket etmesini sağlayarak), solucan deliğini zaman makinesine dönüştürmenin önünde hâlâ bir engel vardır. Aralarında Stephen Hawking'in de bulunduğu bir grup fizikçi, boşluk dalgalanmalarının -Bölüm 12'de işlenen ve bütün alanların hatta boş uzayın bile kuantum belirsizliğinden kaynaklanan titreşimleri- solucan deliğini tam zaman makinesine dönüşeceği anda yok edebileceği olasılığına dikkat çektiler. Bunun nedeni, solucan deliğinde zamanda yolculuğun tam olası olacağı anda, tıpkı iyi ayarlanmamış bir ses sisteminde mikrofön ve hoparlörlerin yeri nedeniyle oluşan tiz ve yüksek sesin ortaya çıkmasına neden olan devasa bir geri-beslemenin ortaya çıkma olasılığıdır. Gelecekteki boşluk dalgalanmaları solucan deliğinden geçmişe gidebilir, orada bildiğimiz uzayda ve zamanda geleceğe doğru yolculuk yapabilir, solucan deliğine yeniden girerek yeniden geçmişe gidebilir, böylece solucan deliğinden sonsuz bir çevrime girerek onu giderek artan bir enerjiyle doldurabilir. Böylesine yoğun bir enerji birikmesinin solucan deliğini tahrip edeceği düşünülüyor. Kuramsal araştırmalar bunu gerçek bir olasılık olarak sunuyorlar ama gereken hesaplar eğri uzay-zamanda modern genel görelilik ve kuantum mekaniği anlayışımızı zora soktukları için sonuç alıcı bir kanıt henüz yok.

Solucan deliğinden bir zaman makinesi yapmanın zorluklarının çok büyük olduğu açıktır. Ama kuantum mekaniği ve kütleçekimindeki ustalığımız, belki de süpersicim kuramındaki ilerlemelerle artıncaya kadar, son söz henüz söylenmemiş olacaktır. Her ne kadar sezgisel düzeyde fizikçiler geçmiş zamana yolculu-

ğün olanaksız olduğunu söylüyor olsalar da, bugün için bu soru henüz net bir biçimde cevaplanmamıştır.

Kozmik Turizm

Zamanda yolculuk konusunda düşünürken, Hawking ilginç bir noktaya değindi. Neden, diye soruyordu, eğer zamanda yolculuk olası ise, acaba Dünya'mızı gelecekte gelen ziyaretçiler neden istila etmiyor? Belki de ediyorlardır, diyebilirsiniz. Daha da ileri giderek, o kadar çok zaman yolcusunu hapse attık ki, artık diğerleri kendilerini tanıtmaya cesaret edemiyorlar, cevabını verebilirsiniz. Elbette Hawking bu soruyu yarı şaka yarı ciddi soruyordu, ben de öyle, ama ortaya attığı konu ciddiydi. Eğer gelecekte gelen ziyaretçilerimiz olmadığına inanıyorsanız ki ben öyle olduğuna inanıyorum, acaba bu, zamanda yolculuğun olanaksız olduğuyla eş anlama mı geliyor? Elbette eğer insanlar gelecekte zaman makinesi yapmayı başarabilirlerse, bazı tarihçiler burs alıp geçmişe giderek ilk atom bombasının yapılışını, Ay'a yapılan ilk yolculuğu ya da ilk baskının bir "reality show" a dönüşmesini özgün zamanında ve kişisel olarak inceleme fırsatı bulacaklardır. O yüzden eğer zamanımızı gelecekte hiç kimsenin ziyaret etmediğine inanıyorsak, belki de o zaman farkında olmadan bir zaman makinesinin hiçbir zaman yapılamayacağına inanıyoruz demektir.

Aslında bu zorunlu bir sonuç da değildir. Şimdiye kadar önerilen zaman makineleri, ilk makinenin yapıldığı zamandan daha önceki bir zamana yolculuk yapılmasına izin vermez. Şekil 15.5'i inceleyerek solucan deliği zaman makinesi için bunu anlamak kolaydır. Her ne kadar solucan deliği girişleri arasında zaman farkı varsa ve her ne kadar bu fark zamanda ileri ve geri yönde yolculuğa izin veriyorsa da, bu zaman farkının yaratıldığı zamanın öncesine ulaşamazsınız. Uzay-zaman somununun en sonunda solucan deliğinin kendisi de yoktur, o yüzden oraya ulaşmak için solucan deliğini kullanmanın hiçbir yolu yoktur. Bu nedenle eğer ilk zaman makinesi diyelim günümüzden 10.000 yıl sonra yapılırsa, *o an* hiç kuşkusuz çok turist çekecektir ama bi-

zim zamanımız gibi bütün önceki zamanlar ulaşılmaz olarak kalacaktır.

Doğa yasalarını şimdiki kavrayışımızın, yalnızca zamanda yolculuğun görünüşteki çelişkilerinden nasıl kaçınabileceğimizi göstermekle kalmayıp, zamanda yolculuğun gerçekten de nasıl yapılabileceği konusunda öneriler ileri sürmesini meraklı ve inandırıcı buluyorum. Beni yanlış anlamayın: Kendimi sezgisel olarak günün birinde geçmişe yolculuğun yapılamayacağını kanıtlanacağına inanan aklı başında fizikçiler arasında sayıyorum. Ama kesin kanıtlama yapıncaya kadar her şeye açık bir zihne sahip olmanın doğru ve uygun olacağını düşünüyorum. En azından, bu konulara odaklanan araştırmacılar, uç koşullardaki uzay ve zaman kavrayışımızı önemli ölçüde derinleştiriyorlar. En iyi olasılıkla bu araştırmacılar bizi uzay-zamanın süper otoyoluyla bütünleştirme konusunda ilk kritik adımları atıyor olabilirler. Sonuçta, bir zaman makinesi yapmayı başaramadan geçen her an, sonsuza kadar bizim ve bizden sonra gelen herkesin erişiminin ötesinde olacaktır.

Bir Anıştırmanın Geleceği

Uzay ve Zaman Hakkında Görüşler

Fizikçiler yaşamlarının büyük bölümünü bir kafa karışıklığı içinde geçirirler. Bu, mesleki bir durumdur. Fizikte yetkinleşmek, gerçeğe giden dönemeçli yolda kuşkuyla sarmaş dolaş olarak yaşamak demektir. Bulanık zihnin kıvrandırıcı rahatsızlığı, normalde sıradan olan insanlara olağandışı zekâ ve yaratıcılık kazandırır; hiçbir şey insan aklını bir noktaya, uyumlu çözümü bekleyen uyumsuz ayrıntılar kadar odaklamaz. Ama aydınlanmaya giden yolda -önemli problemleri çözmek için yeni yapıları araştırırken- kuramcılar, bu zihin bulanıklığı ormanında çoğu zaman sezgilerin, işaretlerin, ipuçlarının ve hesaplamaların kılavuzluğunda kararlı ve sağlam adımlarla yürümelidir. Araştırmacıların çoğunluğu izlerini örtme eğiliminde olduğu için, keşifler yürünen sarp ve yalçın arazi konusunda çok az bilgi verirler. Ama hiçbir şeyin kolay elde edilmediği gerçeğini hiç unutmayın. Doğa, gizlerinden kolayca vazgeçmez.

Bu kitapta çeşitli bölümlerde insanın uzay ve zamanı anlama çabalarının öyküsüne göz attık. Her ne kadar bazı derin ve şaşırtıcı fikirlerle karşılaştıysak da, bütün zihin bulanıklığının ortadan kalktığı ve her şeyin tam bir açıklığa kavuştuğu o son "eureka" anına henüz ulaşamadık. Şu anda henüz balta girmemiş ormanlarda mücadele ediyoruz. O halde bundan sonra ne yapacağız? Uzay-zamanın öyküsünde bundan sonraki bölüm nedir? Elbette hiç kimse bundan tam olarak emin değil. Ama son yıllarda birtakım ipuçları ortaya çıktı ve her ne kadar henüz bunlar var olan resimle tam olarak bütünleşmemiş olsa da, birçok fizikçi bu ipuçlarının evren kavrayışımızda yeni bir alt-üst oluşa işaret ettiğine inanıyorlar. Bu alt-üst oluşa giden yolda, şimdi algıladığımız şekliyle uzay ve zaman, fiziksel gerçekliğin altında yatan anlaşılması daha zor, daha derin ve daha temel ilkelerin yalnızca ipuçları olabilirler. Bu öykünün son bölümünde bu ipuçlarından bazılarını göz önüne alalım ve evrenin dokusunu anlamak için sürmekte olan çabalarımızın nereye doğru yönleneceğinin izlerini yakalamaya çalışalım.

Uzay ve Zaman Temel Kavramlar mıdır?

Alman filozof Immanuel Kant uzay ve zaman kavramları olmaksızın evren konusunda düşünmenin ve evreni tanımlamanın yalnızca güç olmakla kalmayacağını, kesin olarak olanaksız olduğunu söylemişti. Doğruyu söylemek gerekirse, Kant in buraya nereden geldiğini görebiliyorum. Ne zaman otursam, gözlerimi kapayıp bir şekilde uzayda yer kaplamayan ve zamandan etkilenmeyen birşeyler hakkında düşünmeye çalışsam, başarısız oluyorum. Çok başarısız. Bağlam yoluyla uzay ve değişim yoluyla zaman her zaman konuya giriyor. Gariptir ki, düşüncelerimi doğrudan uzay-zaman bağlantısından kurtarmaya en yaklaştığım an, matematik hesaplarına (ki bunlar genellikle uzay-zamanla ilişkili hesaplar!) daldığım zaman oluyor çünkü anlık bile olsa matematiğin doğası, uzay ve zamandan bağımsız gibi duran soyut bir çerçevede düşüncelerimi yutuyor gibi görünüyor. Ama düşüncelerin kendileri ve içinde yer aldıkları ortam,

her şeye rağmen bildiğimiz uzay ve zamanın parçaları. Uzay ve zamandan kendimizi kurtarmak, gölgemizden kurtulmak kadar olanaksızdır.

Bununla birlikte, günümüzün önde gelen fizikçileri, her ne kadar nüfuz edici de olsalar, uzay ve zamanın gerçekten temel olmayabileceğinden kuşkulanıyorlar. Nasıl bir top güllesinin sertliği atomlarının ortak özelliklerinden kaynaklanıyorsa, nasıl bir gülün kokusu onu oluşturan moleküllerin ortak özelliklerinden kaynaklanıyorsa ve nasıl bir çitanın hızı kaslarının, sinirlerinin ve kemiklerinin ortak özelliklerinden kaynaklanıyorsa, uzayın ve zamanın nitelikleri de -bu kitapta incelemeye çalıştığımız şeylerin çoğu- henüz bilmediğimiz daha temel bileşenlerin ortak özelliklerinden kaynaklanıyor olabilir.

Fizikçiler bunu bazen uzay-zamanın bir yanılsama olabileceğini söyleyerek özetlerler ki bu betimleme kışkırtıcı olsa da anlamı daha uygun bir yorum gerektirir. Ne de olsa size eğer hızlı bir top mermisi çarparsa, eğer bir gül kokusu duyarsanız veya hızla koşan bir çita görürseniz, bunların varlığını yalnızca bunlar daha temel bileşenlerden oluştukları gerekçesiyle inkâr edemezsiniz. Tersine, çoğumuzun bu madde yığınlarının var olduğu ve üstelik bunların bilinen özelliklerinin atomik bileşenlerinden nasıl kaynaklandığının incelenmesinden çok şey öğrenilebileceği konusunda fikir birliği içinde olduğumuzu düşünüyorum. Ama bütün bunlar bileşik olduklarından, yapmamamız gereken şey, top güllerleri, gül kokuları ve çitalar üzerine bir evren kuramı oluşturmaya çalışmaktır. Benzer biçimde eğer uzay ve zamanın bileşik varlıklar olduğu ortaya çıkarsa, bu, Newton'un kovasından Einstein'ın kütleçekimine kadar karşımıza çıkan değişik görünümlerinin yanılsamalar olduğu anlamına gelmez; uzay ve zamanın kavrayışımızda gelecekte ortaya çıkacak gelişmelerden bağımsız olarak, deneysel gerçekliği kucaklayan konumlarını koruyacaklarına hiç kuşku yoktur. Ama bileşik uzay-zaman, evrenin çok daha temel bir tanımının -uzaysız ve zamansız bir tanım- keşfedilmesi gerektiği anlamına gelir. O zaman yanılsama bizden kaynaklanıyor demektir ki bu da, evreni en derinden

kavrayışın uzay ve zamanı olabileceği kadar berrak bir noktaya getireceği yolundaki yanlış inanıştır. Nasıl maddeyi atom-altı düzeyde incelediğinizde top mermisinin sertliği, gülün kokusu veya çitanın hızı ortadan kayboluyorsa, uzay ve zaman da doğa yasalarının en temel biçimiyle mercek altına alındıklarında benzer biçimde ortadan yok oluyor olabilirler.

Uzay-zamanın en temel kozmik yapıtaşları arasında olmayışı size doğal olmayan bir zorlamamış gibi gelebilir. Haklı da olabilirsiniz. Uzay-zamanın derin fizik yasalarından çıkmak üzere olduğu söylentisi aptalca kuramlardan kaynaklanmıyor. Tam tersine, bu fikir, nedenleri çok sağlam olan bazı görüşlerce ile ri sürülüyor. Şimdi bunların en belirgin olan bazılarına bir göz atalım.

Kuantum Ortalaması

Bölüm 12'de uzayın dokusunun kuantum evreninde geri kalan her şey gibi nasıl kuantum belirsizliği titreşimlerine maruz kaldığını görmüştük. Hatırlayacağınız gibi, nokta-parçacık kuramlarını ciddiye almayıp, onları anlamlı bir kuantum kütleçekimi kuramı ortaya koymaktan alıkoyan işte bu titreşimlerdi. Sicim kuramı nokta parçacıkları halkalar ve sicimlerle değiştirerek bu titreşimleri dağıtır -genliklerini önemli ölçüde azaltır- ve bu yolla da kuantum mekaniği ile genel göreliliği başarılı bir şekilde birleştirir. Bununla birlikte, çok küçülmüş uzay-zaman titreşimleri hâlâ varlıklarını sürdürürler (Şekil 12.2'de sondan bir önceki büyütme düzeyinde görüldüğü gibi) ve biz de bunların içinde uzay-zamana ilişkin önemli ipuçları bulabiliriz.

Birincisi, düşüncelerimize hâkim olan ve denklemlerimizi destekleyen, bilindik uzay ve zamanın bir tür ortalama alma süreci sonucunda ortaya çıktığını anlarız. Televizyon ekranına birkaç santimetre uzaktan baktığınızda gördüğünüz piksellere ayrılmış görünüyü düşünün. Bu görüntü, daha uzaktan baktığınızda gördüğünüz görüntüden çok farklıdır çünkü artık bir kere tek tek pikselleri ayıramamaya başladığınızda, gözleriniz bunları daha pürüzsüz görünen ortalama bir görüntü olarak algılar. Ama dik-

kat ederseniz, bilindik, sürekli görüntü bir ortalama alma süreci sonucunda gerçekleşmiştir. Benzer şekilde uzay-zamanın mikroskobik yapısı rasgele salınımlarla delik deşik bir yapıdadır ama uzay-zamanı böylesi minik ölçeklerde çözümleme yeteneğine sahip olmadığımız için bunun doğrudan farkına varmayız. Gözlerimiz ve hatta en güçlü araçlarımız bile bu salınımları tıpkı televizyon piksellerinde olduğu gibi birleştirerek ortalamasını alır. Bu salınımlar rasgele olduğundan, küçük bir bölgede "yukarı" yöndeki salınımlar kadar "aşağı" yönde de salınımlar vardır, o nedenle ortalama alındığında birbirlerini yok ederler ve ortaya sakın bir uzay-zaman çıkar. Ama televizyon benzetmesinde olduğu gibi, *sakin bir uzay-zaman görüntüsü ancak bir ortalama alma süreci sonucunda elde edilir*. Kuantum ortalaması, bilindik uzay-zamanın bir yansıma olabileceğini ileri sürmenin dünyasal bir yorumunu ortaya koyar. Ortalamalar pek çok bakımdan faydalıdır ama yapıları gereği görüntüyü oluşturan ayrıntıları ortaya koymazlar. Her ne kadar bir Amerikan ailesindeki ortalama çocuk sayısı 2,2 ise de, böyle bir aile bulmanızı istesem, zor durumda kalırsınız. Her ne kadar ulusal düzeyde bir galon sütün fiyatı ortalama olarak 2783 dolar ise de, sütü tam bu fiyata satan bir market bulmanız olanaksızdır. Bu durumda kendisi de bir ortalama alma sürecinin ürünü olan uzay-zaman da "temel" olarak adlandırmak isteyeceğimiz bir şeyin ayrıntılarını tanımlamıyor olabilir. Uzay ve zaman evreni en alt mikroskobik ölçeklerin dışında çözümlemek için son derece faydalı, yaklaşık ve bileşik kavramlar olabilir ama yine de 2.2 çocuklu bir aile kadar yanıltıcı olabilirler.

İkinci ve bununla ilgili bir görüş, küçülen ölçeklerde gittikçe artan kuantum titreşimlerinin, uzaklıkları ve süreleri daha küçük parçalara bölme kavramının Planck uzunluğu (10^{-33} cm) ve Planck zamanı (10^{-43} saniye) civarlarında sona erdiğini belirtiyor olmasıdır. Bu fikirle, her ne kadar bu kavram bilindik uzay ve zaman algımızla ters düşüyorsa da, sıradan kavramlara ilişkin bir özelliğin mikro ölçeğe indirgendiğinde varlığını sürdüremesinin özel olarak şaşırtıcı olmadığını vurguladığımız, Bölüm

12'de karşılaşmıştık. Uzayla zamanın keyfi olarak bölünmesi, en bilindik ve sıradan özelliklerinden biri olduğu için, bu kavramın en küçük ölçeklere uygulanamaması, mikro-derinliklerde bir başka şeyin -uzay-zamanın iç yapısı diyebileceğimiz bir şeyin- bilindik uzay-zaman kavramının dönüştüğü bir varlığın bulunduğu yolunda ipuçları verir. Bu temel bileşenin, uzay-zamanın bu en ilksel maddesinin daha küçük parçalara bölünmeye izin vermesini beklemiyoruz çünkü karşımıza eninde sonunda çıkacak olan çok şiddetli dalgalanmalar nedeniyle bu, doğrudan deneyimlerimizden bildiğimiz büyük ölçekli uzay-zaman gibi değildir. Bu nedenle, uzay-zamanın temel bileşenlerinin -her ne iseler- görünüşleri, bildiğimiz uzay-zamanı ortaya çıkaran ortalama alma süreçleri tarafından değiştiriliyor olma olasılığı yüksekmış gibi görünüyor.

Bu yüzden bildiğimiz uzay-zamanı doğanın en derin yasalarının içinde aramak, Beethoven'ın Dokuzuncu Senfoni'sini tek tek notalara bakarak veya Monet'in ünlü tablolarından birini tek tek fırça darbelerinden anlamaya çalışmaya benzer. En temel düzeyde kendisine benzeyen hiçbir şey var olmadığı için, doğanın uzay-zaman bütünü de insanın ifade yeteneğinin bu sıradışı eserleri gibidir.

Çevirideki Geometri

Fizikçilerin *geometrik ikilik (dualite)* olarak nitelediği bir başka görüş, uzay-zamanın temel olmayabileceğini ileri sürer ama bunu çok farklı bir bakış açısından yapar. Tanımı, kuantum ortalama alma sürecinden biraz daha teknik olduğu için, eğer bu alt-bölümde anlatılanlar size biraz ağır gelirse atlamakta duraksamayın. Ama pek çok araştırmacı burada anlatılanları sicim kuramının en simgesel özellikleri arasında saydıkları için, bu fikirlerin özünü anlamaya çalışmakta yarar var.

Bölüm 13'te farklı oldukları ileri sürülen beş sicim kuramı versiyonunun aslında nasıl aynı kuramın farklı çevirileri olduğunu görmüştük. Diğer şeylerin arasında bunun güçlü bir kavrayış olduğunu vurgulamıştık, çünkü çok zor problemler bile

doğru çevrildiklerinde son derece kolay çözülebilirler. Ama çeviri sözlüğünün, benim şu ana kadar anlatmayı göz ardı ettiğim, bu kuramları birleştirmek gibi bir özelliği de var. Nasıl bir sorunun zorluk derecesi bir sicim kuramından diğerine çevrildiğinde kökten bir biçimde değişiyorsa, uzay-zamanın geometrik biçiminin tanımı da değişir. Şöyle anlatayım:

Sicim kuramı bildiğimiz üç uzay boyutu ve bir zaman boyutundan fazlasını gerektirdiği için, Bölüm 12 ve 13'te bu fazladan boyutların nerede saklanıyor olabilecekleri konusuna yoğunlaşmıştık. Bulduğumuz cevap, bunların şimdiye kadar deneysel olarak saptayamayacağımız kadar küçük ölçüde kıvrılmış olabilecekleri yolundadır. Bildiğimiz büyük boyutlardaki fiziğin, fazladan boyutların kesin biçimine ve ölçülerine bağlı olduğunu, çünkü bunların geometrik özelliklerinin sicimlerin sergileyebileceği titreşim desenlerini etkileyebileceğini de bulmuştuk. Güzel. Şimdi de anlatmayı sonraya bıraktığım bölüme gelelim.

Bir sicim kuramında ifade edilen soruları başka bir sicim kuramında ifade edilen farklı sorulara çeviren sözlük *aynı zamanda ilk kuramdaki fazladan boyutların geometrisini ikinci kuramdaki farklı bir geometriye dönüştürür*. Eğer, örneğin fazladan boyutların belirli bir şekilde ve ölçüde kıvrılmış olduğu IIA Türündeki sicim kuramının fiziksel sonuçlarını inceliyorsanız, o zaman, ulaşabileceğiniz her sonuca, en azından ilke olarak, IIB Türündeki sicim kuramına uygun bir biçimde çevrilmiş soruları göz önüne alarak dil ulaşabilirsiniz. Ama çeviride kullanılacak sözlük, IIB Türündeki sicim kuramındaki fazladan boyutların IIA Türündeki kuram tarafından verilen biçime bağlı olmasını *-ama genel olarak ondan farklı olmasını-* gerektirir. Kısacası, kıvrılmış olan boyutları bir geometrik şekilde olan belirli bir sicim kuramı, fazladan boyutları *farklı* bir geometrik şekilde olan bir başka sicim kuramına eşdeğerdir; onun çevirisidir.

Ve uzay-zaman geometrisindeki farklar da küçük olmak zorunda değildir. Örneğin, eğer IIA Türünden sicim kuramındaki fazladan boyutlardan biri, Şekil 12.7'deki gibi bir çember şeklinde kıvrılmışsa, çeviri sözlüğü bunun, fazladan boyutla-

rından biri gene çember şeklinde ama bu sefer yarıçapı özgün çemberin yarıçapıyla *ters* orantılı olacak şekilde kıvrılmış olan IIB Türünden bir sicim kuramıyla eşdeğer olduğunu gösterir. Eğer çemberlerden biri çok küçükse diğeri çok büyüktür veya ters; ama bu iki geometriyi birbirinden ayırt etmenin kesinlikle hiçbir yolu yoktur. (Eğer uzunlukları Planck uzunluğunun katları olarak ifade edersek, çemberlerden birinin yarıçapı R ise, matematiksel sözlük diğeri $1/R$ olduğunu gösterir). Büyük ve küçük boyutları hemen ayırt edebileceğinizi düşünüyor olabilirsiniz ama sicim kuramında durum her zaman böyle değildir. Bütün gözlemler sicimlerin etkileşmelerinden kaynaklanır ve bu iki kuram, yani büyük çembersel boyutlu IIA Türü ve küçük çembersel boyutlu IIB Türü, aynı fiziğin yalnızca iki farklı çevirisi -farklı ifade biçimleri- olarak yorumlanabilir. Her ne kadar her iki kuramın dili ve yorumlama biçimi farklı olabilirse de, bir sicim kuramı içinde tanımladığınız bir gözlem diğeri sicim kuramında da alternatif ve aynı derecede uygulanabilir bir tanıma sahiptir. (Bunun olası olmasının nedeni, çembersel boyutta hareket eden sicimlerin iki farklı durumu olmasıdır: Tıpkı bir kola kutusunun etrafına sarılmış lastik bir bant gibi sicimlerin çemberin etrafına sarıldığı ve sicimin çemberin bir bölümünün içinde kaldığı ama ona sarılmadığı durumlar. İlk durumlarda enerji çemberin yarıçapı ile *orantılıdır* [yarıçap büyüdükçe sarılmış olan sicimler daha fazla gerilirler, bu nedenle de daha fazla enerji barındırırlar], ikinci durumlarda ise enerji çemberin yarıçapı ile *ters orantılıdır* [yarıçap küçüldükçe sicimler daha dar bir alana sıkışır ve kuantum belirsizliği nedeniyle daha enerjik bir biçimde hareket ederler]. Dikkat edilirse özgün çember diğeri ile aynı zamanda "sarılmış" sicimler "sarılmamış" olanlarla değiştirildiğinde fiziksel enerjiler -ve görünüşe bakılırsa genel olarak fizik- etkilenmiyor. IIA Türü kuramı IIB Türünde kurama çeviren sözlüğün gerektirdiği ve görünüşe göre iki farklı geometrinin -büyük ve küçük çembersel boyutlar- eşdeğer olmasının nedeni de tam olarak budur.)

Çembersel boyutlar Bölüm 12 de anlatılan daha karmaşık Calabi-Yau şekilleriyle değiştirildiğinde de benzer bir durum söz konusudur. Fazladan boyutları belirli bir Calabi-Yau şeklinde kıvrılmış olan bir sicim kuramı bu sözlük tarafından fazladan boyutları farklı bir Calabi-Yau şekli biçiminde (özgün şeklin *aynası* veya *dual* olarak adlandırılır) kıvrılmış olan farklı bir sicim kuramına çevrilebilir. Bu durumlarda Calabi-Yau'ların yalnızca boyutları değişmekle kalmaz, deliklerinin sayısı ve şekli de içinde olmak üzere şekilleri de değişir. Ama çeviri sözlüğü bunların doğru biçimde değişmelerini sağlar öyle ki, her ne kadar fazladan boyutların büyüklüğü ve şekilleri farklı da olsa, her kuram sonucunda ortaya çıkan fizik tam olarak aynı kalır. (Verilen bir Calabi-Yau şeklinde iki tür delik vardır ama öyle görünüyor ki sicim titreşim desenleri -ve dolayısıyla bunların fiziksel sonuçları- yalnızca her şekildeki delik sayısının *farkına* duyarlı. Yani eğer bir Calabi-Yau nun ilk türden iki deliği ve ikinci türden beş deliği; bir diğer Calabi-Yau'nunsa ilk türden beş, ikinci türden iki deliği varsa, o zaman her ne kadar bunlar geometrik şekil olarak birbirlerinden farklı da olsalar, fizik olarak aynı sonuçları verirler.*

Bir başka bakış açısına göre bu, uzayın temel bir kavram olmadığı yönündeki kuşkuyu destekliyor. Evreni beş sicim kuramından biriyle tanımlayan biri, fazladan boyutlar da içinde olmak üzere uzayın belirli bir şekli ve büyüklüğü olduğunu öne sürerken, sicim kuramlarından bir başkasını kullanan biri ise fazladan boyutlar da içinde olmak üzere evrenin şekil ve büyüklüğünün farklı olduğunu ileri sürecektir. Her iki gözlemci de aynı *fiziksel* evrenin farklı *matematiksel* tanımlamalarını kullandıkları için birinin doğru, diğerininse yanlış olması söz konusu değildir. Uzay -şekli ve büyüklüğü- konusunda farklı sonuçlara ulaşmış olsalar bile ikisi de doğrudur. Dikkat edilirse bunun nedeni özel görelilikte olduğu gibi uzay-zamanın farklı ama

* Hem çemberlerin hem de Calabi-Yau şekillerinin geometrik dualitelerinin ayrıntıları için *Evrenin Zarafeti*, Bölüm 10'a bakınız.

aynı derecede geçerli yollarla dilimlenmesi değildir. Bu iki gözlemci uzay-zamanın genel yapısının kendisi üzerinde anlaşmazlığa düşerler. Konunun özü de budur. Eğer uzay-zaman gerçekten temel olsaydı, çoğu fizikçi bakış açısından bağımsız olarak kullandıkları dilden ya da kuramdan bağımsız olarak herkesin uzay-zamanın geometrik özellikleri konusunda fikir birliği içinde olmalarını beklerdi. Ama en azından sicim kuramı içinde durumun böyle olması gerekmediği gerçeği, uzay-zamanın ikincil bir olgu olabileceğini ima eder.

Bu nedenle şunu sormamız gerekli olur: Eğer son iki altbölümdeki ipuçları bizi doğru yönlendiriyorsa ve bildiğimiz uzay-zaman çok daha temel bir başka varlığın büyük ölçekli, farklı bir görünümü ise acaba o varlık nedir ve temel özellikleri nelerdir? Bugün için bunu kimse bilmiyor. Ama cevapları ararken araştırmacılar başka ipuçları da buldular. Bunların en önemlisi kara delikleri düşünürken ortaya çıktı.

Kara Deliklerdeki Entropinin Nedeni

Kara delikler evrendeki en anlamlı pokerci suratlarına sahiptirler. Dışarıdan bakıldığında olabilecek en basit şeyler gibi görünürler. Kara deliklerin ayırıcı üç özelliği kütlesi (ki ne kadar büyük olduğunu -merkezinden olay ufkuna, ışığın bile geri denemediği yüzeye kadar olan uzaklık- belirler), elektrik yükü ve dönme hızıdır. Hepsi bu. Kara deliklerin evrene göstedikleri yüze daha yakından bakarak elde edilebilecek başka bir ayrıntı yoktur. Fizikçiler bunu "Kara deliklerin saçı yoktur" deyişiy-le özetlerler ki bunun anlamı bireyselleştirmeye uygun ayrıntılı özelliklerinin olmadığıdır. Eğer belirli bir kütleyle sahip bir kara delik görmüşseniz (aslında kara delikler kara olduklarından bu bilgileri de çevrelerindeki gaz ve yıldızların üzerindeki etkilerinden, dolaylı olarak anlamışsınızdır) kesinlikle hepsini görmüşsünüz demektir.

Yine de taşsı görüşlerinin ardında kara delikler evrenin şu ana kadar bildiği en büyük kargaşa kaynaklarını barındırırlar. Verilen bir büyüklükte ve *herhangi* bir yapıdaki fiziksel sistem-

ler arasında kara delikler olabilecek en yüksek entropiye sahiptirler. Bölüm 6'dan bunun hakkında düşünmenin genel bir yolunun, doğrudan cismin iç yapıtaşları arasında dış görünüşünü değiştirmeden yapılabilecek yeniden düzenlemelerin ölçüsü olan entropi tanımından geldiğini hatırlayın. Kara deliklere gelince, iç bileşenlerinin ne olduğunu tam olarak bilemesek de -çünkü kara deliğin merkezinde madde ezilirken neler olduğunu tam bilmiyoruz- tıpkı sayfalarının yeniden düzenlenmesinin *Savaş ve Barış* ın ağırlığına bir etkisi olmaması gibi, bu bileşenlerin yeniden düzenlenmesinin kara deliğin kütlesine, elektrik yüküne ve dönme hızına bir etkisi olmayacağını büyük bir güvenle söyleyebiliriz. Kütle, elektrik yükü ve dönme, kara deliğin dış dünyaya gösterdiği yüzü tümüyle belirlediği için, tüm bu değişiklikler fark edilemez olarak kalır ve kara deliklerin en büyük entropiye sahip olduklarını söyleyebiliriz.

Bu durumda bile kara deliğin entropisini artırmanın basit bir yolunu şöyle ileri sürebilirsiniz. Verilen bir kara delikle aynı büyüklükte içi boş bir küre yapın ve gazla doldurun (hidrojen, helyum, karbondioksit veya her ne ise). Gaz kürenin içine yayılacaktır. Daha fazla bileşen daha büyük yeniden düzenlenme sayısı anlamına geldiğinden, ne kadar fazla gaz pompalarsanız entropi de o kadar artacaktır. Tahmin edebileceğiniz gibi, siz gaz pompalamayı sürdürdükçe entropi de sürekli olarak artacak ve sonunda kara deliğin entropisini geçecektir. Bu zekice bir stratejidir ama genel görelilik bize bunun başarısız olacağını söyler. Siz gaz pompalamayı sürdürdükçe kürenin içindeki gazın da kütlesi giderek artar. Siz henüz aynı kütledeki bir kara deliğin entropisine ulaşmadan kürenin içindeki gazın kütlesi kritik eşiği aşar ve küre ile içindeki gazın bir *kara deliğe dönüşmesine* neden olur. Bunu değiştirmenin hiçbir yolu yoktur. Kara delikler en yüksek entropi konusunda tekeli ellerinde bulundurulur.

Eğer kara deliğin kendisine gaz pompalamayı sürdürerek entropiyi daha fazla artırırsanız ne olur? Entropi gerçekten artmaya devam edecektir ama siz oyunun kurallarını değiştirmiş olursunuz. Madde kara deliğin aç olay ufkuna ulaştığında yalnızca

kara deliğin entropisi artmakla kalmaz, *boyutları da büyür*. Kara deliğin boyutları kütlesiyle orantılıdır, dolayısıyla siz kara deliğe daha fazla madde gönderdikçe onun hem boyutu hem de kütlesi artar. Bu nedenle, bir kara delik yaratarak uzayın bir bölgesindeki entropiyi en yüksek düzeye çıkarmışsanız, bu bölgede entropiyi daha da artırma yolundaki herhangi bir çaba başarısızlığa uğrayacaktır. O bölge daha fazla düzensizliği kaldıramaz. Entropi bakımından doyuma ulaşmıştır. Ne yaparsanız yapın, ister gaz pompalayın, isterseniz bir Hummer'la çarpın, kara deliğin büyümesine ve daha geniş bir uzay parçasını kaplamasına neden olursunuz. Bu yüzden bir kara deliğin içerdiği entropi bize yalnızca kara deliğin temel bir özelliğini anlatmakla kalmaz, uzayın kendisi hakkında da temel bir şey söyler: *Uzayın bir bölgesinde-uzayın herhangi bir bölgesinde, herhangi bir yerde, herhangi bir zamanda- oluşturulacak en büyük entropi, boyutları söz konusu uzay bölgesinin boyutları ile aynı olan bir kara deliğin taşıdığı entropiye eşittir.*

Peki, verilen boyuttaki bir kara delik ne kadar entropi içerebilir? İşlerin ilginçleşmeye başladığı yer, burası. Sezgisel olarak mantık yürütüp göz önünde daha rahat canlandırılabilir bir şeyle, bir kapla işe başlayalım. Eğer böyle iki kabı birleştirirseniz, toplam hacim ve hava molekülü sayısı iki katına çıkar ve entropinin de iki katına çıkacağını tahmin edersiniz. Ayrıntılı araştırmalar bu sonucu doğruluyor¹ ve diğer her şey aynı kalmak koşuluyla (sıcaklık, yoğunluk vb.) fiziksel sistemlerin entropilerinin hacimleriyle doğru orantılı olduğunu gösteriyor. Doğal bir diğer tahmin ise bunun, daha az bilinen şeylere, örneğin kara deliklere de uygulanabileceğini düşünmektir ki, bu da bizi kara deliklerin entropisinin hacimleriyle doğru orantılı olduğu fikrine götürür.

Ama 1970'lerde Jacob Bekenstein ve Stephen Hawking bunun doğru olmadığını buldular. Onların yaptıkları matematiksel çözümler entropinin bir kara deliğin hacmiyle değil, olay ufkunun *alanıyla*, kabaca söylemek gerekirse yüzey alanıyla orantılı olduğunu gösterdi. Bu çok farklı bir sonuçtur. Bir kara deliğin yarıçapı iki katına çıkarsa hacmi 8 (2^3) kat artarken

yüzey alanı 4 (2^2) artar; yarıçapı yüz katına çıktığında hacmi bir milyon (100^3) kat artarken yüzey alanı 10.000 (100^2) kat artar. Büyük kara deliklerin hacmi yüzey alanlarından çok daha fazladır.² Bu yüzden kara delikler verilen boyuttaki şeyler içinde en yüksek entropiye sahip olsalar bile, Bekenstein ve Hawking, bunların entropisinin bizim tahmin ettiğimizin çok altında olduğunu gösterdi.

Entropinin yüzey alanıyla orantılı olması yalnızca kara deliklerle kaplar arasında not edeceğimiz ve hızla konuyu değiştireceğimiz, ilgi çekici bir ayrım değildir. Kara deliklerin uzayın bir bölgesine ilkesel de olsa sığdırılabilecek entropiye bir sınır getirdiğini görmüştük: Söz konusu uzay bölgesiyle aynı boyutlara sahip bir kara delik alın, ne kadar entropi içerdiğini bulun, işte bu, o bölgeye sığdırılabilecek entropi miktarının mutlak sınırıdır. Bu entropi, Bekenstein ve Hawking'in çalışmalarının gösterdiği gibi, kara deliğin yüzey alanıyla -aynı boyutta olabilecekleri için bu, bölgenin yüzey alanına eşittir- orantılı olacağı için, verilen bir uzay bölgesinin sahip olabileceği en fazla entropinin, *bölgenin yüzey* alanıyla orantılı olduğu sonucuna ulaşırız.³

Bu sonuçla kapta kapalı kalan havayı düşünerek bulduğumuz sonuç (orada entropinin kabın yüzey alanıyla değil, *hacmiyle* orantılı olduğunu bulmuştuk) arasındaki uyumsuzluk kolayca belirlenebilir: Havanın düzgün bir biçimde dağıldığını varsaydığımız için kap yaklaşımında kütleçekimi göz ardı edilmişti. Hatırlarsanız, kütleçekiminin maddenin kümelenmesi yönünde katkısı vardır. Düşük yoğunluklar söz konusu olduğunda kütleçekimini göz ardı etmenin bir sakıncası yoktur, ama eğer büyük entropileri, yüksek yoğunlukları göz önüne alıyorsanız kütleçekimi önemlidir ve bu nedenle kap yaklaşımı artık geçerli olmaz. Bunun yerine böylesi uç koşullar Bekenstein ve Hawking'in kütleçekimine dayanan hesaplarını gerektirirler ki bu durumda bir uzay bölgesinin en büyük entropi potansiyeli, bölgenin hacmiyle değil yüzey alanıyla orantılıdır.

Tamam, ama neden buna dikkat etmemiz gerekiyor? Bunun iki nedeni var.

Birincisi, entropi sınırı, mikroskobik ötesi uzayın atomize bir yapıya sahip olduğu yolunda bir başka ipucu veriyor. Ayrıntılar şöyle: Bekenstein ve Hawking eğer bir kara deliğin olay ufku üzerine her karesinin boyutları bir Planck uzunluğu olan (böylece her "Planck karenin" alanı yaklaşık 10^{-66} cm² olur) satranç tahtası biçiminde bir desen çizdiğinizi varsayarsanız, o zâman kara deliğin entropisinin, yüzeyine sığacak kare sayısına eşit olacağını buldular.⁴ Bu sonucun güçlü bir şekilde işaret ettiği ipuçlarını fark etmemek zordur: Her Planck kare en küçük, temel bir uzay birimidir ve her biri en küçük, tek bir entropi birimi taşır. Buradan da bir planck karenin *içinde*, ilke olarak da olsa, yer alabilecek hiçbir şey yoktur çünkü böyle herhangi bir etkinlik düzensizliği destekleyebilir ve böylece her kare Bekenstein ve Hawking'in bulunduğu tek entropi biriminden daha tazlasını içerebilir. Bu durumda, bir kere daha, tümüyle farklı bir bakış açısından elementsel uzay varlığı kavramına ulaşıyoruz.⁵

İkincisi, bir fizikçi için uzayın belirli bir bölgesinde bulunacak entropinin üst sınırı kavramı kritik, neredeyse kutsal bir büyüklüktür. Bunun nedenini anlamak için, davranışsal bir psikiyatrisi adına çalıştığınızı varsayın, işiniz de son derece hiperaktif çocuk grupları arasındaki etkileşmelerin anlık ayrıntılı kayıtlarını tutmak olsun. Her gün o günkü grubun iyi davranması için dua ediyorsunuz çünkü ne kadar karmaşa yaratırlarsa sizin işiniz de o kadar zorlaşıyor. Bunun nedeni son derece açık olmasına rağmen net bir biçimde ifade etmekte yarar var: Çocuklar ne kadar düzensiz olurlarsa sizin de o kadar çok şeyin kaydını tutmanız gerekir. Evren de bir fizikçiye hemen hemen aynı problemi sunar. Temel bir fizik kuramı, verilen bir uzay bölgesinde süregiden, ya da ilke olarak da olsa süregidebilecek olan her olayı tanımlamayı amaçlar. Tıpkı çocuklarda olduğu gibi, bir bölge ne kadar çok düzensizlik içerirse -ilke olarak da olsa- kuramın izleyebilmesi gereken o kadar çok şey olur. Bu nedenle bir bölgenin içerebileceği en büyük entropi belirleyici bir turnusol kâğıdı testidir: Fizikçiler gerçekten temel olan bir kuramın, ve-

rilen bir uzay bölgesi için en büyük entropiyle uyumlu olmasını beklerler. Kuram doğayla o kadar büyük bir uyum içinde olmalıdır ki, düzensizliği izlemek için en büyük kapasitesi, bir bölgenin içerebileceği en büyük düzensizliğe *tam olarak* eşit olmalıdır, az ya da fazla değil.

Önemli nokta, eğer kap sonucu sınırsız geçerliliğe sahip olmuş olsaydı, temel bir kuramın herhangi bir bölgenin hacmindeki düzensizlik miktarını açıklayabilecek kapasitesi olmasının gerekmesidir. Ama kütleçekimi işin içine katıldığında bu düşünüş biçimi başarısızlığa uğradığı için - ve temel kuramın kütleçekimini kapsaması gerektiği için- temel bir kuramın bir bölgenin yalnızca yüzey alanındaki düzensizlikleri açıklayabilmesi gerektiğini öğreniyoruz. Birkaç paragraf önce bazı sayısal örneklerle açıkladığımız gibi, büyük bölgeler için bu ikincisi, öncekinden çok daha küçüktür.

Bu nedenle Bekenstein ve Hawking'in buldukları sonuç, bize kütleçekimini kapsayan bir kuramın, bir anlamda kapsamayan bir kuramdan daha basit olduğunu söyler. Kuramın tanımlamak zorunda olduğu daha az "özgürlük derecesi" -yani değişebilecek, dolayısı ile düzensizliğe katkıda bulunacak daha az şey vardır. Bu kendi başına ilginç bir kavrayış olmakla birlikte eğer bu düşünce biçimini bir adım ileri götürürsek, bize son derece olağandışı, fantastik bir şey anlatır. Eğer verilen bir uzay bölgesindeki en büyük entropi bölgenin hacmiyle değil de yüzey alanıyla orantılı ise, o zaman belki de gerçek, temel özgürlük dereceleri -düzensizliğe yol açma potansiyeli taşıyan nitelikler- *aslında bölgenin hacminin içinde değil, yüzeyinde bulunurlar*. Belki de evrendeki gerçek fiziksel süreçler çevremizi sarmalayan ince, uzak bir yüzeyde olup bitiyor ve bütün gördüğümüz ve yaşadığımız bu süreçlerin yansımaları olabilir. Yani belki de evren bir tür holograma benziyor olabilir.

Bu garip bir düşüncedir ama birazdan inceleyeceğimiz gibi, son zamanlarda epeyce destek bulmuştur.

Evren Bir Hologram mı?

Hologram şekil verilmiş iki boyutlu bir plastik parçasıdır. Uygun bir lazer ışını ile aydınlatıldığında üç boyutlu bir görüntü verir.⁶ 1990'ların başında Nobel ödüllü Hollandalı Gerard t'Hooft ve sicim kuramının yaratıcılarından Leonard Susskind, evrenin kendisinin holograma benzer bir şekilde işliyor olabileceğini öne sürdüler. Gündelik hayatta gözlediğimiz üç boyutlu geliş-gidişlerin uzak, iki boyutlu bir yüzey üzerinde yer alan fiziksel süreçlerin holograf benzeri izdüşümleri olabileceği yönünde şaşırtıcı bir fikir ortaya attılar. Bu yeni ve kulağa garip gelen bakış açısına göre, bizler ve yaptığımız veya gördüğümüz her şey holograf görüntülerine benziyor. Platon ortak algıları yalnızca gerçekliğin gölgeleri olarak yorumlarken holograf ilkesi de benzer bir yapı sergiler ama benzetmeyi tersine çevirir. Gölgeler - yassı yapıları nedeniyle ancak daha düşük boyutlu yüzeylerde hayat bulan şeyler- gerçektir, ama çok daha zengin yapıları gibi duran, daha yüksek boyutlu varlıklar (bizler; çevremizdeki dünya) yalnızca gölgelerin uçucu izdüşümleridir.*

Yine, son derece acayip bir fikir olmakla ve uzay-zamanın son kavrayışındaki rolü açıklıktan uzak olmakla birlikte, 't Hooft ve Susskind'in *holografik ilke* olarak bilinen ilkelerinin temeli güçlüdür. Çünkü son bölümde incelediğimiz gibi, uzayın bir bölümünün içerebileceği en büyük entropi, içinin hacmiyle değil, yüzeyinin alanıyla orantılıdır. O zaman evrenin en temel bileşenlerinin, en temel özgürlük derecelerinin -*Savaş ve Barış* in sayfalarının kitabın entropisini gösterebilmesi gibi evrenin entropisini gösteren varlıklar- evrenin içinde değil, onu çevreleyen yüzeyde bulunacağını tahmin etmek son derece doğaldır. Evrenin "hacminde" yaşadıklarımız -fizikçilerin *genel* olarak adlandırdığı şeyler- tıpkı holografik bir resimde gördüklerimizin çevrele-

* Eğer Platon u yeniden okumaya gönülsünüzseniz, zar dünyalar senaryosu holografın, gölgelerin gerisin geriye yerlerine konduğu bir türünü verir. Dört uzay boyutuna sahip bir bölgeyi çevreleyen bir üç-zar yüzeyinde yaşadığımızı varsayın (elmanın üç boyutlu içini çevreleyen iki boyutlu kabuğuna benzer bir şekilde). Bu durumda holograf ilkesi bizim üç boyutlu algılarımızın bizim zarımızla çevrelenen bölgede yer alan dört boyutlu fiziğin gölgesi olduğunu söyler.

yen bir plastik parçası üzerine kazınmış olan bilgi tarafından belirlenmesi gibi, evreni çevreleyen yüzeyde olup bitenler tarafından belirlenir. Fizik yasaları evrenin lazeri gibi çalışarak evrendeki gerçek süreçleri -ince ve uzak bir yüzeyde yer alan süreçleri- aydınlatır ve gündelik hayatımızın holografik yanılsamalarını üretir.

Bu holografik ilkenin gerçek dünyada nasıl gerçekleştiğini henüz çözemedik. Problemlerden biri, bildiğimiz tanımlarda evrenin ya sonsuza kadar yaşaması ya da bir küre gibi veya bir video oyun ekranı gibi kendi üzerine kapanmasıdır (Bölüm 8'de olduğu gibi) ki bu durumda evren kendisini sınırlayan bir yüzeye sahip değildir. O zaman, ileri sürülen bu "çevreleyen holografik yüzey" nereye yerleştirilebilir? Üstelik fiziksel süreçler hemen burada, evrenin derinliklerinde bizim kontrolümüz altındaymış gibi duruyor. Yerleştirilmesi zor bir yüzey üzerindeki bir şey, bir şekilde burada olup-bitenleri kontrol ediyormuş gibi görünmüyor. Acaba holografi ilkesi kontrol ve bağımsızlık duygusunun düşsel olduğunu mu söylüyor? Ya da holografiiyi, birinin burada işleyen bilindik, temel yasalar (ki önsezi ve algılara uygundur) veya temel fiziğin evreni çevreleyen bir tür yüzey üzerinde gerçekleştiği, her ikisi de aynı derecede geçerli iki durumdan birini seçebildiği, fizik temelinde değil, tat temelinde işleyen, eklemelenmiş bir tür ikilik (duality) olarak düşünmek daha mı iyi? Bunlar, henüz açıklığa kavuşmamış, temel sorulardır.

Ama 1997'de, daha önceki sicim kuramcılarının fikirlerinden yararlanan Arjantin li fizikçi Juan Maldacena bu konular üzerindeki düşünceleri dramatik bir biçimde ileriye götüren bir atılım yaptı. Maldacena'nın keşfi gerçek evrenimizde holografinin rolü sorusuyla doğrudan ilişkili değildir. O, fiziğin zamanla ödüllendiren modasına uygun olarak, holografideki soyut şeylerin matematik yoluyla somut ve kesin hale getirilebildiği varsayımsal bir bağlam -varsayımsal bir evren- buldu. Teknik nedenlerle Maldacena varsayımsal bir evreni, Şekil 8.6'daki patates diliminin daha yüksek boyutlu bir benzeri olan, birörnek negatif eğriliğe sahip, dört büyük uzay boyutuna ve bir zaman bo-

yutu bulunan bir evreni inceledi. Standart matematiksel çözümleme bu beş boyutlu uzay-zamanı çevreleyen yüzeyin', çevreleyen bütün yüzeylerde olduğu gibi, çevrelediği şekilden bir düşük sayıda boyutu olması gerektiğini gösterir: Uç uzay boyutu ve bir zaman boyutu. (Yüksek boyutlu uzayları göz önünde canlandırmak her zaman zordur, onun için mutlaka zihinsel bir resim isterseniz, bir kutu domates suyu konservesini gözünüzde canlandırabilirsiniz; üç boyutlu domates suyu beş boyutlu uzay-zamana, kutunun iki boyutlu yüzeyi ise hacmi çevreleyen dört-boyutlu uzay-zaman sınırına benzer.) Sicim kuramının istediği fazladan kıvrılmış boyutları da ekledikten sonra Maldacena, son derece inandırıcı bir şekilde, bu evrende yaşayan bir gözlemcinin tanık olduğu fiziğin ("domates suyundaki" gözlemci) evreni çevreleyen yüzeyde olup-biten fizikle (kutunun yüzeyindeki fizik) tanımlanabileceğini gözler önüne serdi.

Her ne kadar gerçekçi olmasa da, bu çalışma, holografî ilkesinin gerçekleştirildiği elle tutulur ve matematiksel olarak izlenebilir olan ilk örneği oluşturuyordu.⁸ Bunu yaparken de bütün evrene uygulanan holografî kavramına ışık tutmuştu. Örneğin, Maldacena'nın çalışmasında hacim kavramı ve çevreleyen sınır yüzey kavramı mutlak bir biçimde eşittir. Biri birincil, diğeri ikincil değildir. Beş sicim kuramı arasındaki ilişkinin özüne çok benzer şekilde hacim ve çevreleyen sınır yüzey kuramları birbirinin çevirisi gibidir. Bu özel çevirinin olağandışı özelliği ise hacim kuramının çevreleyen yüzeyde tanımlanan eşdeğer kuramdan daha fazla boyuta sahip olmasıdır. Üstelik hacim kuramı kütleçekimini içerirken (Maldacena bunu sicim kuramı kullanarak formülleştirmişti) hesaplamalar, çevreleyen yüzeydeki kuramın kütleçekimini içermediğini gösteriyor. Yine de bu kuramlardan birinde sorulan bir soru veya yapılan bir hesap, diğerkindeki eşdeğer bir soruya veya hesaba çevrilebilir. Çeviri sözlüğünden habersiz olan biri, bu soruların ve hesapların diğerkleriyle kesin olarak hiçbir ilişkisi olmadığını düşünse de (örneğin çevreleyen sınır yüzey kuramı kütleçekimini içermediğinden, hacim kuramındaki kütleçekimiyle ilgili sorular yüzey ku-

ramında kulağa çok farklı gelen, kütleçekimi içermeyen sorulara dönüşürler). Her iki kuramın dilini de bilen biri -her iki kuramda da uzman olan biri- bunların ilişkisini fark eder ve karşılıklı gelen sorularla yine karşılıklı gelen hesapların sonuçlarının uyuşması gerektiğini anlar. Gerçekten de şimdiye kadar yapılan bütün hesaplar uyuşmuştur ve bu durumu destekleyen çok sayıda örnek vardır.

Bütün bunların ayrıntılarını tam olarak kavramak zordur ama ana nokta çok açıktır. Maldacena'nın bulduğu sonuç hayranlık vericidir. Maldacena, sicim kuramı içinde holografinin gerçekleştirilmesinin varsayımsal olsa da sağlam bir yolunu bulmuştur. Kütleçekimi içermeyen belirli bir kuantum kuramının, kütleçekimini içeren ama bir fazla uzay boyutuyla formülleştirilen bir başka kuantum kuramının çevirisi olduğunu -ve ondan ayırlamaz olduğunu- bulmuştur. Bu görüşlerin gerçek evrene nasıl uygulanabileceğini bulmak için başlatılan yoğun araştırma programları varsa da teknik nedenlerden dolayı elde edilen ilerleme son derece yavaştır. (Maldacena verdiğimiz örneği, matematiksel olarak çözümleme kolaylığı nedeniyle seçmişti; daha gerçekçi örneklerle uğraşmak çok daha zordur.) Bununla birlikte artık sicim kuramının, en azından bazı bağlamlarda, holografî kavramını desteklediğini biliyoruz. Daha önce sözü edilen geometrik çeviriler durumunda olduğu gibi bu da uzay-zamanın temel olmadığı yolunda bir başka ipucu sağlar. Kuramın bir formülleştirilmesinden eşdeğerine çevirisi sırasında yalnızca uzay-zamanın büyüklüğü ve yapısı değişmekle kalmaz, aynı zamanda uzay boyutlarının *sayısı* da değişebilir.

Bu ipuçları giderek daha yoğun bir biçimde uzay-zamanın biçiminin, gerçekliğin temel bir ögesi olmaktan çok, fiziksel kuramın bir formülleştirilmesinden diğerine değişen ikincil bir ayrıntı olduğu sonucuna işaret ediyor. Tıpkı İngilizce'deki *cat* (kedi) sözcüğü İspanyolca karşılığı olan *gato* sözcüğüne çevrilirken harflerin sayısı, sesli ve sessiz harflerin sayısının değişmesi gibi, uzay-zamanın biçimi -şekli, büyüklüğü, hatta boyutlarının sayısı bile- çeviri sırasında değişir. Evren hakkında düşünmek için

belirli bir kuramı kullanan herhangi bir gözlemciye göre uzay gerçek ve son derece temel görünebilir. Ama eğer aynı gözlemci kullandığı kuramın bir fomülleştirilmesinden eşdeğer olan bir başkasına geçerse, bir zamanlar gerçek ve temel olarak görünen şeyler de zorunlu olarak değişir. Bu yüzden, eğer bu fikirler doğru ise -kuramcılar çok büyük miktarda destekleyen kanıtlar bulmuş olsalar da bu fikirlerin henüz kesin bir biçimde kanıtlanmamış olduğunu vurgulamam gerekir- uzay ve zamanın temel olma niteliğini zora sokuyorlar.

Burada sözü edilen ipuçları arasında holografi ilkesinin gelecekteki araştırmalarda baskın rolü üstleneceğini söyleyebilirim. Bu, sağlam kanıtlara dayandığı konusunda fizikçilerin üzerinde fikir birliğinde oldukları kara deliklerin temel bir özelliğinden -entropilerinden- kaynaklanıyor. Kuramların ayrıntıları değişiyor olsa bile, kütleçekiminin anlamlı bir tanımının kara deliklere yer vermesini bekleriz ve bu nedenle, bu tartışmanın itici öğesi olan entropi sınırları kalıcı olacak ve holografi uygulanacaktır. Sicim kuramının doğal olarak holografi ilkesiyle bütünleşmesi -en azından matematiksel çözümleme ile izlenebilen örneklerde- ilkenin geçerli oluşunu destekleyen bir başka güçlü kanıttır. Uzay ve zamanın temeli konusundaki araştırmaların bizi götürebileceği yerden ve dönemecin arkasında bizi bekleyen sicim/M kuramı konusundaki değişikliklerden bağımsız olarak holografinin kılavuzluk yapan bir kavram olarak kalmakta devam etmesini bekliyorum.

Uzay-Zamanın Bileşenleri

Bu kitap boyunca periyodik olarak uzay-zamanın mikroskobik ötesi bileşenlerini ima ettik ama her ne kadar bunların varlığı konusunda elimizde dolaylı kanıtlar varsa da, henüz bu bileşenlerin gerçekte ne olabilecekleri konusunda hiçbir şey söylemedik. Elbette bunun bir nedeni var. Çünkü bunların ne olduğu konusunda bizim de hiçbir fikrimiz yok. Veya belki de şöyle demeliyim: Uzay-zamanın temel bileşenlerini tanımaya gelince, gerçekten doğruluğuna güvendiğimiz hiçbir fikre sahip değiliz.

Bu, kavrayışımızdaki büyük bir boşluktur ama şimdi bu probleme tarihsel bağlamı içinde bakmakta yarar var.

Eğer ondokuzuncu yüzyıl sonlarında bilim insanları arasında maddenin temel bileşenlerinin ne olabileceği konusunda bir anket araştırması yapmış olsaydınız, evrensel bir fikir birliği olmadığını görürdünüz. Yalnızca bir yüzyıl önce atom hipotezi henüz tartışmalıydı; konuyu yanlış düşünen ünlü bilim insanları vardı, Ernst Mach da bunlardan biriydi. Üstelik atom hipotezinin yirminci yüzyıl başlarından sonra yaygın bir biçimde kabul görmeye başlamasından itibaren bilim insanları bu yapıyı çok daha temel olduğuna inanılan bileşenlerle güncellemeye devam ettiler (örneğin önce proton ve nötronlar, daha sonra kuarklar). Sicim kuramı bu yoldaki son adımdır ama henüz deneysel olarak doğrulanmadığı için (doğrulanmış olsa bile, geliştirilmeyi bekleyen, çok daha refine bir kuramın varlığını olanaksız kılmazdı) doğanın temel maddesel bileşenleri konusundaki araştırmaların sürdürüğünü belirtmemiz gerekir.

Uzay ve zamanın modern bilimsel bir bağlamda birleşmesi 1600'lerde Newton'a kadar gider, ama mikroskobik bileşimleri konusundaki ciddi olarak düşünölmeye başlaması için genel görelilik ve kuantum mekaniğinin yirminci yüzyıldaki keşiflerinin beklenmesi gerekti. Bundan ötürü, tarihsel zaman ölçeklerinde uzay-zamanı çözümlmeye henüz başlamış sayılırız, o yüzden "atomları" -uzay-zamanın en temel bileşenleri- konusunda tanımlayıcı önerilerin olmayışı konunun bir zayıflığı değildir. Sahip olduğumuz kadarını -uzay ve zamanın sağduyunun ötesinde birçok özelliğini ortaya çıkardık- elde etmiş olmamız, yüzyıl önce tahmin bile edilemeyecek bir ilerlemenin göstergesidir. Doğanın en temel bileşenleri konusundaki araştırma, madde olsun uzay-zaman olsun, bizi gelecekte de bir süre meşgul edecek olan zorlu bir uğraş olacaktır.

Uzay-zaman için, temel bileşen araştırmalarında şimdilik gelecek vadeden iki yön var. Önerilerden biri sicim kuramından, diğeri ise *halka kuantum kütleçekimi* adlı kuramdan geliyor.

Sicim kuramının önerisi, üzerinde ne kadar ciddi düşündüğünüze bağlı olarak ya sezgisel olarak hoşunuza gider veya ciddi bir düş kırıklığı yaratır. Uzay-zamanın "dokusu" hakkında konuştuğumuzdan, öneri tıpkı bir tişörtün ipliklerden dokunmuş olması gibi uzay-zamanın da sicimlerden dokunmuş olabileceğini söyler. Yani nasıl çok sayıda ipliği uygun bir biçimde bir araya getirmek tişörtün dokusunu ortaya çıkarıyorsa, çok sayıda sicimi uygun şekilde bir araya getirmek de genel olarak uzay-zamanın dokusu adını verdiğimiz şeyi ortaya çıkarıyor olabilir. O zaman madde, sizin ve benim gibi, bağlam içinde hareket eden, birbirlerine uzay-zaman sicimleri ile bağlanmış, titreşen sicimlerin bir kümelenmesine dönüşür; tıpkı biten bir gürültünün ardından başlayan zengin bir müzik veya düz bir malzeme üzerine işlenen ayrıntılı bir desen gibi.

Ben bunu çekici ve inandırıcı bir öneri olarak görüyorum ama henüz hiç kimse bu kelimeleri kesin matematiksel ifadelere dönüştüremedi. Görebildiğim kadarıyla bunun önündeki engeller pek küçük değil. Örneğin tişörtünüzün kumaşı tamamen sökülürse, elinizde bir iplik yığını kalır; bu sonuç çok gizemli olmasa bile bazen kafa karıştırıcı olabilir. Ama benzer bir durumu sicimlerle -uzay-zaman iplikçikleriyle- düşünmek beyni (en azından benim beynimi) epeyce zorluyor. Uzay-zamanın dokusundan sökülen veya daha uygun bir benzetmeyle uzay-zamanı oluşturmak için henüz bir araya getirilmemiş olan sicim "yığınıyla" ne yapılır? Bunları tişörtün iplikleri -bir araya getirilmesi gereken hammadde- olarak düşünme eğilimi olabilir ama bu, kesinlikle temel olan bir gizemli durumu hafife almak olur. Sicimleri uzayda ve zamanda titreşmekte olarak gözümüzde canlandırıyoruz ama sicimlerin kendilerinin birleşerek oluşturdukları varsayılan doku olmazsa, *uzay ve zaman yoktur*. Bu öneride, sayısız sicim bir araya gelip onları oluşturmadığı sürece uzay ve zaman kavramlarının anlamı yoktur.

Bu yüzden bu öneriyi anlamlandırmak için, sicimlerin önceden var olan uzay-zaman içinde titreşmekte olduklarını varsaymayan bir yapı gerekir. Sicim kuramının, uzay-zamanın sicimle-

rin ortak hareketleriyle ortaya çıktığı, tümünden uzaysız ve zamansız bir formülleşmesine ihtiyacımız var.

Her ne kadar bu amaca yönelik ilerlemeler varsa da, şu ana kadar hiç kimse, sicim kuramının uzayın ve zamanın önceden var olmadığı bir formülüyle -fizikçilerin *fondan bağımsız* formül (bu terim, uzay-zamanın, fiziksel olayların önünde yer aldığı bir fon olduğu yolundaki sağlam olmayan kavramdan geliyor) olarak adlandırdıkları formül- ortaya çıkmadı. Genelde bütün yaklaşımlar sicimleri kurama "elle" yerleştirilen uzay-zamanın içinde titreşmekte olarak alıyor; fizikçilerin fondan bağımsız bir yapıda olacağını varsaydıkları gibi, uzay-zaman kuramdan çıkmıyor, kurama kuramcının kendisi tarafından yerleştiriliyor. Birçok araştırmacı fondan bağımsız bir formülün geliştirilmesini sicim kuramının önündeki çözülmemiş tek problem olarak görüyorlar. Bu yalnızca uzay-zamanın kaynağı konusunda bir fikir vermekle kalmayacak, ama fondan bağımsız yapı Bölüm 12'nin sonunda karşılaştığımız, kuramın fazladan boyutların geometrik biçimini seçemiyor olması sorununa da bir çözüm getirecek. Mantık şöyle işliyor: Kuramın temel matematiksel formülleri bir kere özel bir uzay-zamandan bağımsız hale gelirse, sicim kuramı bütün olasılıkları araştırabilir ve belki de bu olasılıklar arasında bir karar verebilir.

"Uzay-zaman iplikçikleri olarak sicimler" önerisinin karşı karşıya kaldığı bir diğer güçlük, Bölüm 13'te öğrendiğimiz gibi sicim kuramının sicimlerin yanında başka bileşenleri de olmasıdır. Bu diğer bileşenler uzay-zamanın temel yapısında nasıl bir rol oynayabilir? Bu soru zar dünyalar senaryosuyla kesin bir biçimde rahatlatıcı bir çözüme kavuştu. Eğer yaşadığımız üç boyutlu uzay bir üç-zar ise, acaba zarın kendisi mi ayrışamaz yapıda yoksa kuramdaki diğer bileşenlerden mi oluşmakta? Örneğin zarlar sicimlerden mi oluşmakta yoksa zarlar ve sicimlerin her ikisi de temel yapıda mı? Eğer bir başka olasılığı gözönüne alırsak, acaba hem zarlar hem de sicimler daha temel başka yapıtaşlarından oluşuyor olabilir mi? Bu sorular modern araştırmanın ön saflarında yer alıyor ama bu son bölümün konusu ipuçları olduğu için çok dikkat çeken bir fikirden daha söz edeyim.

Daha önce, sicim/M-kuramında bulunan birçok zardan söz etmiştik: Bir-zarlar, iki-zarlar, üç-zarlar, dört-zarlar vb. Her ne kadar daha önce vurgulamamış olsam da kuramda aynı zamanda *sıfır-zarlar* da var ki, bunlar daha çok nokta parçacıklar gibi uzaysal uzanımları olmayan bileşenler. Bu, kuantum kütleçekiminin şiddetli titreşimlerini açıklamak için nokta-parçacık yapısından uzaklaşan sicim/M-kuramının tüm ruhuna aykırı gibi görünebilir. Ama sıfır-zarlar, tıpkı Şekil 13.2'deki akrabaları gibi, sicimler iştirilmiş olarak vardılar, dolayısı ile etkileşmeleri sicimler tarafından yönetilir. O zaman, beklenebileceği gibi, sıfır-zarlar bildiğimiz nokta-parçacıklardan çok farklı şekilde davranır ve en önemlisi de, mikroskobik ötesi uzay-zaman salınımlarının yayılması ve zayıflamasında rol üstlenirler; sıfır zarlar kuantum mekaniği ve genel göreliliğin birleştirilmesinde nokta parçacıkların yarattığı sorunları ortaya çıkarmazlar.

Gerçekten Rutgers Üniversitesi'nden Tom Banks ve Austin'deki Texas Üniversitesi'nden Willy Fischler, her ikisi de şimdi Stanford'da olan Leonard Susskind ve Stephen Shenker ile birlikte, sicim/M-kuramının, sıfır-zarların sicimler ve daha yüksek boyutlu zarlar oluşturmak üzere birleştirilebilen temel yapılar olduğu bir türünü formülleştirdiler. *Matris kuramı* olarak bilinen bu öneri- 'M-kuramı'ndaki M'nin bir başka olası anlamı- pek çok izleyen çalışmayı başlattı ama konunun zor matematiği bilim insanlarının bu araştırmaları tamamlamasını engelledi. Yine de fizikçilerin bu yapıda sürdürmeyi başardığı hesaplar öneriyi destekler gibi görünüyor. Eğer Matris kuramı doğruysa, bu herşeyin -sicimler, zarlar ve hatta uzay ve zamanın kendileri- uygun sıfır-zar yığınlarından oluşuyor olması anlamına gelebilir. Bu, heyecan verici bir bakış olup araştırmacılar gelecek birkaç yıldaki ilerlemenin bu kuramın geçerliliği konusunda çok ışık tutacağı konusunda ihtiyatlı bir iyimserliğe sahipler.

Şimdiye kadar uzay-zamanın bileşenlerini bulmaya çalışan sicim kuramcılarının izledikleri yolları araştırdık ama söz ettiğim gibi, sicim kuramının en önemli rakibi olan halka kuantum kütleçekiminden gelen ikinci bir yol daha var. Tarihi 1980'lerin or-

talarına kadar giden halka kuantum kütleçekimi, genel görelilik ve kuantum mekaniğini birleştirme konusunda ileri sürülen bir başka iddialı öneridir. Ayrıntılı bir tanımlamaya girişmeyeceğim (eğer ilgileniyorsanız, Lee Smolin'in *Three Roads to Quantum Gravity* adlı mükemmel kitabına bir göz atabilirsiniz) ama şu anda incelediğimiz konuyu aydınatabilecek birkaç önemli noktadan söz edeceğim.

Sicim kuramı ve halka kuantum kütleçekiminin her ikisi de, çok uzun süredir bulunmaya çalışılan kütleçekiminin kuantum kuramını elde ettiklerini öne sürerler ama bunu çok farklı yollarla yaparlar. Sicim kuramı on yıllar boyunca maddenin temel yapısını araştıran başarılı bir parçacık fiziği geleneğinden çıkmıştır; ilk dönem sicim araştırmacılarının çoğu için kütleçekimi, en iyi olasılıkla uzak, ikincil bir ilgi alanıdır. Halka kuantum kütleçekimi ise kaynağını tersine, genel görelilik kuramının çevresine çok iyi yerleşmiş olan bir gelenekten alır; bu yaklaşımı benimseyenlerin çoğu için kütleçekimi her zaman ana odak noktasıdır. Bunları tek bir cümleyle karşılaştırmak istersek, sicim kuramcılarını küçüklerle başlayıp (kuantum kuramı) ve büyüğe (kuotleçekimi) ulaşmaya çalışırken halka kuantum kütleçekimi kuramcılarını büyükle (kuotleçekimi) başlar ve küçüğe (kuantum kuramı) ulaşmaya çalışır.⁹ Aslında, Bölüm 13'te gördüğümüz gibi, sicim kuramı başlangıçta atom çekirdeği içinde işleyen güçlü nükleer kuvvetin kuantum kuramı olarak gelişti; kuramın kütleçekimini de kapsadığı sonradan fark edildi. Öte yandan halka kuantum kütleçekimi çıkış noktası olarak Einstein'ın genel görelliğini alır ve kuantum mekaniğini de açıklamanın yollarını arar.

Spektrumun zıt uçlarından yapılan bu başlangıçlar, iki kuramın gelişme yöntemlerine de yansımıştır. Bir dereceye kadar her birinin ana başarısı diğerinin başarısızlığı oldu. Örneğin sicim kuramı, her şeyi titreşen sicimler olarak tanımlayarak, kütleçekimi de dahil olmak üzere bütün kuvvetleri ve bütün maddeyi birleştirir (halka yaklaşımından kaçınan tam birleştirme). Kütleçekimi parçacığı, graviton özel bir titreşim desenidir ve bu yüzden kuram doğal olarak bu kütleçekimi element demetlerinin kuan-

tum mekaniğine özgü olarak nasıl hareket ettiğini ve etkileştiğini tanımlar. Bununla birlikte, söz etmiş olduğumuz gibi, sicim kuramının günümüzdeki asıl başarısızlığı, içinde sicimlerin hareket ettiği ve titreştiği uzay-zamanın varlığını arka plan olarak önceden varsaymasıdır. Tersine, halka kuantum kütleçekimi kuramının asıl başarısı -ki bu etkileyicidir- arka planda uzay-zamanı varsaymıyor olmasıdır. Halka kuantum kütleçekimi, arka plandan bağımsız bir yapıdır. Bununla birlikte büyük uzaklık ölçeklerine uygularken bu olağandışı ölçüde yabancı uzaysız/zamansız başlangıç noktasından bildiğimiz uzay ve zamanla birlikte genel göreliliğin bilindik ve başarılı özelliklerini çıkarmak (ki sicim kuramının günümüzdeki formülleriyle bu kolayca yapılır) araştırmacıların hâlâ çözmeye çalıştığı zor bir konudur. Üstelik Kalka kuantum kütleçekimi, sicim kuramıyla karşılaştırıldığında gravitonların dinamiğinin anlaşılması konusunda çok daha az ilerleme kaydetmiştir.

Uyumlu bir olasılık, sicim kuramcılarını ile halka kuantum kütleçekimi kuramcılarının çok farklı başlangıç noktalarından çıkarak aslında aynı kuramı kurmakta olmalarıdır. Her iki kuramın da halkalar içermesi -sicim kuramında bunlar sicim halkalarıdır; halka kuantum kütleçekiminde bunları matematiksel olmayan bir dille açıklamak daha zordur, ama kısaca bunlar uzay halkalarıdır- aralarında böyle bir bağlantının işareti olabilir. Bu olasılık, örneğin kara delik entropisi gibi her iki kuramın da uğraştığı problemlerde son derece uyumlu olmalarıyla da güçlenir.¹⁰ Ve uzay-zamanın bileşenleri konusuna gelince, her iki kuram da bir çeşit atomize yapı olduğunu ileri sürer. Bu sonuca işaret eden ve sicim kuramından kaynaklanan ipuçlarını görmüştük; halka kuantum kütleçekiminden kaynaklanan ipuçları daha da inandırıcıdır. Halka araştırmacıları halka kuantum kütleçekimindeki pek çok halkanın, tıpkı bir kazağı oluşturan ilmekler gibi iç içe geçmiş olabileceğini ve büyük ölçeklerde yaklaşık uzay-zaman bölgeleri gibi duran yapıları ürettiğini göstermişlerdir. Hepsinden çok daha inandırıcı olan, halka araştırmacıları böyle uzay yüzeylerinin izin verilen alanları-

nı hesaplamışlardır. Nasıl bir elektrona, iki elektrona veya 202 elektrona sahip olabilirken 1,6 elektrona veya bir başka kesirli sayıda elektrona sahip olamazsanız, hesaplar da bu alanların bir Planck uzunluğunun karesi, iki Planck uzunluğunun karesi veya 202 Planck uzunluğunun karesi olabileceğini, kesirli alanların olası olmadığını gösteriyor. Bu ise uzayın da tıpkı elektronlar gibi süreksiz, bölünemez parçalar halinde olduğunu gösteren güçlü bir kuramsal kanıttır.¹¹

Gelecekteki gelişmeleri tahmin etmeye çalışırsam, halka kuantum kütleçekimi grubunca geliştirilen arka plandan bağımsız tekniklerin sicim kuramına uyarlanacağını, bunun da sicim kuramında arka plandan bağımsız bir formülleştirmeye yol açacağını söyleyebilirim. Bunun da, geriye kalan derin gizemlerin çözülmesini sağlayacak olan üçüncü süpersicim devrimini ateşleyeceği konusunda iyimserim. Böyle gelişmeler büyük olasılıkla uzay-zamanın uzun öyküsünü başladığı noktaya geri döndürecektir. İlk bölümlerde düşünce sarkacının uzayın, zamanın ve uzay-zamanın göreci ve mutlak konumları arasında gidip geldiğini görmüştük. Sormuştuk: Uzay bir şey midir, değil midir? Uzay-zaman bir şey midir yoksa değil midir? Ve birkaç yüz yıllık düşünce tarihi boyunca farklı görüşlerle karşılaşmıştık. Genel görelilikle kuantum mekaniği arasında deneysel olarak doğrulanmış, arka plandan bağımsız bir birleşmenin, bu konunun çözülmesine büyük katkısı olacağına inanıyorum. Arka plandan bağımsızlık yoluyla kuramın bileşenleri birbirlerine göre belirli konumlarda olabilirler ama kuramın yapısına başlangıçta yerleştirilen uzay-zamanın yokluğu nedeniyle kendilerinin iştirilmiş olduğu herhangi bir arka plan arenasını bulamaz. Yalnızca göreci ilişkiler önemli hale gelir ki bu, Leibniz ve Mach gibi görecilerin ruhuna uygun bir çözüm olur. O zaman, kuramın bileşenleri -ki bunlar sicimler, zarlar, halkalar veya gelecekteki araştırmalarda bulunacak başka şeyler olabilir- bildiğimiz büyükölçekli uzay-zamanı (ya bizim gerçek uzay-zamanımız ya da düşünce deneylerinde yararlı olan varsayımsal örnekler) oluşturmak üzere birleştiklerinde, "bir şey" olma niteliğini önceki genel

görelilik tartışmamızdakine benzer biçimde geri kazanır: Boş, düz ve sonsuz uzay-zamanda (yararlı varsayımsal örneklerden biri) Newton'un dönen kovalındaki suyun yüzeyi içbükey şekil alır. Asıl nokta uzay-zamanla çok daha elle tutulur maddesel varlıklar arasındaki farkın ortadan kalkmasıdır çünkü her ikisi de temelde uzaysız ve zamansız olan bir kuramdaki daha temel bileşenlerin uygun yığınlarından meydana gelirler. Eğer durumun böyle olduğu ortaya çıkarsa, bu zaferde Leibniz, Newton, Mach ve Einstein'in tümünün paylanı olacaktır.

İç ve Dış Uzay

Bilimin geleceği konusunda tahminlerde bulunmak eğlenceli ve yapıcı bir çalışmadır. Şu anki görevlerimizi daha geniş bir bağlama yerleştirir ve yavaş ama kararlı bir biçimde ulaşmaya çalıştığımız, iç içe geçmiş hedefleri vurgular. Ama böyle tahminler uzay-zamanın kendisinin geleceğine dönüşünce, hemen hemen mistik bir şekil alır: Bu durumda gerçeklik duygumuza hükmeden şeylerin kaderinden söz ediyoruz demektir. Yine, gelecekteki keşiflerden bağımsız olarak uzay ve zamanın bireysel deneyimlerimizi biçimlendirmeye devam edeceği konusunda hiçbir kuşku yoktur; gündelik yaşam söz konusu olduğunda uzay ve zaman, kalıcı olarak vardır. Değişme, hatta büyük değişim geçirme olasılığı olan şeyse bunların sağladığı yapıyı yani arenayı kavrayışımızdır. Yüzyıllar süren düşünüşten sonra uzay ve zamanı hâlâ yabancılar arasındaki en tanıdık yüzler olarak görüyoruz. Bunlar hayatlarımıza kuşkuya yer bırakmayacak şekilde girmiş ama temel yapılarını büyük bir maharetle gizlemeyi başarmışlardır.

Geçtiğimiz yüzyıl boyunca uzay ve zamanın daha önce gizli olan bazı özelliklerini, Einstein'ın iki görelilik kuramı ve kuantum mekaniği sayesinde anlamayı başardık. Zamanın yavaşlaması, eşanlılığın göreliliği, uzay-zamanı değişik biçimlerde dilimleme, uzay ve zamandaki eğrilme ve bükülme olarak kütleçekimi, gerçekliğin olasılıksal yapısı ve uzaktan kuantum bağlantılığı, ondokuzuncu yüzyılın en önemli bilim insanlarının ya-

kın zamanda bulunacağını tahmin ettikleri şeyler listesinde bile değildiler. Ama şimdi, hem deneysel sonuçlar hem de kuramsal açıklamaların doğruladığı üzere, buradalar.

Çağımızda bir dizi gözcü, beklenmedik fikirlerle yüzleştik: Evrenimizin baskın bileşenleri gibi görünen, uzaklardaki karanlık madde ve karanlık enerji. Einstein'ın genel göreliliği tarafından öngörülen ve günün birinde zamanın yapısını daha iyi anlamamızı sağlayabilecek olan kütleçekimi dalgaları, uzay-zamanın dokusundaki dalgacıklar. Tüm uzayı dolduran ve doğrulandığı takdirde parçacıkların nasıl kütle kazandığını açıklayabilecek olan Higgs okyanusu. Evrenin şeklini açıklayabilecek olan, evrenin büyük ölçeklerde neden öylesine birörnek olduğunu açıklayan ve zamanın okuna yön sağlayan şişme genişlemesi. Nokta parçacıkların yerine enerji halkaları ve ilmekleri koyan ve Einstein'ın bütün parçacıkları ve bütün kuvvetleri tek bir kuramda birleştirme düşünün cesur bir türünü ortaya koyma potansiyeli bulunan sicim kuramı. Sicim kuramının matematiğinden çıkan ve büyük olasılıkla gelecek on yılda yapılacak olan hızlandırıcı deneylerinde saptanma olasılığı olan fazladan boyutlar. Üç boyutumuzun, daha yüksek boyutlu bir uzay-zamanın içinde yüzen evrenlerden yalnızca biri olduğu bir zar dünya. Belki de uzay ve zamanın çok daha temel, uzaysız ve zamansız varlıklardan oluştuğu bileşik uzay-zaman.

Önümüzdeki on yılda daha da güçlü hızlandırıcılar çok ihtiyaç duyulan deneysel verileri sağlayacaktır ve pek çok fizikçi planlanan daha yüksek enerjili çarpışmalardan elde edilecek verilerin, bu çok önemli kuramsal yapılardan bazılarını doğrulayacağı konusunda son derece güvenliler. Bu heyecanı paylaşıyor ve sonuçları merakla bekliyorum. Kuramlarımız gözlenebilir, sınanabilir olaylarla buluşmadığı sürece havada kalırlar, gerçek dünyayla ilgili olabilecek veya olmayabilecek, ümit verici fikirler olarak kalırlar. Fizikçiler bu yeni hızlandırıcıların kuram ve deney arasındaki örtüşmeyi büyük ölçüde ilerleteceğini ve bu yeni fikirlerden pek çoğunu kanıtlanmış bilimsel kuramlar dünyasına sokacağını umuyorlar.

Ama bir yaklaşım daha var ki, daha uzun dönemli olmasına rağmen beni başka bir şeyle karşılaştırılamayacak ölçüde heyecanlandırıyor. Bölüm 11'de minik kuantum dalgalanmalarının etkilerinin geceleyin gökyüzünde nasıl görüldüğünü incelemiştik. Kozmik genişleme tarafından büyütülen bu dalgalanmalar yıldızların ve galaksilerin oluşumlarını tohumlayan kümelenmelere dönüşür. (Balon üzerine çizilen bir şeklin balon şişirildiğinde büyüdüğü örneği hatırlayın.) Bu kavrayış astronomi gözlemleri aracılığıyla kuantum fiziğine ulaşılabilirliğini gösteren bir örnektir. Belki daha da ileriye götürülebilir. Belki de kozmik genişleme çok daha küçük ölçekli süreçleri ya da özellikleri -sicimlerin fiziğinin ya da daha genel olarak kuantum kütleçekimini ve ya uzay-zamanın kendisinin mikroskobik ötesi yapısını- genişleterek etkilerini karmaşık ama gözlenebilir bir biçimde tüm gökyüzüne yayabilir. Yani belki de evren kendi yapısının mikroskobik iplikçiklerini açıkça gökyüzüne sermiştir ve bize yalnızca desenleri tanımak düşüyor olabilir.

Derin fizik yasalarını ortaya çıkarmayı amaçlayan uç önerileri doğrulamak için Büyük Patlama dan bugüne kadar görülmemiş şiddetli koşulları yaratabilecek olan parçacık hızlandırıcılarının yıkıcı gücü gerekiyor olabilir. Ama bana göre hiçbir şey, küçük-ötesi konusundaki kuramlarımızı -uzayın, zamanın ve maddenin mikroskobik-ötesi yapısı konusundaki kuramlarımızı- doğrulamak için en güçlü teleskoplarımızı gökyüzüne çevirerek sessizce yıldızlara bakmaktan daha şiirsel olamaz, hiçbir sonuç bundan daha güzel, hiçbir birleştirme bundan daha tam olamaz.

Notlar

Bölüm 1

1. Lord Kelvin'den Fizikçi Albert Michelson, 1894 yılında, Chicago Üniversitesi'nde kurulan Ryerson Laboratuvarı'nın açılışı sırasında yaptığı konuşmada söz etmiştir. (D. Kleppner, *Physics Today*, Kasım 1998).
2. Lord Kelvin, "Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light", *Phil. Mag* 1i - 6th series, 1 (1901).
3. A. Einstein, N. Rosen ve B. Podolsky, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).
4. Sir Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1928).
5. Bölüm 6'daki Not 2'de daha ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, bu biraz abartılmış bir cümledir, çünkü (K-mezonu ve B-mezonu gibi) daha az bilinen parçacıkları kapsayan ve zayıf nükleer kuvvetlerin geçmiş ve geleceğe tam simetrik olarak bakmadığını gösteren örnekler vardır. Yine de bana ve bu konuda düşünen birçok kimseye göre, bu parçacıklar her gün kullandığımız nesnelerin özelliklerinin belirlenmesinde temel roller oynamadıkları için, zamanın okunun açıklanmasında önemli olmaları pek olası değildir (ama hemen şunu da ekleyeyim, hiç kimse bu konudan tam olarak emin değil). Bu yüzden teknik olarak abartılı olsa da, kitapta yasaların geçmiş ve geleceği eşit olarak ele almalarından kaynaklanan hatanın -en azından zamanın okunu açıklamak amacıyla- çok küçük olduğunu varsayacağım.
6. Timothy Ferris, *Coining of Age in the Milky Way* (New York: Anchor, 1989).

Bölüm 2

1. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Alathemetical Principle ol Natural Philosophy and His System ol the World*, çev. A. Motte ve Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1934), cilt. 1, s. 10.
2. Adı geçen eser, s. 6.
3. A.g.e.
4. A.g.e. s. 12.
5. Albert Einstein, Max Jammer'in *Concepts ol Space: The Histories ol Theories ol Space in Physics* kitabına yazdığı önsözden (New York: Dover, 1993).
6. A. Rupert Hall, *Isaac Newton, Adventurer in Thought* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992), s 27.
7. A.g.e.
8. H. G. Alexander, ed., *The Leibniz-Clarke Correspondence* (Manchester: Manchester University Press, 1956).
9. Leibniz'e, içindeki varlıklardan bağımsız olarak uzaya bir varlık atfetmeye karşı olanların bir temsilcisi olarak bakıyorum, ama aralarında Christiaan Huygens ve rahip Berkeley nin de bulunduğu pek çok kimse de bu bakış açısını son derece hararetli bir şekilde savunmuşlardı.
10. Max Jammer, s. 116'ya bakınız.
11. V. I. Lenin, *Materialism and Empiriocriticism: Critical Comments on a Reactionary Philosophy* (New York: International Publications, 1909). Materializm' i Empiriokrititsizm' Kriticheskia ob' Odnoi Reaktsionnoi Filosofii'nin (Moscow: Zveno Pres, 1909) 2. İngilizce baskısı.

Bölüm 3

1. Matematik eğitimi almış okuyucu için bu denklemler

$$\begin{aligned} \nabla \cdot E &= \rho/\epsilon_0, \quad \nabla \cdot B = 0, \quad \nabla \times E + \partial B / \partial t = 0, \quad \nabla \times B - \epsilon_0 \mu_0 \partial E / \partial t = \mu_0 j, \\ E, B, \rho, j, \epsilon_0, \mu_0 \end{aligned}$$

olarak yazılabilir. Burada E elektrik alanı, M manyetik alanı, ρ elektrik yük yoğunluğunu, j elektrik akım yoğunluğunu, boş uzayın permutivitesini ve μ_0 boş uzayın permeabilitesini göstermektedir. Görebileceğiniz gibi, Maxwell denklemleri elektromanyetik alanların değişme hızını elektrik yük ve akımlarının varlığına bağlar. Bu denklemlerin elektromanyetik dalgaların hızı olarak $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ ifadesini aldığı ve bunun gerçekten de ışığın hızı olduğunu göstermek çok zor değildir.

2. Böyle deneylerin Einstein'ın özel görelilik kuramını geliştirmesinde oynadıkları roller konusu tartışmalıdır. *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982) adlı Einstein biyografisinin 115-119. sayfalarında Abraham Pais, Einstein'ın daha sonraki yıllardaki kendi konuşmalarına bakarak, onun Michelson-Morley deneyinin sonucundan haberdar olduğunu söyler. *Albert Einstein: A Biography* (New York: Viking, 1997) adlı kitabının 217-220. sayfalarında Albrecht Fölsing de Albert Einstein'ın Michelson-Morley deneyinin sonucundan haberdar olduğunu, aynı zamanda Armand Fizeau'nun çalışmasına benzer, esirin varlığına yönelik deneysel çalışmaların sonuçlarını da bildiğini söylüyor. Ama Fölsing ve diğer pek çok bilim tarihçisi, böyle deneylerin Einstein'ın düşüncesinde en iyi olasılıkla ikincil bir etki yaptığı konusunda fikir birliği içindedir. Einstein'ı esas olarak yönlendiren şeyler, matematiksel simetri, basitlik ve fiziksel sezgileridir.
3. Bir şeyi görebilmemiz için ışık gözümüze ulaşmalıdır; benzer biçimde, ışığı görebilmemiz için ışığın kendisi de bu yolculuğu yapmak zorundadır. Bu yüzden, Bart'ın uzaklaşmakta olan ışığı gördüğünü söylediğimde bir kısaltma yapıyorum. Bart'ın, tümü de onunla aynı hızla hareket eden ama ışığın ve kendisinin izlediği yolda, çeşitli uzaklıklarda bulunan bir yardımcıları ordusuna sahip olduğunu varsayıyorum. Bu yardımcıları Bart'a ışığın ne kadar ileride olduğu ve ışığın bu noktalara ne kadar zamanda ulaştığı konusunda güncel bilgiler veriyorlar. Bart da daha sonra bu bilgilere dayanarak ışığın ondan hangi hızla uzaklaştığını hesaplıyor.
4. Einstein'ın uzay ve zaman konularındaki görüşlerinin özel görelilikten kaynaklanan birçok basit çıkarımı vardır. Eğer ilgileniyorsanız, örneğin *Evrenin Zarafeti* kitabının 2. Bölümüne (kitabın sonunda bu bölüme ilişkin olarak verilen notlarla birlikte) bakabilirsiniz. Bu konunun daha teknik ama son derece berrak bir incelemesi için bakınız: Edwin Taylor ve John Archibald Wheeler, *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity* (New York, W. H. Freeman & Co., 1992).
5. Zamanın ışık hızında durması ilginç bir kavramdır, ama bu konu üzerinde fazla durmamak gerekir. Özel görelilik hiçbir maddesel cismin hızının hiçbir zaman ışık hızına ulaşamayacağını gösterir: Cisim ne kadar hızlanırsa, onu daha fazla hızlandırmak için gerekli olan itme kuvveti daha da büyür. Işık hızının yakınında cismi daha da hızlandırmak için neredeyse sonsuz bir kuvvetle itmemiz gerekir ki bu da yapılabilecek bir şey *değildir*. Bu yüzden "zamansız" foton kavramı *kütlesiz* cisimlerle (toton bunun bir örneğidir) sınırlıdır, bu nedenle de "zamansızlık" ya da "zamandan bağımsızlık" birkaç parçacık türü dışında ulaşılabilecek bir durum *olamaz*. Işık hızıyla hareket edildiğinde evrenin nasıl görüneceğini hayal etmek ilginç ve verimli bir çalışma ise de, eğer-özel göreliliğin bizim deneysel zaman kavramımızı nasıl etkilediği konusunda çıkarımlar yapmak istiyorsak, kendimiz gibi maddesel cisimlere odaklanmamız gerekir.
6. Abraham Pais'in *Subtle is the Lord* adlı kitabının 113-114. sayfalarına bakınız.
7. Daha kesin ifade etmek gerekirse, yüzeyi eğer içbükey bir şekil almışsa suyun dön-

mekte olduğunu, böyle bir şekil almamışsa dönmekte olmadığını *tanımlıyoruz*. Mach'çı bakış açısına göre boş bir evrende dönme kavramı yoktur, bu yüzden suyun yüzeyi daima düz olur (veya suyun üzerine etki eden kütleçekiminin yokluğuna ilişkin konulardan kaçınmak için, iki taşı birbirine bağlayan ipin her zaman gevşek olacağını söyleyebiliriz). Buradaki ifade ise, tersine, özel göreliliğe göre boş bir evrende bile suyun yüzeyinin içbükey bir şekil alacağı bir dönme kavramı *olmasıdır* (ve iki taşı birbirine bağlayan ip, gergin olur). Bu anlamda özel görelilik, Mach'ın görüşlerini ihlal eder.

8. Albrecht Fölsing, *Albert Einstein* (New York: Viking Pres, 1997), s. 208-210.
9. Matematikçi eğilimli okuyucular, eğer ışık hızının bir uzay birimi bölü bir zaman birimi şeklini aldığı bir birim sistemi seçersek (yıldızda bir ışık yılı veya saniyede bir ışık saniyesi gibi) ışığın uzay-zamanda 45 derecelik ışınlar üzerinde hareket edeceğini fark edeceklerdir (çünkü böylece köşelemesine çizgiler, bir zaman biriminde bir uzay birimi, iki zaman biriminde iki uzay birimi vb. kapsayan çizgilerdir). Hiçbir şey ışık hızını geçemeyeceği için, her maddesel cisim verilen bir zaman aralığında uzayda bir ışık ışınından daha az yol almalı ve bu nedenle uzay -zamanda izlediği yörünge, diyagramın merkezindeki çizgiyle (somunun merkezinden geçen ve bir ucundan diğerine uzanan çizgi) 45 dereceden daha küçük bir açı yapmalıdır. Üstelik Einstein v hızıyla hareket eden bir gözlemci için zaman dilimlerinin -böyle bir gözlemcinin bir anında uzayın tümü- denkleminin (basit olsun diye bir uzay boyutu varsayalım) $\Delta t_{\text{gözlemci}} = \Delta t_{\text{uzay}} \cdot \gamma \sim (v^2/c^2)x_{\text{uzay}} \cdot \Delta t_{\text{uzay}}$ olduğunu göstermiştir. Burada $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ ise ışık hızını simgeliyor. $c=1$ olan birimlerde $v<1$ olur ve bu yüzden hareketli gözlemci için zaman dilimi de - $\Delta t_{\text{gözlemci}} = \Delta t_{\text{uzay}} \cdot \gamma$ nin sabit olduğu değerlerin geometrik yeri — $(\frac{1}{\sqrt{1-v^2}}) = \gamma$ — sabit şeklinde olur. Böyle zaman dilimleri, durağan zaman dilimleri ile $\Delta t_{\text{uzay}} = \Delta t_{\text{gözlemci}}$ sabit biçiminin geometrik yeri) açı yapar ve $v<1$ olduğu için bunların arasındaki açı 45 dereceden küçüktür.
10. Matematikçi eğilimli okuyucu için, bu cümle Minkowski uzay-zamanındaki jeodeziklerin -verilen iki nokta arasındaki ekstremum (maksimum ya da minimum) uzunluğa sahip olan uzay-zaman yolları- özel bir koordinat veya referans sistemi seçiminden bağımsız olan geometrik varlıklar olduğunu belirtiyor. Bunlar geometrik uzay-zamanın yapısal ve mutlak özellikleridir. Standart Minkowski metriği kullanıldığında (zamansal) jeodezikler, doğrusal çizgilerdir (belirtilen hızlar ışık hızından küçük olduğu için, bu doğrusal çizgilerin zaman eksenine göre yaptığı açı 45 dereceden küçüktür).
11. Hareketlerinden bağımsız olarak bütün gözlemcilerin üzerinde anlaştıkları, önemli bir şey daha vardır. Tanımın içinde bulunmakla birlikte açıkça ifade etmekte yarar var. Eğer bir olay diğerinin nedeni ise (taş atıyorum, camın kırılmasına neden oluyor), bütün gözlemciler nedenin sonuçtan önce olduğunda hemfikirlerdir (bütün gözlemciler benim taşı cam kırılmadan önce attığımı konusunda hemfikirlerdir). Matematikçi eğilimli okuyucu için, şematik uzay-zaman betimlememizi kullanarak bunu görmek aslında zor değildir. Eğer A olayı B olayının nedeni ise, A dan B'ye çizilen çizgi, zaman dilimlerinin her birini (Aya göre hareketsiz olan bir gözlemcinin zaman dilimlerini) 45 dereceden *büyük* bir açıyla keser (uzay eksenleri -verilen herhangi bir zaman diliminde bulunan eksenler- ile A ve B'yi birleştiren çizgi arasındaki açı 45 dereceden büyüktür). Örneğin eğer A ve B uzayda aynı konumda yer alıyorsa (parmağıma doladığım lastik [A] parmağımın beyazlaşmasına neden olur [B]), o zaman A ve B'yi birleştiren çizgi zaman dilimleri ile 90 derecelik açı yapar. Eğer A ve B uzayda farklı konumlarda yer alıyorsa, A dan B'ye giden her ne ise (sapanımdan pencereye doğru giden taş) etkisini ışık hızından daha yavaş gösterir, ki bunun anlamı açının 90 dereceden 45 dereceden daha az farklı olacağıdır, yani zaman dilimlerine (uzay eksenlerine) göre açı 45 dereceden büyüktür. (Bu bölümdeki 9. nottan ışık hızının sınır koyduğunu ve böyle hareketlerin 45 derecelik çizgiler oluşturduğunu hatırlayın.) Şimdi, 9. notta olduğu gibi, hareketli bir gözlemcinin sabit bir gözlemciye göre farklı zaman dilimlemesi nedeniyle dilimler arasında

- açı olacaktır, ama bu açı her zaman 45 dereceden *küçük*tür (iki maddesel gözlemci arasındaki görelî hareketin hızı her zaman ışık hızından *küçük* olacağı için). Birbirlerine nedensellik ile bağlı olaylara ilişkin açı her zaman 45 dereceden *büyük* olduğu için, zorunlu olarak ışık hızından daha yavaş hareket eden bir gözlemcinin zaman dilimleri önce sonuçları, daha sonra nedenlerle karşılaşamaz. Bütün gözlemciler için neden sonuçtan önce gelecektir.
12. Eğer etkiler ışık hızından daha hızlı yayılabilseydi, nedenlerin sonuçlardan önce gelmesi kavramı (bir önceki nota bakınız) zora girebilirdi.
 13. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton 's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*, çev. A. Motte ve Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), cilt 1, s. 634.
 14. Yerkürenin kütleçekimi bir konumdan diğerine değiştiği için, uzaysal boyutları olan ve serbestçe düşmekte olan bir gözlemci, hâlâ kalıntı bir kütleçekimsel etki saplayabilir. Yani, eğer düşmekte olan gözlemci elindeki iki beyzbol topunu serbest bırakırsa -kollarını iki yana açıp topları bırakıyor- toplardan her biri yerkürenin merkezine doğru düşmeye başlar. Bu durumda, gözlemcinin bakış açısına göre kendisi yerkürenin merkezine doğru düşerken sağ elinden bıraktığı top yavaş yavaş sola, sol elinden bıraktığı top ise yavaş yavaş sağa doğru hareket edecektir. Dikkatli bir ölçümle gözlemcimiz, iki top arasındaki uzaklığın azalmakta olduğunu, topların birbirlerine doğru hareket etmekte olduğunu bulacaktır. Bu etkinin nedeni iki topun uzayda birbirlerinden çok az farklı konumlarda serbest bırakılması ve yerkürenin merkezine doğru düşerken izledikleri yolun çok az farklı olmasıdır. Böylece Einstein'ın kavrayışının daha kesin bir ifadesi, bir cismin uzaysal boyutları ne kadar *küçük*se, serbest düşme sırasında kütleçekimini o kadar kolay bertaraf edeceği şeklindedir, ilke olarak önemli bir nokta olsa da, bu karmaşıklık bütün inceleme boyunca göz ardı edilebilir.
 15. Genel göreliliğe göre uzay ve zamanın eğrilmesinin daha genel düzeyde ama daha ayrıntılı bir incelemesi için *Evrenin Zarafeti* kitabının 3. Bölüm'üne bakabilirsiniz.
 16. Matematik eğitimi almış okuyucu için, Einstein'ın denklemleri $G_{\mu\nu} = (8\pi G/c^2) T_{\mu\nu}$ olup burada denklemin sol tarafı uzay-zamanın eğrilmesini Einstein tensörü kullanarak ifade ederken sağ tarafı ise evrendeki madde ve enerji dağılımını enerji-momentum tensörü kullanarak ifade eder.
 17. Charles Misner, Kip Thorne ve John Archibald Wheeler, *Gravitation* (San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1973) s. 544-545.
 18. 1954'te Einstein bir arkadaşına şöyle yazmıştır: "Aslında artık hiç kimse Mach'ın ilkesinden söz etmemeli" (Abraham Pais'in *Subtle Is the Lord* kitabında s. 288'de söz edildiği biçimiyle).
 19. Daha önce söz edildiği gibi, her ne kadar kendi el yazmalarında tam olarak böyle söylemiyorsa da, kuşaklar boyunca aşağıdaki görüşler sürekli olarak Mach'a atfedilmiştir.
 20. Buradaki bir nitelendirme, ışıklarının veya kütleçekimsel etkilerinin henüz bize ulaşmak için yeterince zaman bulamadığı için hissettiğimiz kütleçekimi üzerinde bir etkisi olmayacak kadar uzak cisimlerdir.
 21. Bu konulan bilen okuyucu, teknik olarak, bu cümlemin çok güçlü olduğunu fark edecektir, çünkü genel göreliliğin boş uzay için anlamsız olmayan (yani Minkowski uzayında olmayan) çözümleri vardır. Burada, özel göreliliğin, genel göreliliğin kütleçekiminin ihmal edildiği bir özel durumu olarak düşünülebileceği gerçeğini kullandım.
 22. Dengeli davranmış olmak için, bu sonuçla hemfikir olmayan fizikçiler ve felsefeciler olduğunu da belirtiyim. Her ne kadar Einstein başlangıçta Mach ilkesini gözetmişse de, son otuz yılda kendi yoluna gitmiştir. Mach'ın görüşlerinin pek çok versiyonu ve yorumu ileri sürülmüş ve örneğin kimi fizikçiler genel göreliliğin Mach ilkeleriyle temelde uyum içinde olduğunu, uyumsuzluk çıkarının uzay-zamandaki bazı özel şekiller -boş evrendeki sonsuz düz uzay-zaman gibi- olduğunu iddia etmiştir. Bun-

lar belki de gerçekçi herhangi bir uzay-zamanın -yıldızlar ve galaksiler barındıran Mach ilkesini sağlayacağını ileri sürmüştür. Diğerleri Mach ilkesinin, konunun artık birbirlerine iple bağlı taşlar ya da su dolu kova gibi cisimlerin bomboş bir evrende nasıl davranacakları değil, çeşitli zaman dilimlemelerinin -çeşitli üç boyutlu uzay-sal geometrilerin- zaman içinde birbirleri ile nasıl ilişkilendirileceği olduğu 3'enden formülleştirilmeler ortaya atmıştır. Bu fikirler üzerine aydınlatıcı, modern bir başvuru kaynağı, bu konudaki makalelerden oluşan *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Julian Barbour ve Herbert Pfister, eds. (Berlin: Birkhäuser, 1995) adlı kitaptr. İlginç nokta, bu kaynağın kırk kadar fizikçi ve felsefecinin Mach ilkesi konusundaki görüşlerini toplamış olmasıdır. Çoğu (yüzde 90'dan fazlası) genel göreliliğin Mach ilkesine tam olarak uygun olmadığı konusunda hemfikirdir. Bu görüşlerin Mach öncesi bakış açısından ve sıradan okuyucunun düzeyine uygun olarak tartışıldığı, mükemmel ve son derece ilginç bir kaynak, Julian Barbour'un *The End of Time: The Next Revolution in Physics* (Oxford: Oxford University Press, 1999) adlı kitabıdır.

23. Matematiğe eğilimli okuyucunun, Einstein'ın uzay-zamanın, metriğinden (uzay-zamanda uzaklık ilişkilerini veren matematiksel araç) bağımsız olarak bir varlığının olmadığını, o yüzden eğer her şey -metrik de dahil olmak üzere- çıkarılırsa uzayın artık bir şey olmayacağını düşündüğünü öğrenmesi aydınlatıcı olabilir. Ben "uzay-zaman" ile daima Einstein denklemlerini çözen bir metrik ile birlikte bir manifoldu kastediyorum, bu nedenle ulaştığımız sonuç matematiksel dilde metrikli uzay-zamanın bir şey olduğudur.
24. Max Jammer, *Concepts of Space*, s. xvii.

Bölüm4

1. Daha kesin olarak bu, kökleri Aristoteles'e kadar giden, ortaçağa ait bir kavrammış gibi duruyor.
2. Kitapta daha sonra incelteceğimiz gibi, en azından Einstein'ın kuramının çökmesine neden olan son derece küçük boyutları ve devasa yoğunlukları nedeniyle hâlâ pek çok sır barındıran (Büyük Patlama ve kara delikler gibi) alanlar vardır. O yüzden bu ifade burada bilinen yasaların da kuşkulu hale geldiği uç bağlamlara uygulanır.
3. Bu metni daha önce okuyan biri ve şaşırtıcı bir şekilde vudu büyücülüğü akınında uzmanlığı olan biri bana vudu büyücüsünün niyetlerini taşıyan bir şeyin -yani ruhun- bir yerden bir yere gittiğinin hayal edildiğini söylemişti. O nedenle benim yerel olmayan hayalci sürecim -vudu konusuna nasıl yaklaştığınıza bağlı olarak- hatalı olabilir. Bununla birlikte, fikir açıktır.
4. Herhangi bir kafa karışıklığından kaçınmak için hemen başlangıçta "Evren yerel değildir" veya "Burada yaptığımız bir şey oradaki başka bir şeyle bağlantılı olabilir" dediğim zaman uzaktaki bir şeyi anlık olarak kontrol etme yeteneğinden söz etmediğimi vurgulamak istiyorum. Açıkça görüleceği gibi, sözünü ettiğim etki kendisini birbirinden uzak konumlarda (ışığın bile birinden diğerine gitmek için yeterli zamanı bulamadığı kadar uzak konumlarda) olan olaylar arasındaki korelasyonlar olarak -çoğunlukla ölçümlerin sonuçları arasındaki korelasyonlar olarak- ortaya koyar. Bu nedenle fizikçilerin yerel olmayan korelasyonlar olarak adlandırdığı korelasyonlardan söz ediyorum. İlk bakışta böylesi korelasyonlar size özel olarak ilginç gelmeyebilir. Birisi içinde bir çift eldivenin tekinin bulunduğu bir kutuyu size, diğer tekin bulunduğu kutuyu binlerce kilometre uzaktaki bir arkadaşınıza yollarısa, bu eldivenlerin sağ mı yoksa sol mu olduğu konusunda bir korelasyon vardır. Eğer sizdeki sol ise arkadaşınızdaki sağdır, sizdeki sağ ise arkadaşınızdaki soldur. Bu korelasyonların bir sır barındırmadığı da son derece açıktır. Ama yavaş yavaş tarif edeceğimiz gibi, kuantum dünyasında gözlenen korelasyonların karakterleri çok farklıymış gibi görünüyor. Sanki her iki teki de hem sağ hem sol olabilen bir çift "kuantum eldiveniniz" varmış da, yalnızca uygun bir şekilde gözlemlendiğinde

ya da etkileşildiğinde sağ mı yoksa sol mu olduğu kesin olarak ortaya çıkmıyormuş gibi. Gariplik şurada ortaya çıkıyor: Her ne kadar eldiven tekleri gözlemlenirken zaman sağ mı yoksa sol mu olduklarını rasgele seçiyor gibi görünüyorsa da, eldivenler birbirlerinden çok uzak olsalar bile birbirleriyle uyumlu davranıyorlar; birisi sağ olmayı seçerse diğeri sol olmayı, birisi sol olmayı seçerse diğeri sağ olmayı seçiyor.

5. Kuantum mekaniği, mikro dünya hakkında deneysel gözlemlerle son derece iyi örtüşen öngörülerde bulunur. Bu konuda evrensel fikir birliği vardır. Bununla birlikte, kuantum mekaniğinin ayrıntılı özellikleri nedeniyle, bu bölümde anlatıldığı gibi, yaygın olarak yaşanan deneyimden önemli farklılıklar gösterir ve buna bağlı olarak, kuramın (ve kuramın mikro dünyadaki olaylarla makro dünyadaki ölçüm sonuçlarını nasıl bağdaştırdığının) farklı matematiksel formülleştirmeleri olmasından ötürü, kuramın çeşitli özelliklerinin (ve kuramın şaşırtıcı bir şekilde matematiksel olarak açıklayabildiği verilerin)-ki bunlara yerel olmayış konuları da dahildir- nasıl yorumlanması, gerektiği konusunda fikir birliği yoktur. Bu bölümde ben, çağdaş kuramsal kavrayışı ve deneysel sonuçları temel alan ve en inandırıcı bulduğum bakış açısını tercih ettim. Ama bu bakış açısının herkes tarafından paylaşılmadığını vurgulamak isterim ve bu bakış açısını tam olarak açıkladıktan sonra, bir başka notta diğer bakış açılarından da kısaca söz edecek ve bu konularda daha geniş bir okuma kaynakları listesi vereceğim. Bu arada -daha sonra inceleyeceğimiz gibi- deneylerin, Einstein in verilerin *yerel olmayan bağlantılılık özellikleri kullanılmaksızın ve hatta söz edilmeksizin*, yalnızca parçacıkların bazen çok açık olmayan ama belirli özellikleri temelinde açıklanabileceği düşüncesine ters düştüğünü de vurgulayalım. Bununla birlikte, bu bakış açısının başarısızlığı yalnızca yerel evreni dışlar. Parçacıkların böylesi belirli, gizli özelliklere sahip olma olasılığını dışlamaz.
6. Matematığe eğilimli okuyucu için, bu tanımın potansiyel olarak yanlış yönlendirici bir özelliğinden söz edeyim. Çok parçacık sistemleri için, olasılık dalgası (standart terminolojide dalga fonksiyonu) esas olarak tanımlandığı gibidir, ama parçacıkların *yapılandırma uzayında* bir fonksiyon olarak tanımlanır (tek bir parçacık için yapılandırma uzayı gerçek uzayla aynıdır ama bir N-parçacık sistemi için 3N boyutta sahiptir). Bu da dalga fonksiyonunun gerçek fiziksel bir varlık mı yoksa yalnızca matematiksel bir araç mı olduğu sorusu üzerinde düşünürken akılda tutulması gereken bir şeydir, çünkü eğer birinci şık doğruysa yapılandırma uzayının gerçekliğini de kabul etmek zorundayız, ki bu da Bölüm 2 ve 3'teki temaların ilgi çekici bir çeşitlemesidir. Görelî kuantum alan kuramında çılanlar, bildiğimiz dört uzay-zaman boyutunda tanımlanabilir ama genelleştirilmiş dalga fonksiyonlarının -çok daha soyut bir uzay olan *alan uzayında* tanımlanan *dalga fonksiyonelleri*- kullanıldığı, çok daha az yaygın olan formülleştirmeler de vardır.
7. Burada sözünü ettiğim deneyler, çeşitli metal yüzeylere tutulan ışığın, bu yüzeylerden elektronların salınmasıyla sonuçlandığı *fotoelektrik etki* deneyleridir. Deneyciler ışığın şiddeti ne kadar büyükse salınan elektronların sayısının da o kadar çok olduğunu buldular. Bunun yanı sıra deneylerde salınan elektronların enerjisinin ışığın rengi -yani frekansı- tarafından belirlendiği de ortaya çıktı. Einstein, eğer ışık tanecikli yapıya sahipse, bu olayı anlamamanın kolay olduğunu ileri sürdü. Işığın şiddetli (güçlü) olması, ışık ışınında daha çok ışık parçacığı (foton) olduğu anlamına gelir. Çok sayıda foton, çok sayıda elektrona çarparak onların yüzeyden kopmalarına neden olur. Üstelik, ışığın frekansı fotonların ve dolayısıyla salınan elektronların enerjilerini belirler ki bu durum da deneysel verilerle uyuşur. Fotonların parçacık özellikleri en sonunda 1923 yılında elektron ve fotonların elastik saçılmalarına ilişkin deneyler yoluyla Arthur Compton tarafından doğrulandı.
8. Institut International de Physique Solway, *Rapport et discussions du 5ème Conseil* (Paris, 1928) s. 253 ff.
9. Irene Born, çev., *The Born-Einstein Letters* (New York: Walker, 1971), s. 223.
10. Irene Stapp, *Nuovo Cimento* 40B (1977) 191-204.
11. David Bohm yirminci yüzyılda kuantum mekaniği üzerinde çalışan yaratıcı beyin-

ler arasındadır. Pennsylvania da 1917 yılında doğmuş ve Berkeley'de Robert Oppenheimer'in öğrencisi olmuştur. Princeton Üniversitesi'nde öğretim üyesi iken Amerikan Karşıtı Etkinlikler Komitesi önünde ifade vermeye davet edilmiş, ama tanıklık yapmayı reddetmiştir. Bunun üzerine Amerika'dan ayrılmış, önce Brezilya'da Sao Paulo Üniversitesi'nde, daha sonra İsrail'de Technion'da ve son olarak da Londra Üniversitesi'nin Birkbeck Koleji'nde profesör olarak bulunmuştur. 1992'deki ölümüne kadar Londra'da yaşamıştır.

12. Elbette eğer yeterince uzun beklerseniz, bir parçacığa yaptığınız şey, ilke olarak diğerini etkiler: Parçacıklardan biri kendisine ölçüm uygulandığı konusunda diğerini uyaran bir sinyal gönderir ve bu sinyal alıcı parçacığa etkiler. Bununla birlikte, hiçbir sinyal ışıktan daha hızlı gidemeyeceği için, böylesi bir etki anlık değildir. Buradaki incelemenin ana noktası, parçacıklardan birinin belirli bir eksen çevresindeki spinini ölçtüğümüz anda diğer parçacığın aynı eksen çevresindeki spinini de öğrenmemizdir. Bu nedenle, parçacıklar arasındaki herhangi bir tür "standart" haberleşmenin -ışıkla olsun olmasın- konuyla ilgisi yoktur.
13. Bu ve bundan sonraki alt bölümlerde Bell in benim kullandığım damıtımı, David Mermin in mükemmel makalelerinden esinlenerek yaptığım bir "dramatikleştirmedi": "Quantum Mysteries for Anyone", *Journal of Philosophy* 78, (1981), s. 397-408; "Can You Help Your Team Tonight by Watching on TV?" *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*, James T. Cushing ve Ernan McMullin, ed. (University of Notre Dame Press, 1989); "Spooky Action at a Distance: Mysteries of the Quantum Theory", *The Great Ideas Today* (Encyclopaedia Britannica, Inc., 1988). Bunların tümü, N. David Mermin in *Boojums All the Way Through* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1990) adlı kitabında toplanmıştır. Bu fikirleri çok daha teknik bir biçimde izlemek için Bell in kendi makalelerinden daha iyi bir kaynak olamaz. Bu makalelerin çoğu toplu halde J. S. Bell in *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997) adlı kitabında toplanmıştır.
14. Einstein, Podolsky ve Rosen'in incelemelerinde yerellik varsayımı kritik önemde olsa da, araştırmacılar evrenin yerel olmayan özelliklere olanak verdiği sonucundan kaçınmak amacıyla, düşüncü mantıklarının diğer öğelerini kullanarak bir hata bulmaya çalıştılar. Örneğin, zaman zaman verilen gerektirdiği tek şeyin gerçekçilik denen şeyden yani cisimlerin ölçümle bulunan özelliklerinin ölçüm sürecinden bağımsız olduğu fikrinden vazgeçmek olduğu ileri sürülür. Böyle bir bağlamda ise bu iddia hedefi tutturamaz. Eğer EPR'in düşüncü mantığı deneylerce doğrulansaydı, kuantum mekaniğinin uzun erimli etkileşimleri konusunda gizemli hiçbir şey olmazdı; bunlar, eldivenlerinizin sol tekini burada bulmanızın, oradaki tek eldivenin sağ tek olmasını garantilemesi gibi klasik uzun-erimli korelasyonlardan daha şaşırtıcı olmazdı. Ama bu mantık Bell/Aspect deneyinin sonuçları tarafından çürütülmüştür. Şimdi, EPR'in bu çürütülmesine tepki olarak gerçekçilikten vazgeçersek -standart kuantum mekaniğinde yaptığımız gibi- bu, birbirlerinden çok uzaktaki *rasgele* süreçler arasındaki uzun erimli korelasyonun acayipliğini ortadan kaldırmaz; gerçekçilikten vazgeçersek, eldivenler 4.notta olduğu gibi "kuantum eldivenleri" haline gelirler. Gerçekçilikten vazgeçmek, herhangi bir şekilde, gözlenen yerel olmayan korelasyonları daha az tuhaf hale getirmez. Şurası gerçektir ki eğer EPR, Bell ve Aspect'in sonuçlarının ışığında gerçekçiliği sürdürmeye çalışırsak -örneğin bölümün sonlarında incelediğimiz Bohm'un kuramında olduğu gibi- o zaman, verilerle tutarlı olmak için ihtiyaç duyduğumuz yerel olmayış türü çok daha ciddidir, yalnızca yerel olmayan korelasyonları değil, yerel olmayan etkileşimleri de kapsar. Pek çok fizikçi bu seçeneğe direnmiş ve gerçekçilikten vazgeçmişlerdir.
15. Örneğin Murray Gell-Mann'ın *The Quark and the Jaguar* (New York: Freeman, 1994) ve Huw Price'in *Time's Arrow and Archimedes' Point* (Oxford: Oxford University, 1996) kitaplarına bakabilirsiniz.
16. Özel görelilik ışık hızından daha yavaş hareket etmekte olan herhangi bir şeyin

ışık hızı sınırını aşmasını yasaklar. Ama eğer herhangi bir şey *daima* ışık hızından daha hızlı hareket etmişse, özel görelilik tarafından kesinlikle dışlanmaz. Bu türden varsayımsal parçacıklara *takyon* (*tachyon*) adı verilir. Çoğu fizikçi takyonların varlığına inanmaz ama diğerleri onların var olma olasılığıyla el yordamıyla uğraşmaktan zevk alır. Böyle ışıktan hızlı parçacıkların özel görelilik denklemlerine göre çok garip özellikleri olacağından, şimdiye kadar hiç kimse bunlar için -varsayımsal olarak bile olsa- bir kullanma alanı bulamadı. Çağdaş çalışmalarda takyonların ortaya çıkmasıyla sonuçlanan bir kurama genel olarak kararsız bir kuram gözüyle bakılır.

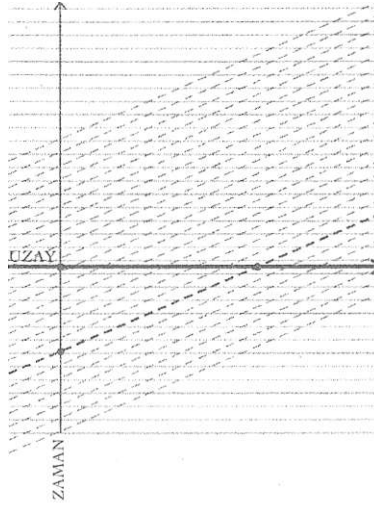
17. Matematiğe eğilimli okuyucu, özel göreliliğin, temelinde fizik yasalarının Lorentz değişmezi yani Minkowski uzay-zamanında SO (3,1) dönüşümleri altında değişmez olduğunu iddia ettiğine dikkat etmelidir. Bunun sonucu ise, eğer kuantum mekaniği Lorentz değişmezi şeklinde formüleleştirilecekse, o zaman özel görelilikle bağdaşması gerektiridir. Şimdi, görelî kuantum mekaniği ve görelî kuantum alan kuramı bu konuda çok yol kat ettiler ama şimdilik kuantum ölçme problemini Lorentz değişmez bir yapıda ele alıp almadıkları konusunda tam bir uyum yok. Örneğin, görelî kuantum alan kuramında çeşitli deneylerin sonuç olasılıkları ve olasılık genliklerini tam anlamıyla Lorentz değişmez bir şekilde hesaplamak standart bir iştir. Ama standart yaklaşımlar, kuantum olasılıkları arasından şu ya da bu sonucun ortaya çıkmasını -yani ölçüm sırasında olup biteni- açıklamakta yetersiz kalıyorlar. Bu olay bir deneyinin ne yaptığı -bağlantılı parçacıklardan birinin özelliklerini ölçme işi- konusuyla ilgili olduğu için, bağlantılılık konusunda önemlidir. Daha ayrıntılı bir inceleme için bkz. Tim Maudlin, *Quantum Non-locality and Relativity* (Oxford: Blackwell, 2002).
18. Matematiğe eğilimli okuyucu için, bu deneylerle uyumlu öngörülerde bulunan kuantum mekaniksel hesaplama şöyle. Detektörlerin çevresindeki spini ölçecekleri eksenlerden birinin dikey olduğunu, diğerlerinin de dikeyle saat yönünde ve saat yönünün tersine 120 derecelik açılar yaptığını varsayalım (her detektör için birer tane olmak üzere birbirlerine bakan iki saat üzerinde saat on iki, saat dört ve saat sekiz gibi). Gene iki elektronun sırt sırta bu detektörlere doğru singlet adı verilen durumda çıkış yaptığını varsayalım. Bu, toplam spini sıfır olan bir durumdur ve verilen bir eksen çevresinde, eğer elektronlardan birinin spini yukarı ise, diğerinin spininin aşağı olmasını garantiler. (Metinde kolaylık olsun diye, eğer elektronlardan birinin spini yukarı ise diğerininki de yukarı; eğer birininki aşağı ise diğerininkinin de aşağı olacağı bir korelasyondan söz ettim. Gerçek korelasyonda elektronların spinleri ters yöndedir. Ana metinle uyum sağlamak için, iki detektörün birbirlerine ters yönde ayarlandığını düşünebilirsiniz, böylece birinin yukarı spin dediğine diğeri aşağı spin der.) Basit kuantum mekaniğinin standart bir sonucu, eğer detektörlerin çevresinde elektronların spinlerini ölçtüğü eksenler arasındaki açı 9 ise, detektörlerin ters yönde spin değerleri ölçme olasılığının $\cos^2(9/2)$ olduğunu gösterir. Bu yüzden, eğer detektör eksenleri paralel olacak şekilde ayarlanmışsa ($9=0$), detektörler kesinlikle ters yönde spinier ölçeceklerdir (ana metinde aynı yöne ayarlandıklarında aynı değerleri ölçen detektörlere benzer olarak) ve eğer $+120^\circ$ veya -120° dereceye ayarlanmışlarsa, ters spinier ölçme olasılığı $\cos^2(+120^\circ \text{ veya } -120^\circ) = 1/4$ olur. Şimdi, eğer detektör eksenleri rasgele bırakılmışsa, zamanın $1/3$ unde aynı yönü gösterirler, $2/3$ ünde ise aynı yönü göstermezler. Bu nedenle çok sayıda tekrar sonunda, zamanın $(1/3)(1) + (2/3)(1/4) = 1/2$ 'sinde ters spinier ölçülmesini bekleriz ki verilenin de gösterdiği budur.

Yerellik varsayımının, standart kuantum mekaniğiyle bulduğumuzdan (tam olarak yüzde 50) daha yüksek bir spin korelasyonu (yüzde 50'den fazla) bulunmasına neden olması size garip gelebilir; kuantum mekaniğinin uzak-erimli bağlantılılık özelliğinin daha büyük bir korelasyona neden olması gerektiğini düşünebilirsiniz. Aslındayledir de. Bu konuda düşünmenin bir yolu şöyle: bütün ölçümlerde yalnızca yüzde 50 korelasyonla kuantum mekaniği, soldaki ve sağdaki detektörlerin aynı yönü gösterecek şekilde seçtiği ölçümlerde yüzde 100 korelasyona ulaşır. Einstein, Podolsky

- ve Rosen'in yerel evreninde ise aynı eksenler seçildiğinde yüzde 100 korelasyon elde etmek için bütün ölçümlerde yüzde 55'ten daha büyük bir korelasyon gereklidir. O zaman, kabaca, yerel bir evrende, bütün ölçümlerde yüzde 50 korelasyon, aynı eksenler seçildiğinde yüzde 100'den daha *küçük* bir korelasyona -yani yerel olmayan kuantum evreninde bulunandan daha küçük bir korelasyona- yol açacaktır.
19. Anlık bir çöküşün ışık hızının koyduğu sınırı zorlaşacağını ve bu yüzden özel görellilikle çelişeceğini düşünüyor olabilirsiniz. Eğer olasılık dalgaları su dalgalarına benziyor olsaydı, haklı olacaktınız. Bir olasılığın devasa bir bölgede sıfıra düşmesi, Büyük Okyanustaki bütün suların dümdüz olması, hiç kıpırdamamasından çok daha şaşırtıcıdır. Ama kuantum mekaniğinin uygulamalarıyla ilgilenenler, olasılık dalgalarının su dalgaları gibi *olmadığını* ileri sürüyorlar. Her ne kadar maddeyi tanımıyor olsa da, bir olasılık dalgasının kendisi maddesel bir şey değildir. Işık hızı sınırı yalnızca maddesel cisimler için, hareketleri doğrudan görülebilen ve hissedilebilen şeyler için geçerlidir. Eğer bir elektronun olasılık dalgası Andromeda galaksisinde sıfıra düşmüşse, Andromeda'lı bir fizikçi, yalnızca yüzde 100 kesinlikle o elektronu saptayamayacak demektir. Andromeda'nın gözlemlerindeki hiçbir şey elektronun, diyelim New York'ta yüzde 100 kesinlikle bulunmasına ilişkin olasılık dalgasında ani bir değişikliğin ortaya çıkmasına neden olmaz. Elektronun kendisi bir yerden başka bir yere ışık hızından daha büyük bir hızla gitmedikçe, özel görellilikle bir çelişki söz konusu değildir. Görebileceğiniz gibi, tüm olup biten, elektronun New York'ta bulunduğu, başka bir yerde bulunmadığıdır. Hızı bu tartışmada söz konusu bile olmadı. O nedenle olasılığın anlık olarak çökmesi, bilmeceler ve problemler getiren bir yapı ise de (Bölüm 7'de üzerinde daha kapsamlı durulacak), özel görellilikle bir çelişkiye yol açması beklenmez.
20. Bu önerilerin bir bölümü için Tim Maudlin'in *Quantum Non-locality and Relativity* adlı kitabına bakabilirsiniz.

Bölüm 5

- Matematiğe eğilimli okuyucu için thareketli = $Y(t|u_{a\infty}, - (v/c^2)x_{[krs],in}$ denkleminin (Bölüm 3'ün 9. notunda incelendi) verilen biranda Chewie'nin şimdi-listesinin, yeryüzündeki gözlemcilerin $(v/c)x_{v(-,v,jzil}$ kadar erken olduğunu öne sürdükleri $(x_{vrv0})_{[1}$ Chewie'nin Dünyadan uzaklığıdır) olayları kapsadığını biliyoruz. Bu durumda Chewie'nin dünyadan uzaklaşmakta olduğu varsayılıyor. Dünyaya doğru olan hareket için v 'nin işareti ters olmalıdır ki bu durumda yeryüzündeki gözlemciler, olayın $(v/c)x_{v(-,rv0)/i}$ kadar sonra olduğunu öne süreceklerdir. Eğer $v=10$ mil/saat (yaklaşık 16 km/saat alınır ve $x_{v(-,rv0)/i} = 10''$ ışık yılı alınırsa, $(v/c)x_{v(-,rv0)/i}$ olarak yaklaşık 150 yıl bulunur.
- Chewie'nin yeryüzüne doğru olan hareketini betimleyen bu sayı ve birkaç paragraf ileride verilen sayı, kitabın basıldığı zaman geçerli olan sayılardır. Burada, yeryüzünde zaman geçtikçe doğruluktan biraz uzaklaşırlar.
- Matematiğe eğilimli okuyucu uzay-zamanı farklı açılarla dilimleme benzetmesinin, özel görellilik derslerinin *uzay-zaman diyagramları* bölümündeki normal kavramlar olduğuna dikkat etmelidir. Uzay-zaman diagramlarında, durağan olarak göz önüne alınan bir gözlemci için, verilen bir zamanda üç boyutlu uzayın tamamı yatay bir çizgiyle (veya daha ayrıntılı çizimlerde yatay bir düzlemle), zaman ise dikey bir eksenle gösterilir. (Kullandığımız benzetmede her "ekmek dilimi" -ki bunlar birer düzlemdir- tek bir anda uzayın tamamını simgeler. Burada ekmeğin somununun bir ucundan diğerine giden çizgi, zaman eksenidir.) Uzay-zaman diyagramları sizin ve Chewie'nin şimdi-dilimlerini kolayca kavramanıza yardımcı olan çizimlerdir. Açık renkli sürekli çizgiler Dünyaya göre hareketsiz olan gözlemcilerin eşit zaman dilimleridir (şimdi dilimleri) (kolaylık olsun diye dünyanın dönmediğini ve ivmeli bir hareket yapmadığını varsayıyoruz çünkü bunlar konuyla ilgisiz karmaşıklıklara neden olurlar), açık renkli kesikli çizgilerse dünyadan diyelim saatte 15 kilometre hızla uzaklaşan bir gözlemcinin eşit zaman dilimleridir. Chewie Dünya'ya göre



hareketsiz olduğundan öncekiler onun şimdi-dilimlerini (ve siz de bu hikaye boyunca Dünya da hareketsiz olduğunuzdan kalın çizgiler daima sizin şimdi-dilimlerinizi) temsil eder ve en koyu sürekli çizgi ise, Dünya'da 21. yüzyılda sizi (soldaki koyu nokta) ve onu kapsayan şimdi-dilimidir (soldaki koyu nokta), ikiniz de oturmakta ve okumaktasınız. Chewie Dünya'dan uzağa doğru yürümeye başlayınca, kesikli çizgi onun şimdi-dilimlerini, en koyu kesikli çizgi ise (yerinden kalkmış ve yürümeye başlamış olan) Chewie'yi ve John Wilkes Booth u (sol alttaki koyu nokta) gösterir. Dikkat ederseniz, sonraki kesikli çizgi zaman dilimlerinden biri Chewie'yi yürürken (hala bu civarda ise!) ve 21.yüzyıldaki sizi, hâlâ oturmuş okurken göstermektedir. Bu nedenle sizin tek bir anınız Chewie'nin şimdi-listelerinin ikisinde yer alır. Bunlardan biri yürümeye başlamadan önceki, diğeri ise yürümeye başladıktan sonraki listedir. Bu da basit, sezgisel *şimdi* kavramının -bütün uzaya uygulandığı düşünüldüğünde- özel görelilik aracılığıyla son derece alışılmadık özellikleri olan bir kavrama dönüştürüldüğü bir başka yolu gösterir³or. Dahası, bu şimdi-listeleri nedensellik kodlamaz: standart nedensellik (not 11 Bölüm 3) güçlü olarak kalır. Chewie'nin şimdi-listeleri sıçrar çünkü o da bir referans sisteminin diğeri sıçrar. Ama her gözlemci -tek, iyi tanımlı bir koordinat sistemi kullanan her gözlemci- diğerleriyle hangi olayların hangi olayları etkilediği konularında hemfikir olacaktır.

4. Bu konuları bilen okuyucu, Minkowski uzay-zamanı varsaydığımı anlayacaktır. Diğer geometrilere benzer bir çıkarım, zorunlu olarak bütün uzay-zamanı kapsamayacaktır.
5. *Albert Einstein and Michele Besso: Correspondence 1903-1955*, P. Speziali, ed. (Paris: Hermann, 1972).
6. Buradaki tartışma hemen *şimdiki* bir olayın, *şimdi* sahip olduğunuz anılarla birlikte, o anlara sahip olduğunuz hayatı yaşamış olduğunuz duygusuna nasıl temel oluşturduğunu ortaya koymak amacı güdüyor. Ama eğer, örneğin beyniniz ve vücudunuz bir şekilde şu andaki durumlarına sokulsaydı, böylesi olaylar hiç yaşanmamış ama beyninize yapay olarak yerleştirilmiş olsa bile, anılarınızın tanıklık ettiği yaşamış olduğunuz duygusuna sahip olurdu (yaşanan şeylerin temelini beynin ve vücudun fiziksel durumlarında bulunabileceğini varsayıyorum). Bu tartışmadaki bir basitleştirme, gerçekte beyin bir uyarı aldığı anda onu işlemek için kısa da olsa bir zamana ihtiyaç duymakta olsa da, tek bir anda olup biten şeyleri algılayabildiğimiz ya da hissedebildiğimiz varsayımdır. Doğru olsa bile, bunun anlatmaya çalıştığım

noktayla pek bir ilgisi yoktur; insanın yaşantısına doğrudan bağlı olan çözümleme zamanından kaynaklanan ilginç ama büyük ölçüde konuyla bağlantısız bir karmaşıklıktır. Daha önce incelediğimiz gibi, insan deneyimi içeren örnekler incelememizi daha temel ve insani hale getiriyor ama biyolojik örneklerin fiziksel örneklerden daha karmaşık olması, bakış açısının gözden kaçmasına da neden olabiliyor.

7. Bu bölümdeki tartışmalarımızın, Bölüm 3'teki uzay-zamanda ışık hızıyla hareket eden cisimlerle nasıl bağlantılı olduğunu merak edebilirsiniz. Matematiğe yatkın olmayan okuyucu için yaklaşık bir cevap şudur: bir cismin tarihi uzay-zamanda bir eğriyle -cismin orada olduğu anda her noktanın aydınlatıldığı uzay-zaman somununda bir yol- temsil edilir (Şekil 5.1'de görüldüğü gibi). Bu durumda uzay-zamanda "hareket etme" sezgisel kavramı "akışsız" bir dille, [bu yolun gözlerimizin önünde izlenmesinin tersine] bu yolu tanımlayarak ifade edilebilir. Bu yola ilişkin "hız" da, yolun (belirlenen bir noktadan diğerine olan) uzunluğunun, yolda, belirlenen bu noktalardan birinden diğerine giden birisi veya bir şey tarafından taşınan saatle ölçülen zaman farkına bölünmesiyle bulunur. Bu da zamanın akmasını içermeyen bir kavramdır: ilgili iki noktada saatin ne dediğine bakarsınız. *Herhangi bir hareket için bu yolla bulunan hız, ışık hızına eşit çıkar.* Matematiğe eğilimli okuyucu bunu hemen kavrayacaktır. Minkowski uzay-zamanında metrik $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$ dir. Burada $dx^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$ olarak yazılabilen Oklid uzaklığıdır, saatin taşıdığı zaman ise $dl^2 = ds^2/c^2$ olarak yazılabilir. Bu nedenle uzay-zamandaki hız, matematiksel olarak ds/dt olarak tanımlanır ki bu da eye eşittir.
8. Rudolf Carnap, *The Philosophy of Rudolf Carnap* daki "Autobiography", P. A. Schlipp, ed. (Chicago: Library of Living Philosophers, 1963), s. 37.

Bölüm 6

1. Burada sözü edilen asimetrisinin -zamanın oku- olayların zaman içinde oluş sırasından kaynaklandığına dikkat edin. Zamanın kendisindeki simetriteri de merak edebilirsiniz; örneğin sonraki bölümlerde göreceğimiz gibi, bazı kozmoloji kuramlarına göre, zamanın bir başlangıcı olabilir ama bir sonu olmayabilir. Bunlar farklı zamansal asimetri kavramlarıdır ve buradaki tartışmada biz ilk tür üzerine yoğunlaşacağız. Bu durumda bile, bölümün sonunda her şeyin zamandaki asimetrisinin evrenin tarihinin ilk dönemlerindeki özel koşullara dayandığını ve böylece zamanın okunun kozmolojinin özelliklerine bağlandığı sonucuna ulaşacağız.
2. Matematiğe eğilimli okuyucu için zaman-tersinme simetrisi ile neyin kastedildiğini daha kesin olarak açıklayayım ve bu bölümde incelediğimiz konulara ilişkin önemi henüz tam olarak açıklığa kavuşturulmamış olan, ilginç bir istisnai duruma dikkat çekeyim. Zaman-tersinme simetrisinin en basit kavramı şöyle ifade edilebilir: eğer, diyelim $S(t)$ denklemlerin çözümü olarak verildiğinde $S(-t)$ de çözüm ise, o zaman bu fizikyasalarının zaman-tersinir olduğunu söyleriz. Örneğin, kuvvetlerin parçacık konumlarına bağlı olduğu Newton mekaniğinde, eğer n sayıdaki parçacığın üç uzay koordinatındaki konumları $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ ise, bu durumda $x(t)$ 'nin $d^2x(t)/dt^2 = F(x(t))$ denkleminin çözümü olması, $x(-t)$ 'nin de Newton denklemlerinin çözümü olduğunu gösterir, j'ani $d^2x(-t)/dt^2 = F(x(-t))$ olur. Dikkat edilirse, $x(-t)$ parçacığın aynı $x(t)$ konumlarından ama ters sırada ve ters hızlarla geçtiği hareketi temsil etmektedir.

Daha genel olarak, bir dizi fizik3'ası bize, fiziksel bir sistemin bir t_0 zamanından bir başka $t+0$ anına evrilmesi için bir algoritma veriyor. Bu algoritmaya $S(t_0)$ değerini girdi olarak alıp $S(t+0)$ değerini üreten bir $U(t)$ işlemi olarak bakabiliriz. Yani $S(t+0) = U(t)S(t_0)$ olur. Bu durumda $U(t)$ değerini ortaya çıkaran yasalar, eğer $U(-t) = T^{-1}U(t)T$ ifadesini sağlayan bir T işlemi varsa, zaman-tersinir gözüyle bakarız. Bu denklemin anlamı şudur: verilen bir fiziksel sistemin bir andaki durumunu (T ile temsil ediliyor) kuramın yasalarına uygun bir şekilde, zamanda ileriye doğru t kadar değiştirerek evrilmesini sağlamak ($U(t)$ ile temsil ediliyor), sistemin zamanda geriye

doğru t birim evrilmesini sağlamakla eşdeğerdir ($U(-t)$ ile gösterilir). Örneğin, eğer bir parçacık sisteminin bir andaki durumunu parçacıkların konumları ve hızlarıyla belirlerseniz, T bütün parçacık konumlarını sabit tutar ve bütün hızları tersine çevirir. Böyle bir parçacık sistemini zamanda ileriye doğru t kadar evriltmek özgün parçacık sistemini zamanda geriye doğru t kadar evriltmekle eşdeğerlidir. (T^{-1} çarpanı hız ters çevirmesini geri alır, öyle ki, sonunda yalnızca parçacık konumları t zaman birimi önce nasıl idilerse öyle olmakla kalmaz, hızlar da öyle olur.)

Bazı özel yasa grupları için, T operasyonu Newton mekanikğinde olduğundan daha karmaşıktır. Örneğin, elektromanyetik bir alanın varlığı altında elektrik yüklü parçacıkların hareketlerini inceliyorsak, parçacık hızlarının ters çevrilmesi, denklemlerin, parçacıkların aynı yollar üzerinde hareket ettiği bir evrim ortaya çıkarma konusunda uygun olmayacaktır. Bunun için manyetik alanın yönünün de ters çevrilmesi gerekir. (Lorentz kuvvet yasası denklemindeki $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ teriminin aynı kalması için bu gereklidir.) Bu nedenle, bu durumda T operasyonu bu dönüşümlerden her ikisini de kuşatır. Bütün parçacık hızlarını tersine çevirmekten daha fazlasını yapmak zorunda olduğumuz gerçeğinin, metindeki incelemelerin hiçbirisi üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Önemli olan, bir yöndeki parçacık hareketinin, fizik yasalarıyla tam ters yöndeki parçacık hareketi kadar uygun olmasıdır. Bunu yapmak için manyetik alanı tersine çevirmek zorunda olmamızın bir önemi yoktur.

İşlerin karıştığı yer zayıf nükleer etkileşimlerdir. Zayıf etkileşimler özel bir kuantum alan kuramıyla tanımlanır (kısaca Bölüm 9'da açıklanmıştır) ve genel bir teorem kuantum alan kuramlarının (yerel ve Lorentz-değişmezli oldukları sürece) her zaman C (parçacıkları karşı-parçacıklarla değiştirir) ile gösterilen birleşik elektrik yükü konjugasyonu altında, P (konumları tersine çevirir) ile gösterilen parite ve zaman tersinmesi operatörü T (t yi $-t$ ile değiştirir) operasyonu altında simetridir. Bu nedenle T operasyonunu CPT çarpımı olarak tanımlayabiliriz ama T değişmezliği mutlaka CP operasyonunun kapsanmasını gerektiriyorsa, artık T basit bir biçimde aynı yollardan tekrar geçen parçacıklar olarak yorumlanamaz (çünkü, örneğin, parçacık kimlikleri böylesi T tarafından değiştirilir -parçacıklar kendi karşı-parçacıklarıyla değiştirilir- ve artık aynı yollardan geçenler özgün parçacıklar olmaz). Görüldüğü gibi, gelmek zorunda kaldığımız bu noktada bazı ilginç deneysel durumlar ortaya çıkıyor. Davranış biçimleri CPT altında değişmez olan ama yalnızca T altında değişmez olmayan belirli bazı parçacık türleri vardır (K -mezonu, B -mezonu gibi). Bu, 1964 yılında dolaylı olarak James Cronin ve Val Fitch ve çalışma arkadaşları tarafından gösterildi (Cronin ve Fitch bu çalışma nedeniyle 1980 Nobel Fizik Ödülünü aldılar). Cronin ve Fitch, K -mezonlarının CP simetrisini ihlal ettiğini (CPT simetrisini ihlal etmemek için T simetrisini ihlal etmesini sağlayarak) göstermişlerdi. Daha 3/akın tarihlerde T simetrisinin ihlali doğrudan CERN'deki CPLEAR deneyinde ve Fermilab'deki KTeV deneyinde gösterildi. Bu deneyler aşağı yukarı eğer size bu mezon parçacıkların rol aldığı süreçlerin kaydedildiği filmler verilmiş olsa, bu filmlerin düz mü yoksa ters mi oynatıldığını anlayabileceğinizi gösterir. Bir başka deyişle, bu özel parçacıklar geçmiş gelecekte ayırt edebilirler. Açıklığa kavuşmayan şeyse, bunun gündelik yaşamımızda hissettiğimiz zamanın oku ile bir ilgisinin olup olmadığıdır. Ne de olsa bunlar yüksek enerjili çarpışmalar sırasında çok kısa sürelerle ortaya çıkan egzotik parçacıklar olup bildiğimiz maddesel cisimlerin yapıtaşlarından değildir. Benim de aralarında bulunduğum pek çok fizikçiye göre, bu parçacıkların ortaya koyduğu zaman tersinmezliğinin değişmezliği, zamanın oku bilmecesine cevap bulma rolü oynar, o yüzden bu sıra dışı deneyi daha fazla irdelemeyeceğiz. Ama gerçek şu ki, bundan kimse tam olarak emin değil.

3. Bazen kırık yumurta kabuklarının gerçekten bir araya gelip yepyeni, kırılmamış bir yumurta oluşturacakları konusundaki kuramsal iddianın gönülsüzce kabul edildiğini görüyorum. Ama doğa yasalarının zaman-tersinme simetrisi, yukarıdaki notta ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, bunun olacağını söylüyor. Mikroskobik olarak bir yumurtanın kırılması, kabuğu oluşturan çeşitli moleküllerin içinde yer aldığı

fiziksel bir olaydır. Çatlaklar oluşur ve yumurta kırılır çünkü yumurtanın çarpması bir grup molekül diğerlerinden ayrılmaya zorlar. Eğer bu moleküller hareketler tersine çevrilirse, molekül grupları yeniden birleşir ve kabuğu önceki durumuna getirirler.

4. Bu konular üzerine düşünmenin modern yollarına odaklanmış olarak kalmak için, çok ilginç bir tarihi atıyorum. Boltzmann'ın entropi konusu üzerindeki kendi düşüncesi, James Clerk Maxwell, Lord Kelvin, Josef Loschmidt, Josiah Willard Gibbs, Henri Poincare, S. H. Burbury ve Ernest Zermelo ile olan etkileşim ve haberleşmenin etkili olduğu 1870'ler ve 1880'ler arasında önemli değişiklikler geçirmiştir. Aslında, Boltzmann başlangıçta, yalıtılmış bir fiziksel sistem için entropinin daima ve mutlak olarak azalmayan bir büyüklük olduğunu kanıtlayabileceğini düşünmüştü. Ama bu fizikçiler ve diğerleri tarafından yapılan itirazlar, sonradan Boltzmann'ın, konuya istatistiksel/olasılıkçı 3'aklaşımı vurgulamasına yol açtı. Bu yaklaşım günümüzde de kullanılıyor.
5. *Savaş ve Barış* romanının Constance Garnett tarafından İngilizceye çevrilen 1386 sayfalık Modern Library Classics basımını kullandığımı varsayıyorum.
6. Matematiğe eğilimli okuyucu, sayılar çok büyüyebileceği için, entropinin aslında olası yeniden düzenlemelerin sayısının logaritması olarak ifade edildiğine dikkat etmelidir. Bu ayrıntı burada bizi ilgilendirmiyor. Bununla birlikte, ilkesel bir nokta olarak bu, önemlidir çünkü entropinin *geniş* denilebilecek bir kavram olması son derece uygundur ki, bu da, eğer iki sistemi bir araya getirirseniz, bu birlikteliğin entropisi, sistemlerin tek tek entropilerinin toplamı olacak demektir. Böyle bir durumda yeniden düzenlemelerin sayısı sistemlerin yeniden düzenleme sayılarının çarpımı olacağından, bu yalnızca entropinin logaritmik biçimi için geçerlidir. Bu nedenle yeniden düzenleme sayılarının logaritmaları toplanabilir.
7. Her sayıların nereye düşeceğini *ilke olarak* bilebiliyor olsak da, sayfa düzenini ilgilendiren ek bir başka öge ile de ilgilenebilirsiniz: bu yapıları bir araya getirecek nasıl düzenli bir deste oluşturacağınız. Bu, burada işlenen fizikle ilgili olmamakla birlikte, eğer kafanıza takıldıysa, sizin yapıları tek tek, size en yakın olandan başlayıp toplayacağınız konusunda anlaştığımızı varsayın. (Ve örneğin, uzaklıkları da söz konusu yapıların en yakın köşesinden başlayarak ölçeceğiniz konusunda da anlaşabiliriz.)
8. Birkaç yaprağın bile hareketini sayfa düzenini öngörmeye yetebilecek kesinlikle hesaplamakta başarılı olmak (yukarıdaki notta olduğu gibi, bu yapıları bir deste halinde toplamak için bir algoritma kullandıktan sonra) aslında *son derece* iyimser davranmak olur. Yaprığın esnekliğine ve ağırlığına bağlı olarak, böyle oldukça "basit" bir hesap bile günümüz bilgisayarlarının hesaplama gücünün ötesinde olabilir.
9. Sayfa sırasının entropisi kavramıyla bir molekül kümesinin entropisi kavramı arasında temel bir fark olduğunu düşünebilirsiniz. Ne de olsa sayfa sırası kesiklidir; sayfaları tek tek sayabilirsiniz, o yüzden toplam olasılık sayısı büyük olabilir ama sonludur. Bunun tersine, tek bir molekülün bile konumu ve hareketi sürekli- tek tek sayamazsınız, o nedenle (en azından klasik fiziğe göre) sonsuz sayıda olasılık vardır. Öyleyse molekülün yeniden düzenlemelerinin tam sayısı nasıl hesaplanabilir? Kısa cevap şöyledir: Bu iyi bir sorudur ama tam olarak cevaplanmıştır; eğer endişenizi azaltacaksa, aşağıdaki mantığı izlemeye çalışın. Uzun cevapsa, biraz matematik bilgisi gerektirir, o nedenle bu bilgi olmaksızın anlatılacakları izlemek biraz zor olabilir. Fizikçiler klasik bir çok-parçacık sistemini tanımlamak için, 6N boyutlu bir *faz uzayı* (N sistemdeki parçacık sayısıdır) kavramını kullanırlar. Bu uzaydaki her nokta, bütün parçacıkların konum ve hızlarını simgeler (böyle her konum ve her hız üçer sayı gerektirir, uzayın 6N boyutu da buradan gelir). Burada temel nokta şudur: faz uzayı öylesi bölgelerde olabilir ki, verilen bir bölgedeki bütün noktalar genel olarak aynı yapı ve görünüşteki moleküllerin konum ve hızlarına karşılık gelebilir. Eğer moleküllerin dağılımı faz uzayının bir bölgesindeki bir noktadan aynı bölgedeki bir başka noktaya değiştirilirse, makroskobik olarak bu iki

dağılımın biri diğerinden ayırt edilemeyebilir. Şimdi, verilen bir bölgedeki noktaları saymak yerine -ki bu, farklı sayfa sıralarını (düzenlerini) saymanın en dolaysız benzeridir ama cevap kesinlikle sonsuz çıkacaktır- fizikçiler entropiyi faz uzayındaki her bölgenin *hacmi* cinsinden tanımlarlar. Daha büyük bir hacim, daha çok sayıda nokta, dolayısıyla daha yüksek entropi anlamına gelir. Bir bölgenin hacmi, isterse daha yüksek-boyutlu bir uzay bölgesi olsun, matematiksel olarak kesin bir biçimde tanımlanabilir bir şeydir. (Matematiksel olarak, ölçü (measure) olarak adlandırılan bir şey kullanılmasını gerektirir ve matematiğe eğilimli okuyucu için, bizim genellikle verilen bir makro durumun bütün mikro durumları üzerinde birörnek bir ölçü kullandığımızı not edeyim. Yani verilen bir makroskobik özellikler grubu ile her mikroskobik dağılım eşit oranda olası varsayılıyor.)

10. özel olarak bunun *olabileceği* bir yol biliyoruz: eğer birkaç gün önce CO₂ başlangıç olarak şişenin içindeyse, yukarıdaki tartışmadan biliyoruz ki, eğer hemen şimdi anlık olarak her CO₂ molekülünün ve CO₂ molekülleriyle herhangisi bir şekilde etkileşen bütün molekül ve atomların hızlarını anlık olarak ters çevirsek ve birkaç gün bekleysek, moleküller gene şişenin içinde *toplanır*. Ama bu hızların tersine çevrilmesi, kendi kendine olmak şöyle dursun, pratikte bizim de yapabileceğimiz bir şey değildir. Yine de matematiksel olarak, eğer yeterince uzun süre beklerseniz, CO₂ moleküllerinin kendiliklerinden *yollarını bulup, şişenin içine dolacağını* kanıtlayabileceğimizi söyleyebilirim. Fransız matematikçi Joseph Liouville tarafından 1800'lerde kanıtlanan bir sonuç, Poincare yinelenme teoremini kanıtlamakta kullanılabilir. Bu teorem, eğer uzun süre beklerseniz, sonlu bir enerjiye sahip olan ve sonlu bir hacme konmuş olan bir sistemin (kapalı bir odadaki CO₂ molekülleri gibi) *rasgele bir biçimde başlangıç durumuna döneceklerini* gösterir (bu durumda CO₂ moleküllerinin hepsi kola şişesine dolarlar). Sorun, bunun olması için ne kadar beklemek zorunda kalacağınızdır. Teorem, çok küçük sayıda bileşene sahip olan sistemler dışındaki bütün sistemler için, bu sistemlerin bileşenlerinin kendiliklerinden başlangıç durumlarına dönmeleri için evrenin yaşıdan çok daha uzun bir süre beklemek zorunda kalacağınızı gösteriyor. Yine de, ilke olarak, sonsuz sabır ve sonsuz ömürle, her uzaysal fiziksel sistem, başlangıçtaki durumuna dönecektir.
11. Bu durumda suyun neden buza dönüştüğünü merak edebilirsiniz çünkü bu durum, H₂O moleküllerinin daha düzenli olmalarıyla, yani daha yüksek değil, daha düşük entropiye ulaşmalarıyla sonuçlanıyor. Cevap kabaca şöyle: sıvı su katı buza dönüştüğünde, çevresine enerji verir (buz ergidiğinde tersi olur, çevreden enerji alır), bu da çevredeki entropiyi artırır. Yeterince düşük çevre sıcaklıklarında, yani 0 derece Celsius'un altında, çevresel entropideki artış, suyun entropisindeki azalmayı aşar, böylece donma, entropi açısından tercih edilen bir durum olur. Kışın soğuk günlerinde buz, bu nedenle oluşur. Benzer şekilde, buzdolabınızın buzluğunda buz küpleri oluştuğunda entropileri azalır ama buzdolabınızın kendisi çevreye ısı yayar ve bu da göz önüne alınırsa, entropide toplam olarak net bir artış var demektir. Matematiğe eğilimli okuyucu için çok daha kesin cevap, incelediğimiz kendiliğinden gelişen türde olayların *serbest enerji* tarafından yönetildiği şeklindedir. Sezgisel olarak serbest enerji, sistemin enerjisinin iş yapmakta kullanılabilecek olan bölümüdür. Matematiksel olarak F ile gösterilen serbest enerji, $F=U-TS$ olarak yazılabilir. Burada U toplam enerjiyi, T sıcaklığı ve S entropiyi simgeliyor. Bir sistem, eğer serbest enerjide bir azalmaya yol açıyorsa, kendiliğinden bir değişmeye uğrayacaktır. Düşük sıcaklıklarda sıvı suyun katı buza dönüşmesiyle bağlantılı olarak U'daki düşme S'deki azalmadan daha etkilidir (-TS'deki azalmadan daha etkilidir) o nedenle ortaya çıkacaktır. Yüksek sıcaklıklarda (0 derece Celsius'un üzerinde) buzdan sıvı suya ve buhara geçiş entropi açısından tercih edilir (S'deki artma U'daki düşüşten daha etkilidir) ve bu nedenle ortaya çıkacaktır.
12. Entropi mantığının düz uygulamalarının nasıl geçmişe ait güvenilir anılara ve kayıtlara yol açılmasıyla sonuçlandığının ilk incelemeleri için C. F. Von Weizsacker'in *The Unity of Nature* (New York: Farrar, Straus and Giroux, 1980),

- 138-146 (özgün olarak *Annalen der Physik* dergisinin 36. sayısında (1939) yılında yayımlanmıştır) bakabilirsiniz. Mükemmel bir çağdaş inceleme için bkz. David Albert *Time and Chance* (Cambridge, Mass.: Harvard University Pres, 2000).
13. Gerçekte, fizik 3'asaları zamanda ileri ve geri yönler arasında bir ayırım yapmadığı için, tam oluşmuş buz küplerinin yarım saat önce, saat 10:00'da ortaya çıkacağı açıklaması *kesinlikle* -entropi açısından- yarım saat sonra, 11:00'da küçük buz parçalarının birleşerek tam oluşmuş buz küplerine dönüşeceğinin öngörülmesi kadar saçma olurdu. Tersine, 10:00'da sıvı halinde olan suyun 10:30'da yavaş yavaş küçük buz parçalarına dönüşeceği açıklaması, saat 11:00'da bildiğimiz ve tam anlamıyla beklediğimiz bir şey olan, küçük buz parçalarının yavaşça ergiyeceğini öngörmek kadar anlamlıdır. 10:30'daki gözlem açısından bu son açıklama, zamansal olarak tam anlamıyla simetrik olup, dâha sonraki gözlemlerimizle uyum içindedir.
14. Dikkatli okuyucu, buradaki tartışmaya "erken dönemlerde" deyimi nedeniyle önyargıyla yaklaştığını düşünebilir çünkü zamansal asimetriyi işin içine sokan bu deyimdir. Burada anlatmak istediğim, daha kesin bir dille, zaman boyutunun (en azından) bir ucunda özel koşulların baskın gelmesinin gerekmesidir. Açıkça görüleceği gibi, özel koşullar düşük entropili bir sınır koşuluna yol açarlar. Ben de bu koşulun gerçekleştiği yönü "geçmiş" olarak adlandıracam.
15. Zamanın okunun düşük entropili bir geçmiş gerektirdiği düşüncesinin Boltzmann'a ve diğerlerine kadar giden uzun bir tarihi vardır; bu düşünce ayrıntılı olarak Hans Reichenbach'ın *The Direction of Time* (Mineola, N. Y.: Dover Publications, 1984) adlı kitabında incelenmiş olup Roger Penrose'un *The Emperor's New Mind* (New York: Oxford University Pres, 1989) s. 317ff adlı eserinde desteklenmiştir.
16. Dikkat edilirse, bu bölümdeki tartışmalarımızda kuantum mekanizini göz önüne almıyoruz. Stephen Hawking'in 1970 lerde gösterdiği gibi, kuantum etkileri göz önüne alındığında, kara deliklerden bir miktar ışınının sızmasına izin verilir ama bu, onların evrendeki en yüksek entropili cisimler olmalarını engellemez.
17. Burada akla gelebilecek doğal bir soru, entropi üzerinde etkili olan uzak bir gelecek baskısı olmadığını nereden bildiğimizdir. Cevap, bilmiyoruz şeklindedir ama bazı fizikçiler gelecekteki böylesi bir baskının bugün gözlediğimiz şeyler üzerindeki olası baskısını saptamak üzere bazı deneyler bile önermişlerdir. Entropi üzerindeki olası gelecek ve geçmiş baskılarını inceleyen ilginç bir inceleme için *Physical Origins of Time Asymmetry*, J. J. Halliwell, J. Perez Mercader, W. H. Zurek, eds. (Cambridge, Eng.: Cambridge University Pres, 1996) adlı kitapta Murray Gell-Mann ve James Hartle, "Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology" adlı makaleye ve aynı koleksiyonun 4. ve 5. bölümlerindeki diğer makalelere bakabilirsiniz.
18. Bu bölümde zamanın okundan söz ederken, zaman eksenini (herhangi bir gözlemcinin zaman eksenini) boyunca görünen bir zaman asimetrisi olduğu gerçeğini kastettik: zaman ekseninin bir yönü boyunca çok sayıda olaylar dizisi sıralanmıştır ama diğer yönde hiçbir olay yok gibidir. Yıllar boyunca, fizikçi ve felsefeciler bu olay dizilerini, zamansal asimetritelerinin, ilke olarak mantıksal açıdan bağımsız açıklamaları bulunabilecek olan alt-bölmelere ayırmışlardır. Örneğin, ısı sıcak cisimlerden soğuk cisimlere doğru akar, soğuk cisimlerden sıcaklara doğru akmaz; elektromanyetik dalgalar, yıldız ya da ampul gibi kaynaklardan dışarıya doğru yayılır, hiçbir zaman bu kaynaklara doğru gitmez; evren birörnek şekilde genişliyor gibi görünür, büzülüyor gibi görünmez ve geçmişi hatırlamamıza karşılık geleceği hatırlamayız (bunlar sırasıyla zamanın termodinamik, elektromanyetik, kozmolojik ve psikolojik okları olarak bilinir). Bütün bu olaylar zamansal olarak asimetriktr ama ilke olarak, zamanda asimetri özelliklerini tümüyle farklı fiziksel ilkeler nedeniyle kazanmışlardır. Pek çok kişinin de paylaştığı (ama diğerlerinin de paylaşmadığı) benim görüşüm, bir olasılıkla kozmolojik ok dışındaki bu zamanda simetrik olan olayların birbirlerinden temelde farklı olmadığı ve eninde sonunda aynı şekilde -bu bölümün sonundaki gibi- açıklanabileceği yolundadır. Örneğin, elektromanyetik ışınım, her ikisi

de Axiom denklemlerinin çözümü olmalarına rağmen neden dışarı doğru yayılan dalgalar şeklindedir de içeri doğru yayılan dalgalar şeklinde değildir? Çünkü evrenimiz, böylesi dışarı doğru yayılan dalgalar için düşük entropili, tutarlı ve düzenli kaynaklara sahiptir -bunlardan ikisinin adını vermemiz gerekirse, yıldızlar ve ampulleri örnek gösterebiliriz- ve bu düzenli kaynaklar da varlıklarını, ana metinde anlatıldığı gibi, evrenin doğumu sırasındaki çok daha düzenli koşullara borçludur. Zamanın psikolojik oku ile uğraşmak daha zordur çünkü insan düşüncesinin henüz anlamadığımız çok yaygın mikrofiziksel temelleri vardır. Ama sıra bilgisayarlara gelince -bir hesaba girişmek, onu tamamlamak ve kaydını tutmak, entropisel özellikleri çok iyi anlaşılmış olan bir süreçtir- çok ilerleme sağlanmıştır. (Charles Bennett, Roli Landauer ve diğerleri tarafından geliştirilen) bu süreç, termodinamiğin ikinci yasasının içine son derece sağlam bir şekilde oturur. Bu nedenle eğer insan düşüncesi bir hesaplama sürecine benzetilebilirse, benzer bir termodinamik açıklama da geçerli olabilir. Dikkat ederseniz evrenin büzülmediği, genişlediği konusundaki asimetri, şu anda incelemekte olduğumuz zamanın okundan mantıksal olarak farklı olsa da, bağlantılıdır. Eğer evrenin genişlemesi yavaşlayıp dursaydı ve büzülmeye dönmüşeydi, zamanın oku hâlâ aynı yönü gösterecekti. Evrenin genişlemesi tersine dönmüş olsa bile fiziksel süreçler (yumurtaların kırılması, insanların yaşlanması vb.) bildiğimiz yönde oluşmaya devam edecekti.

19. Matematığe eğilimli okuyucu için, böyle olasılıkçı bir cümle kurduğumuzda, özel bir olasılık ölçüsü varsaydığımıza dikkat edin: hemen şu an gördüğümüzle bağdaşan bütün mikro durumlarda bir örnek olan bir ölçü. Elbette, yeri geldiğinde kullanabileceğimiz başka ölçülerde var. Örneğin *Time and Chance*'de David Albert, *şu anda gördüğümüzle ve geçmiş hipotezi* -evrenin görünüşe göre düşük-entropili bir durumda başladığı gerçeği- adını verdiği bir hipotezle uyum içinde olan bütün mikro durumlarda bir örnek olan bir olasılık ölçüsünü savunur. Bu ölçüyü kullanarak, anılarımızca, kayıtlarımızca ve kozmoloji kuramlarımızca doğrulanan düşük-entropili geçmişle bağdaşanlar dışındaki tüm geçmiş göz önüne almaktan kurtuluruz. Bu düşünce şekline göre, düşük entropili evren konusunda olasılıksal hiçbir bilmece yoktur; varsayımsal olarak 1 olasılığımızla başladı. Olasılıksal bir bağlamda ifade edilmemiş oİSci da, evrenin neden böyle başladığı konusundaki dev bilmece, halen yerinde duruyor.
20. Bilinen evrenin erken dönemlerde düşük entropili olmasının nedeninin bugünkünden çok daha küçük boyutlu olmasından tırnaklandığını ve bu nedenle -tıpkı sayfa sayısı daha az olan bir kitap gibi- daha az sayıda yeniden düzenlemeye olanak verdiğini ileri sürme eğiliminde olabilirsiniz. Ama asıl nokta bu değildir. Küçük bir evren bile devasa bir entropi banndırabilir. Örneğin evrenimizin olası (ama çok düşük olasılıklı) bir kaderi, genişlemenin bir gün durması, tersine dönmesi ve büyük ezilme adı verilen bir olayla kendi üzerine çökmesidir. Hesaplamalar, çökme evresinde evrenin boyutları küçülüyor olsa bile, entropinin artmaya devam edeceğini göstermektedir. Bu da küçük boyutun düşük entropinin garantisi olmadığı anlamına gelir. Bölüm İI'de evrenin başlangıçtaki küçük boyutlarının, düşük entropili başlangıç konusunda şu andaki en iyi açıklamamızda bir rolü olmadığını göreceğiz.

Bölüm 7

1. Birbirleriyle karşılıklı olarak etkileşen üç ya da daha fazla sayıda cismin hareketlerinin klasik fizik denklemleri ile kesin bir biçimde çözülemeyeceği yaygın olarak bilinir. Bu nedenle büyük sayıdaki bir parçacık grubunun hareketleri konusundaki hesaplar klasik fizikte bile yaklaşık olmak zorundadır. Ama buradaki önemli nokta, yaklaşıklık konusunda temel bir sınırın olmamasıdır. Eğer dünya klasik fizik tarafından yönetiyor olsaydı, o zaman daha güçlü bilgisayarlarla ve konumlarla hızlar hakkında daha kesin başlangıç verileriyle, kesin sonuca daha çok yaklaşabilirdik.
2. Bölüm A un sonunda, Bell, Aspect ve diğerlerinin buldukları sonuçların parçacıkların

her zaman, bu özellikleri aynı anda hiçbir zaman belirleyemiyor olsak da, belirli konum ve hızlara sahip olmaları olasılığını bertaraf etmediği sonucuna ulaşmıştık. Üstelik kuantum mekaniğinin Bohm versiyonu bu olasılığı açıkça gerçekleştiriyor. Bu nedenle, her ne kadar bir elektronun ölçülünceye kadar belirli bir konuma sahip olmadığı yolundaki yaygın görüş, kuantum mekaniğine basmakalıp yaklaşımın standart bir özelliği ise de, kesin konuşmak gerekirse, kapsayıcı bir ifade olarak fazla güçlüdür. Bu bölümde ileride inceleyeceğimiz gibi, Bohm'un yaklaşımında parçacıklara olasılık dalgalarının "eşlik ettiği", yani Bohm kuramında her zaman parçacıkların ve dalgaların kullanıldığını, standart yaklaşımda ise parçacıklar veya dalgalar olarak özetlenebilecek olan tamamlayıcılığın kullanıldığını hatırlayın. Bu yüzden, aradığımız sonuç -yani eğer bir parçacığın zamanın her bir anında uzaydaki belirli bir noktadan geçtiğini açıkça söylersek (klasik fizikte yapacağımız gibi), geçmişin kuantum mekaniğe özgü tasvirinin eksik kalacağı- yine de doğrudur. Kuantum mekaniğine beylik yaklaşımda, verilen her anda parçacığın bulunmuş olabileceği pek çok diğer noktayı da göz önüne almamız gerekir oysa Bohm'un yaklaşımında "pilot dalgayı" yani başka pek çok konuma dağılmış olan bir cismi de işin içine katmak zorunda kalırız. (Konuya yakın okuyucu, her ne kadar Bohm'un kuramında ortaya çıkışı farklı ise de, pilot dalganın standart kuantum kuramındaki dalga fonksiyonu olduğuna dikkat etmelidir.) Sonsuz sayıdaki nitelendirmelerden kaçınmak için, aşağıdaki tartışma, beylik kuantum kuramının bakış açısından (en çok kullanılan yaklaşım) yapılacak, bu arada Bohm'un yaklaşımına ve diğer yaklaşımlara ilişkin kısa yorumlarda bulunulacaktır.

3. Matematiksel olmakla birlikte pedagojik bir yaklaşım için bkz. R. P. Feynman ve A. R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals* (Burr Ridge, Ill.: McGraw-Hill Higher Education, 1965).
- A. Fotonun bakış açısından bütün anlar aynı olduğu için totonun demet-bölücünden geçerken detektörün anahtarının hangi konumda olduğunu "bildiğini" ileri sürmek için Bölüm 3'te ışık hızında zamanın durduğu tartışmasını kullanabileceğinizi düşünüyor olabilirsiniz. Ama bu deneyler elektron gibi ışık hızından daha yavaş hareket eden diğer parçacıklarla da tekrarlandığında sonuç değişmiyor. Bu nedenle, bu bakış açısı temeldeki fiziğe ışık tutmaz.
5. Tartışılan deney düzeneği ve deneysel sonuçların doğrulanması için bkz. Y. Kim, R. Yu, S. Kulik, Y. Shih, M. Scully, *Phys. Rev. Lett.*, cilt. 84, no 1 s. 1-5.
6. Kuantum mekaniği, 1925'te Werner Heisenberg tarafından geliştirilen, farklı biçimdeki (matris mekaniği olarak bilinir) eşdeğer bir denklem üzerine de kurulabilir. Matematiğe eğilimli okuyucu için Schrödinger denklemi $H\psi(x,t)=i\hbar\partial\psi/\partial t$ olarak yazılabilir. Burada H Hamiltonian, ψ dalga fonksiyonu ve $\hbar$ Planck sabitini ifade eder.
7. Konuyu yakından bilen okuyucu, burada karışık bir noktayı örtbas ettiğimi fark edecektir. Parçacığın dalga fonksiyonunun Schrödinger denkleminin zaman-tersinir şekline çözüm olmasını sağlamak için, karmaşık eşleniğini almak zorundayız. Yani Bölüm 6'nın 2. notunda tanımlanan T operasyonu $\psi^*(x,t)$ dalga fonksiyonunu alır ve onu $H\psi^*(x,t)$ değerine götürür. Bunun metindeki tartışmaya bir etkisi yoktur.
8. Bohm aslında Prince Louis de Broglie'a kadar giden bir yaklaşımı yeniden keşfetmiş ve geliştirmiştir. O nedenle bu yaklaşım kimi zaman Broglie-Bohm yaklaşımı olarak bilinir.
9. Matematiğe eğilimli okuyucu için, Bohm'un yaklaşımı yapılandırma uzayında yerel olmakla birlikte gerçek uzayda *yerel değildir*. Gerçek uzayda bir noktada dalga fonksiyonunda olan bir değişiklik, başka, uzak noktalardaki parçacıklar üzerinde anında bir kuvvet uygular.
10. Ghiardi-Rimini-Weber yaklaşımı ve onun kuantum bağlantılılığının anlaşılmasına yönelik olağanüstü açıklıkta bir kaynak için bkz. J. S. Bell *Speakable and Unspeakeable in Quantum Mechanics* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993) kitabındaki "Are There Quantum Jumps?" bölümü.

11. Bazı fizikçiler bu listedeki denklemlerin, kuantum mekaniğinde önceki dönemlerden kaynaklanan kafa karışıklığının ilgisiz yan ürünleri olduğunu düşünüyorlar. Bu bakış açısına göre dalga fonksiyonu yalnızca (olasılık) hesaplarını yapabilmek için gerekli olan kuramsal bir araçtır ve dalga fonksiyonuna matematiksel gerçeklik dışında başka gerçeklik niteliği yüklenmemelidir (bu yaklaşım çoğu zaman dalga fonksiyonlarının gerçekte ne oldukları ve ne yaptıkları konularında fazla düşünmeden kuantum mekaniğini ve dalga fonksiyonlarını hesap yapmak amacıyla kullanmak üzerine kurulu olduğundan, zaman zaman "sus ve hesapla" yaklaşımı olarak adlandırılır). Bu temadaki bir başka çeşitleme, dalga fonksiyonlarının hiçbir zaman çökmediğini, ama çevresiyle olan ilişkileri nedeniyle öyle göründüğünü ileri sürer. (Bu yaklaşımın bir çeşidini yakında göreceğiz.) Bu görüşlere sempatiyle yaklaşıyorum ve aslında dalga fonksiyonlarının çökmesi kavramının eninde sonunda terk edileceğine kuvvetle inanıyorum. Ama oraya "bakmadığımız" zaman ne olup bittiği konusundaki kavrayışımı değiştirmeye hazır olmadığım için ilk yaklaşımı doyurucu bulmuyorum, ikinci yaklaşımsa -bana göre doğru yönde olmakla birlikte- matematiksel olarak daha çok geliştirilmeye muhtaç. Buradaki önemli nokta, ölçümün bir şeyin dalga fonksiyonunun çökmesine veya çökmeye benzer bir şey yapmasına neden olduğudur. Ya çevrenin etkisinin daha iyi anlaşılmasıyla veya henüz ortaya atılmamış bir başka yaklaşımla görünen etki açıklanmaya çalışılmalı, yok sayılmamalıdır.
12. Birçok Dünya yorumuna ilişkin olarak, açıkça görülen saçmalığının ötesinde de garip konular vardır. Örneğin, her gözlemcinin, ölçümleri o olasılıklara maruz kalan sonsuz sayıda kopyasının olması bağlamında olasılık kavramını tanımlamanın bazı teknik güçlükleri vardır. Eğer belirli bir gözlemci, birçok kopyadan yalnızca biri ise, onun şu veya bu sonucu ölçme olasılığı bulunduğunu hangi anlamda söyleyebiliriz? Gerçekten "o" kimdir? Gözlemcinin her kopyası, içinde bulunduğu evren kopyasında ortaya çıkan hangi sonuçsa onu -1 olasılıkla- ölçecektir, o nedenle Birçok Dünya yapısında bütün olasılık yapısına yakından dikkatle bakmakta yarar var. Üstelik daha da teknik bir not olarak, matematiğe eğilimli okuyucu, Birçok Dünyanın nasıl tanımlandığına bağlı olarak, tercihli bir temelin seçilmesi gerektiğini kavrayacaktır. Bu sorular üzerinde çok tartışılmış ve çok şey yazılmış olmasına rağmen şimdiye kadar evrensel bir biçimde kabul gören bir çözüm bulunamamıştır. Yakında anlatılacak olan tutarsızlık üzerinde temellenen bu yaklaşım, bu konulara çok ışık tutmuş ve temel seçimi konusuna özel bir kavrayış getirmiştir.
13. Bohm ya da de Broglie yaklaşımı hiçbir zaman yaygın bir ilgi görmedi. Bunun belki de bir nedeni John Bell'in *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics* kitabında yar alan "The Impossible Pilot Wave" makalesinde işaret ettiği gibi, ne de Boglie'un, ne de Bohm'un geliştirdikleri şeye önem vermemeleri olabilir. Ama yine Bell'in işaret ettiği gibi, de Broglie-Bohm yaklaşımı, standart yaklaşımın belirsizliğini biraz olsun ortadan kaldırmıştır. Başka bir nedenden dolayı olursu bile, yaklaşım yanlış bile olsa, parçacıkların her zaman kesin konumlara ve hızlara sahip olabileceklerini ve hâlâ standart kuantum mekaniğinin bütün hesaplarıyla -belirsizlikle ve her şeyle- tutarlı olabileceklerini (ölçüm yeteneklerimizin ilke olarak bile olsa dışında olanlar) bilmek kayda değer. Bohm'un yaklaşımına karşı ileri sürülen bir başka şey, bu yapıdaki yerel olmama özelliğinin standart kuantum mekaniğinden daha "ciddi" olmasıdır. Bununla Bohm yaklaşımının, kuramın temel elemanı olarak yerel olmayan etkileşimleri (dalga fonksiyonları ile parçacıklar arasında) aldığı, oysa kuantum mekaniğinde yerel olmayışın çok daha derinlere gömülü olduğu ve yalnızca birbirinden çok uzaktaki ölçümlerde yerel olmayan korelasyonlar aracılığıyla ortaya çıkıyor olması kastediliyor. Ama bu yaklaşımın destekçileri, bir şeyin gizli olmasının onun varlığını daha az hale getirmeyeceğini, üstelik kuantum ölçüm probleminde -yerel olmayışın kendini gösterdiği yer- standart yaklaşım belirsizlik taşıdığı için, bir kere konu açıklığa kavuştuğunda, yerel olma3mşın artık gizli olmayacağını ileri sürmüşlerdir. Diğerleri, her ne kadar bu ko-

nuda da bazı ilerlemeler kaydedilmiş olsa da (örneğin, John Bell in yukarıda sözü edilen toplu cildinde *Beables for Quantum Theory* adlı çalışmaya bakınız) Bohm'un yaklaşımının görelî versiyonunun yapılmasının karşısında engeller olduğunu ortaya attılar. Kuantum mekaniğinin kaçınılmaz olarak ortaya koyduğu aceleci sonuçları önlemek için bile olsa, bu alternatif yaklaşımı aklıda tutmaya değer. Matematığe eğilimli okuyucular için, Böhm kuramı hakkında çok güzel bir çalışma ve kuantum bağlantılı olma problemine ilişkin konular Tim Maudlin'in *Quantum Non-locality and Relativity* (Madien, Mass.: Blackwell, 2002) adlı kitabında bulunabilir.

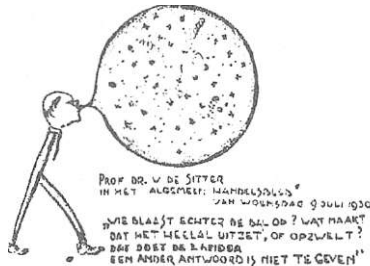
14. Zamanın okunun genelde teknik ama derinlemesine bir incelemesi ve özellikle tutarsızlık kavramının rolü için bkz. H. D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time* (Heidelberg: Springer, 2001)
15. Dağılmanın ne kadar çabuk ortaya çıktığı -çevresel etkinin kuantum girişimini bastırarak kuantum olasılıklarını bildiğimiz, klasik olasılıklara dönüştürmesi- konusunda bir fikir sahibi olmanız için, aşağıda seçtiğim bazı örnekler yararlı olabilir. Sayılar yaklaşıktır ama verdikleri mesaj açıktır. Odanızdaki havada bulunan ve sürekli olarak hareket eden hava moleküllerinin çarpmakta olduğu bir toz taneciğinin dalga fonksiyonu bir saniyenin yaklaşık olarak milyar kere milyar kere milyar kere milyarda biri kadar bir sürede (10-36 saniye) dağılacaktır. Eğer bu toz taneciği havası boşaltılmış bir bölmede tutulur ve yalnızca güneş ışığının etkilerine maruz kalırsa, dalga fonksiyonu biraz daha yavaş dağılacak, bu dağılma, saniyenin bin milyar kere milyarda biri (10-21 saniye) kadar sürecektir. Eğer bu toz taneciği boş uzayın derinliklerinde olup yalnızca mikrodalga fotonlarının çarpmalarına maruz kalırsa, dalga fonksiyonunun dağılması, saniyenin yaklaşık olarak milyonda biri kadar bir zaman alacaktır. Bu sayılar çok küçük olup, toz taneciği gibi çok küçük bir şeyin bile dalga fonksiyonunun çok hızlı bir şekilde dağılacağını gösteriyor. Daha büyük cisimler için dağılma çok daha hızlıdır. Evrenimizin bir kuantum evreni olmasına rağmen dünyanın bizim gördüğümüz gibi olmasının nedeni budur. (Bkz. E. Joos, *Decoherence: Theoretical, Experimental and Conceptual Problems* Ph. Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O Stamatescu, eds. [Berlin: Springer, 2000]) kitabındaki "Elements of Environmental Decoherence" bölümü.

Bölüm 8

1. Daha kesin konuşmak gerekirse, Connecticut yasaları ile New York yasaları arasındaki simetri hem yer değiştirme, hem de dönme simetrisini kapsar. New York'ta gösteri yaptığınızda, yalnızca Connecticut'taki yerinizi değiştirmiş olursunuz, büyük olasılıkla gösterinizi antrenmanda olduğundan farklı bir yöne doğru (belki de kuzey yerine doğuya doğru) yaparsınız.
2. Newton'un hareket yasaları genelde "ivmelenmeyen" gözlemciler için geçerlidir ama böyle gözlemcilerin nasıl belirlendiği konusuna yakından bakıldığında, bir sonuçta ulaşamayacağımız gibi görünür: ivmelenmeyen gözlemciler Newton yasalarının geçerli olduğu gözlemcilerdir. Olup bitenler konusunda düşünmenin iyi bir yolu şudur: Newton yasaları bizim dikkatimizi büyük ve özel olarak önemli bir gözlemci sınıfına çeker. Hareket tarifleri Newton'un kurduğu yapıya tümüyle ve sayısal olarak uyarlar. Bunlar, tanım olarak ivmelenmeyen gözlemcilerdir. İşlemsel olarak ivmelenmeyen gözlemciler, üzerlerine herhangi bir kuvvetin etki etmediği, yani ivme hissetmeyen gözlemcilerdir. Einstein'ın genel görelliği, bundan farklı olarak hareket durumundan bağımsız olarak bütün gözlemcilerle uygulanır.
3. Eğer *bütün* değişimlerin durduğu bir dönemde yaşıyor olsaydık, zaman geçtiğini hissetmezdik (bütün vücut ve beyin fonksiyonları da donmuş olurdu). Ama bunun Şekil 5.1'deki uzay-zaman bloğunun sona mı geldiği, yoksa zaman eksenini boyunca hiçbir değişim olmaksızın devam mı ettiği -yani zaman sona gelmiş mi olduğu yoksa bir tür resmi, kendi üzerine kapanan bir yapıda varlığını hâlâ devam mı ettirdiği- hem cevaplaması zor, hem de ölçebileceğimiz veya yaşayabileceğimiz şeylerle büyük ölçüde ilgisiz olan, varsayımsal bir sorudur. Dikkat edilirse bu varsayımsal durum,

entropinin artık daha fazla artmadığı, gaz moleküllerinin oraya buraya gidişi gibi mikroskobik hareketlerin hâlâ var olduğu, en büyük düzensizlik durumundan farklıdır.

4. Kozmik mikrodalga ışınımı 1964 yılında, uydu haberleşmelerinde kullanılan büyük bir anteni denedikleri sırada Bell Laboratuvarı'nda çalışan Robert Wilson ve Arno Penzias tarafından bulunmuştur. Penzias ve Wilson, bir türlü gideremedikleri bir parazitle karşılaşmışlar (paraziti giderebilmek amacıyla antenin içindeki kuş pisliklerini -beyaz parazit- bile temizlemişlerdi) ve sonunda Princeton'daki Robert Dicke'nin kilit önemdeki görüşleri ve onun öğrencileri olan Peter Roll ve David Wilkinson ile birlikte Jim Peebles'in katkılarıyla, sonunda antenin Büyük Patlama sırasında üretilen mikrodalga ışınımını aldığı anlaşıldı. (Sahneyi bu keşfe hazırlayan önemli çalışmalar, daha önceleri George Gamow, Ralph Alpher ve Robert Herman tarafından yapılmıştı.) İlerideki bölümlerde daha ayrıntılı olarak incelediğimiz gibi, bu ışınım, evrenimizin 300 000 yaşında olduğu zamanki saf bir görüntüsünü verir. Bu, elektron ve proton gibi ışık ışınlarının hareketlerini engelleyen elektrik yüklü parçacıkların bir araya gelerek, elektriksel olarak yüksüz olan ve ışık ışınlarının serbestçe hareket etmesine izin veren atomları oluşturmalarına izin verdikleri dönemdi. O günden beri, bu çok eski ışık -evrenin ilk dönemlerinde üretilmiştir- bir engelle karşılaşmadan yayılıyor ve günümüzde uzayın tamamını mikrodalga fotonlarıyla dolduruyor.
5. Burada işin içine giren fiziksel olay, Bölüm 11 de anlatıldığı gibi, kırmızıya kayma olarak bilinir. Hidrojen ve oksijen gibi yaygın olarak bulunan atomlar, laboratuvar deneyleriyle son derece kesin bir biçimde belirlenmiş olan dalga boylarında ışık yayarlar. Tıpkı uzaklaşmakta olan polis arabasının sireninin uzun dalga boylarına kayması nedeniyle sesin tizliğinin azalması gibi, uzaklaşmakta olan galaksilerde bulunan bu atomların ışımaları da uzun dalga boylarına kayar. Çıplak gözle görülebilen en uzun dalga boyu ışık kırmızı olduğu için, buna kırmızıya kayma etkisi adı verilir. Kırmızıya kayma miktarı uzaklaşma hızıyla artar, bu nedenle alınan ışığın dalga boylarını ölçüp laboratuvarda ölçülen dalga boylarıyla karşılaştırarak uzaktaki cisimlerin hızları ölçülebilir. (Bu aslında Doppler etkisine benzer olan bir tür kırmızıya kaymadır. Kırmızıya kayma kütleçekiminden de kaynaklanabilir: Kütleçekimi alanlarından kurtulmaya çalışırken fotonların dalga boyları uzar.)
6. Daha kesin bir dille söylemek gerekirse, matematiğe eğilimli okuyucu, kütle m olan ve yarıçapı R , yoğunluğu ise ρ olan bir kürenin üzerinde bulunan bir parçacığın hissedeceği ivme olan d^2R/dt^2 değerinin, $(47C/3)R^2Gp/R^3$ olduğunu, bu nedenle $(1/R)d^2R/dt^2 = (47C/3)Gp$ olduğunu fark edecektir. Eğer R 'yi evrenin yarıçapı olarak ve ρ 'yu evrendeki maddenin yoğunluğu olarak alırsak, bu Einstein'ın evrenin nasıl evrildiğini gösteren formülüdür (basınç yok sayıldığında).
7. Bkz. P. J. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton: Princeton University Press, 1993), s. 81.



Resim altında şöyle yazıyor: "Ama aslında bu balonu şişiren kim? Evrenin şişmesine ve genişlemesine sebep olan ne? Bunu yapan bir lamda! Başka bir cevap verilemez." (Koenraad Schalm tarafından çevrilmiştir.) Lamda, Bölüm 10'da karşılaşacağımız bir fikir olan kozmoloji sabiti adı verilen bir kavramı simgeliyor.

8. Kafa karışıklığından kaçınmak için, bozuk para modelinin bir eksikliğinin, bütün bozuk paralar birbirinin aynı iken bütün galaksilerin birbirinin aynı olmadığını not edelim. Ama buradaki düşünce, en büyük ölçeklerde -100 milyon ışık yılı mertebesindeki ölçeklerde- galaksiler arasındaki farklılıkların ortalama olarak ortadan kalktığına ve dev uzay hacimleri incelendiğinde, böylesi her hacmin özelliklerinin diğer benzer hacimlerle son derece benzer olduğuna inanılmasıdır.
9. Bir kara deliğin dış kenarına kadar çıkıp orada kalabilirsiniz. Bu sırada roketleriniz, kara deliğin merkezine düşmemeniz için çalışıyor olacaktır. Kara deliğin güçlü kütleçekimi alanı kendini uzay-zamanın eğrilmesi olarak gösterir ve bu da, sizin saatinizin, galaksinin daha sıradan bir başka yerinde (göreceli olarak boş bir uzay bölümünde) olduğundan çok daha yavaş çalışmasına neden olur. Burada da sizin saatinizle ölçülen zaman, son derece geçerlidir. Ama uzayda yüksek hızlarla hareket ederken olduğu gibi, bu da tam anlamıyla bireysel bir perspektiftir. Evrenin bir bütün olarak özellikleri incelendiğinde, geniş bir uygulanabilirliği olan ve üzerinde anlaşılmış olan bir "geçen zaman" kavramının kullanılması daha yararlıdır. Uzayın kozmik genişlemesi ile birlikte akan ve daha yumuşak, ortalama bir kütleçekimi alanının etkisi altında kalan saatler işte bu zamanı verirler.
10. Matematığe eğilimli okuyucu ışığın uzay-zaman metriğinin, $ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$ şeklinde hareket eden koordinatlar olmak üzere, $ds^2 = dt^2 - a^2(t)(dx^2)$ olarak yazılabilen boş bir jeodeziği üzerinde hareket ettiğine dikkat etmelidir. Boş bir jeodezik için uygun olduğu gibi, $ds^2 = 0$ olduğunda, t anında yayılan ışığın t_0 anına kadar aldığı toplam yol için $J^{\mu\nu}(dt/da(t))$ yazılabilir. Eğer bunu ölçek çarpanının t_0 anındaki değeri olan $a(t)$ ile çarparsak, ışığın bu aralıkta kat ettiği toplam fiziksel uzaklığı bulmuş oluruz. Bu algoritma, ışığın verilen zaman aralığında ne kadar uzaklık kat ettiğini hesaplamak için yaygın olarak kullanılabilir ve uzayda verilen iki noktanın, örneğin, nedensellik bağı ile bağlı olup olmadığını ortaya çıkarır. Görebileceğiniz gibi, ivmeli genişleme için, t_0 çok büyük olsa bile, integral sınırlıdır ki bu da ışığın hiçbir zaman uzakta, birlikte hareket eden noktalara ulaşamayacağını gösterir. Bu nedenle, ivmeli olarak genişleyen bir evrende, hiçbir zaman haberleşemeyeceğimiz noktalar ve buna karşılık olarak, bizimle hiçbir zaman haberleşemeyecek olan noktalar vardır. Böyle noktaların bizim kozmik ufukumuzun ötesinde olduğu söylenir.
11. Geometrik biçimleri çözümlerken, matematikçi ve fizikçiler, eğrilğe ondokuzuncu yüzyılda geliştirilmiş olan bir yaklaşımı kullanırlar ki, bu matematiksel yaklaşım günümüzde diferansiyel geometri olarak bilinir. Bu eğrilik ölçüsü konusunda teknik olmayan bir şekilde düşünmenin yolu, ilgilenilen şekiller üzerine çizilmiş olan üçgenleri incelemektir. Eğer üçgenin açılarının toplamı, düz bir masa üzerine çizildiğinde olduğu gibi, 180 derece'ye eşit oluyorsa, o zaman şeklin düz olduğunu söyleriz. Ama eğer bu açılarının toplamı, üçgenin bir küre üzerine çizildiğinde olduğu gibi 180 dereceden fazlaysa (kürenin dışbükey eğrilği açılarının toplamının 180 dereceden fazla olmasına neden olur) veya eğer şekli üzerine çizildiğinde olduğu gibi, 180 dereceden azsa (eğer şeklinin içeri doğru çöküklüğü yani içbükey eğrilği açılarının toplamının 180 dereceden az olmasına neden olur) şeklin eğri olduğunu söyleriz. Bu durum Şekil 8.6'da gösteriliyor.
12. Eğer bir torus şeklinin iki dikey kenarını birbirine yapıştırırsanız (ki bu, mantıklıdır çünkü bu kenarlardan birinden geçerseniz, diğer tarafta yeniden ortaya çıkarsınız) bir silindirik elde edersiniz. Daha sonra aynı şeyi alt ve üst kenarlar için yaparsanız bir donut şekli elde edersiniz. Bu nedenle donut, torus hakkında düşünmenin veya onu temsil etmenin bir başka yoludur. Bu temsil şeklindeki bir karmaşıklık, donut şeklinin artık düz görünmemesidir! Bununla birlikte, aslında öyledir. Önceki notta verilen eğrilik kavramını kullanırsanız, donut üzerine çizilen tüm üçgenlerin iç

açılarının toplamının 180 derece olduğunu görürsünüz. Donut şeklinin eğri görünmesi, iki boyutlu şeklin üç boyutlu dünyamıza adapte edilmesinin sonucudur. Bu nedenle şu anki bağlamda, metinde incelendiği gibi, iki ve üç boyutlu torusların eğrilmemiş örneklerini kullanmak daha yararlıdır.

13. Dikkat ederseniz, şekil ve eğrilik kavramlarını birbirinden ayırt ederken gevşek davrandık. Tümünüyle simetrik uzayda üç tür *eğrilik* vardır: pozitif, sıfır ve negatif. Ama iki şekil aynı eğrilığa sahip oldukları halde birbirlerine benzemeyebilir. Bunun en basit örneği, düz video ekranı ve sonsuz bir masa yüzeyidir. Böylece simetri uzayın eğrilliğini üç olasılığa düşürmemize izin verir ama uzayın bu eğrilikleri gerçekleştiren (ve matematikçilerin genel olarak adlandırdıkları özelliklerle birbirlerinden ayrılan) üçten fazla şekli vardır.
14. Şimdiye kadar, açıkça üç boyutlu uzayın eğriligi üzerine -uzay-zaman somunun-daki uzaysal dilimlerin eğriligi- odaklanmıştık. Bununla birlikte, göz önünde canlandırması zor olsa da, uzaysal eğrilğin her üç durumunda da (pozitif, sıfır, negatif) dört- boyutlu uzay-zamanın tamamı eğridir, evrenin giderek Büyük Patlamaya yakın zamanlarını incelediğimizde de bu eğrilik derecesi giderek artar. Gerçekten hemen Büyük Patlama anının civarında uzay-zamanın dört boyutlu eğriligi o kadar artar ki, Einstein'ın denklemleri çöker. Bunları ilerideki bölümlerde daha derinlemesine inceleyeceğiz.

Bölüm 9

1. Eğer sıcaklığı çok daha fazla arttırırsanız, atomların bileşen parçacıklarına ayrıldığı, maddenin *plazma* adı verilen dördüncü hali ortaya çıkar.
2. Rochelle tuzları adı verilen, yüksek sıcaklıklarda daha düzensiz, düşük sıcaklıklarda daha düzenli olan -ki normal olarak tersini bekleriz- ilginç bileşikler vardır.
3. Kuvvet ve madde alanları arasındaki bir fark, Wolfgang Pauli'nin *dışlama ilkesi* ile ifade edilir. Bu ilke, devasa sayıda kuvvet parçacığı (foton gibi) bir araya gelerek Maxwell gibi kuantum öncesi bir bilim insanının erişemediği, karanlık bir odaya girip ışığı yaktığınızda görebileceğiniz alanları üretirken, madde parçacıkları genelde kuantum fiziği yasaları tarafından böylesi tutarlı ve örgütlü bir işbirliğinden dışlanır. (Daha doğrusu, iki elektron gibi, aynı türden iki parçacık aynı durumda olamaz ama fotonlar için böyle bir sınırlama yoktur. Bu yüzden madde alanlarının genelde makroskobik, klasik benzeri görünüşleri yoktur.)
4. Kuantum alan kuramı yapısında bilinen her parçacığa, o parçacık türünün ilgili olduğu alandaki bir uyarılma gözleriyle bakılır. Fotonlar foton alanındaki -yani elektromanyetik alan- uyarımlardır; bir yukarı-kuark, yukarı-kuark alanındaki bir uyarılmadır; bir elektron, elektron alanındaki bir uyarılmadır vb. Bu şekilde, maddenin tamamı ve bütün kuvvetler birörnek bir kuantum mekaniği diliyle tanımlanabilir. Kilit bir problem, kütleçekiminin bütün kuantum özelliklerinin bu dilde tarif edilmesinin çok güç olduğunun kanıtlanmış olmasıdır. Bu konuyu Bölüm 12'de inceleyeceğiz.
5. Her ne kadar Higgs alanı adını Peter Higgsden alıyorsa da, bu alanın fiziğe girmesinde ve kuramsal gelişiminde başka fizikçilerin de -diğerlerinin yanı sıra Thomas Kibble, Philip Anderson, R. Brout ve François Englert'in- büyük katkıları olmuştur.
6. Bir alanın *değerinin*, onun kâsenin merkezine olan uzaklığıyla belirlendiğini aklınızdan çıkarmayın. Bu yüzden, değeri kâsenin vadisinde iken ahin *sıfır* enerjije sahip olsa bile (vadinin üzerindeki yükseklik alanın enerjisini temsil ettiğinden), değeri sıfır değildir.
7. Metindeki tarifile Higgs alanının değeri, kâsenin merkezine olan uzaklığıyla verilir, bu yüzden nasıl olup da kâsenin çembersel vadisindeki noktaların -ki bunlar kâsenin merkezine eşit uzaklıktadır- *ayrı* olmayan Higgs değerlerine yol açtığını merak ediyor olabilirsiniz. Cevap, matematiğe eğilimli okuyucu için, vadideki farklı noktaların aynı büyüklükte ama farklı evrede (fazda) Higgs alanı değerlerini temsil ediyor olmasıdır (Higgs alan değeri karmaşık bir sayıdır).

8. İlke olarak, fiziğe giren iki kütle kavramı vardır. Biri metinde verilen kavramdır: cismin ivmelenmeye direnen özelliği olarak kütle. Kimi zaman bu kütle kavramına *süredurumsal kütle* (*inertial mass*) adı verilir, ikinci kütle kavramı kütleçekimi ile ilgilidir: cismin, verilen bir büyüklüğe sahip olan bir kütleçekimi alanı tarafından (örneğin yerkürenin kütleçekimi alanı) ne kadar büyük bir kuvvetle çekileceğini belirleyen özelliğidir. Kimi zaman bu kütle kavramına *kütleçekimsel kütle* adı verilir. İlk bakışta Higgs alanı yalnızca süredurumsal kütlelerin anlaşılması ile ilgiliymiş gibi duruyor. Ama genel göreliliğin eşdeğerlik ilkesi, ivmeli hareketten kaynaklanan ve kütleçekiminden kaynaklanan kuvvetlerin birbirinden kesinlikle ayırt edilemez olduğunu -bunların birbirlerine eşdeğer olduğunu- ileri sürer. Bu da, süredurumsal kütle ile kütleçekimsel kütlelerin birbirlerine eşdeğer olması demektir. Einstein'a göre bunlar aynı olduklarından, Higgs alanı söz ettiğimiz her iki kütle türüyle de ilgilidir.
9. Bu tarifi, İngiltere Bilim Bakanının 1993'te İngiltere fizik topluluğuna meydan okumasına cevap olarak, Profesör David Miller'in, neden vergi mükelleflerinin paralarının Higgs parçacığının aranmasına harcanması gerektiği yolundaki konuşmasında kullandığı ödül kazanmış benzetmenin bir çeşitlemesi olduğuna dikkat çektiği için Raphael Kasper'a teşekkür ederim.
10. Matematiğe eğilimli okuyucu, fotonlarla W ve Z parçacıklarının elektrozayıf kuramda $SU(2) \times U(1)$ grubunun eklenik gösterimleri olduğuna, bu nedenle bu grubun bir eylemi olarak birbirleriyle değiştirildiklerine dikkat etmelidir. Üstelik, elektrozayıf kuramın denklemleri bu grup eylemi altında tam olarak simetriktrik ve işte bu anlamda biz kuvvet parçacıklarını birbirleri ile ilişkili olarak tanımlıyoruz. Daha kesin bir dille konuşmak gerekirse, elektrozayıf kuramda foton, açık $U(1)$ simetrisinin ayar bozonu ve $SU(2)$ grubunun $U(1)$ alt grubunun özel bir karışımıdır ve bu yüzden zayıf ayar bozonları ile sıkı sıkıya bağlantılıdır. Bununla birlikte, simetri grubunun çarpan yapısı nedeniyle, dört bozon (gerçekte birbirinin tersi elektrik yüklerine sahip olan iki W bozonu vardır) bunun eylemi altında tam olarak karışmaz. Bu durumda, bir anlamda zayıf ve elektromanyetik etkileşmeler, olabileceği kadar birleşmemiş tek bir nütematiksel yapının parçalarıdır. Kuvvetli etkileşmeler de hesaba katıldığında, grup bir $SU(3)$ çarpanı ile $-SU(3)$ "rengi" ile- zenginleşir ve bu grubun bağımsız üç çarpanı olması, $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ yalnızca tam bir birlik yokluğunu vurgular. Büyük birleştirme motivasyonunun bir sonraki alt bölümde işlenen parçası budur: büyük birleştirme, kuvvetleri daha yüksek enerji ölçeklerinde tanımlayan tek, yarı-basit (Lie) grubunun -tek çarpanlı bir grup- peşindedir.
11. Matematiğe eğilimli okuyucu, Georgi ve Glashow'un büyük birleşik kuramı $SU(3)$ u, güçlü nükleer kuvvetle ilişkili grubu ve $SU(2) \times U(1)$ 'i, elektrozayıf kuvvetle ilişkili grubu kapsayan $SU(5)$ grubuna dayandığını dikkat etmelidir. O zamandan beri fizikçiler, $SO(10)$ ve E_6 gibi diğer potansiyel birleşik grupların anlamlarını araştırıyorlar.

Bölüm 10

1. Görmüş olduğumuz gibi, Büyük Patlamanın patlaması daha önceden var olan bir uzayda yer alan bir patlama değildir bu nedenle de bize bu patlamanın nerede ortaya çıktığı sorulanız. Kullandığımız Büyük Patlama'nın şakacı yetersizliği tarifi Alan Guth'a aittir; bkz A. Guth, *The Inflationary Universe* (Reading, Eng.: Perseus Books, 1997), s. xiii.
2. "Büyük Patlama" tarifi kimi zaman sıfır-zamanda ortaya çıkarak evreni var eden bir olayı anlatmak için kullanılır. Ama önümüzdeki bölümde inceleyeceğimiz gibi, sıfır-zamanda genel göreliliğin denklemleri çöktüğü için, hiç kimsenin bu olayın ne olduğu konusunda tam bir bilgisi yok. Büyük Patlama kuramının patlamayı dışarda bıraktığını söylerken kastettiğimiz budur. Bu bölümde kendimizi denklemlerin çokmediği alanlarla sınırlayacağız. Şişme kozmolojisi, doğal olarak Büyük Patlama kuramının dışarda bıraktığı patlama olarak aldığımız, uzayın kısa süreli, patlamalı genişlemesini ortaya koymak için böyle çökmeyen denklemleri kullanır. Elbette bu

yaklaşım da, evrenin yaratılış anında -eğer böyle bir an gerçekten varsa- ne olup bittiği sorusunu cevapsız bırakıyor.

3. Abraham Pais, *Subtle is the Lord* (Oxford: Oxford University Press, 1982), s. 253.
4. Matematiğe eğilimli okuyucu için: Einstein, $G_{\text{IV}} = 8\pi T_{\text{IV}}$ şeklindeki özgül denklemi $G_v + A_{\text{IV}} = 87\pi T_{\text{IV}}$ şeklinde değiştirmiştir. Burada A kozmoloji sabitinin büyüklüğünü temsil eden bir sayıdır.
5. Bu bağlamda bir cismin kütesinden söz ettiğimde, onun bileşen parçacıklarının toplam kütesini kast ediyorum. Eğer bir küp, sözgelimi 1000 altın atomundan oluşuyorsa, böyle tek bir atomun kütesinin 1000 katını kast ediyorum demektir. Bu tanımlama Newton'un bakış açısıyla uyumludur. Newton yasaları böyle bir kübün kütesinin, tek bir altın atomunun kütesinin 1000 katı olacağını, ağırlığının da tek bir atomun ağırlığının 1000 katı olacağını söyler. Einstein'a göreyseniz, kübün ağırlığı aynı zamanda atomların kinetik enerjisine (ve kübün enerjisineyapılan diğer katkılara) bağlıdır. Bunun kaynağı $E = mc^2$ 'dir; kaynağı ne olursa olsun, daha fazla enerji (E), daha fazla kütle (m) demektir. Bu nedenle, bu noktayı ifade etmenin eşdeğer bir yolu da, Newton $E = mc^2$ 'den haberdar olmadığı için, onun kütleçekimi yasasının, hareket enerjisi gibi enerji katkıları olmayan kütle tanımını kullanmasıdır.
6. Buradaki tartışma, konunun altında yatan fiziği önermekle birlikte, tam olarak yakalayamıyor. Aslında sıkıştırılmış yayın uyguladığı basınç, kutunun yere doğru ne kadar büyük bir kuvvetle çekileceğini etkiler. Ama bunun nedeni, sıkıştırılmış yayın kutunun toplam enerjisini etkilemesidir ve bir önceki paragrafa anlatıldığı gibi, genel göreliliğe göre önemli olan kavram toplam enerjidir. Bununla birlikte, burada açıklığa kavuşturmaya çalıştığım nokta, basıncın kendisinin -yalnızca toplam enerjiye yaptığı katkı yoluyla değil- tıpkı kütle ve enerjinin yaptığı gibi, kütleçekimi üretmesidir. Genel göreliliğe göre, basınç kütleçekimi yaratır. Burada sözünü ettiğimiz itici kütleçekiminin, pozitif değil de negatif bir basıncı sahip bir şeyle dolu olan bir uzay bölgesinde hissedilen iç kütleçekimi alanı olduğuna dikkat edin. Böyle bir durumda negatif basınç, bölgenin içinde etkili olan itici kütleçekimine katkı yapacaktır.
7. Matematiksel olarak kozmoloji sabiti genelde A ile gösterilen bir sayıyla temsil edilir (Not 4'e bakınız). Einstein, A ister pozitif isterse negatif bir sayı olarak seçilmiş olsun, denklemlerinin son derece anlamlı olduğunu buldu. Metindeki tartışma modern kozmolojinin (ve açıklanacağı gibi, modern gözlemlerin) özel olarak ilgilendiği, A'nın pozitif olduğu bir duruma odaklanmaktadır çünkü bu, negatif basıncın ve itici kütleçekiminin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. A'nın negatif değerleri bildiğimiz, çekici kütleçekimine yol açar. Kozmoloji sabitinin uyguladığı basınç bir örnek olduğundan, bu basıncın doğrudan bir kuvvet uygulamadığına da dikkat edin: tıpkı su altında olduğunuz zaman kulaklarınızda hissettiğiniz gibi, yalnızca basınç farkları basınç kuvveti yaratır. Kozmoloji sabitinin uyguladığı kuvvetse, saf bir kütleçekimi kuvvetidir.
8. Bildiğimiz mıknatısların her zaman bir kuzey, bir de güney kutbu vardır. Büyük birleştirme kuramları ise bunun tersine, yalnızca kuzey veya yalnızca güney kutbuna sahip olan parçacıkların var olabileceğini ileri sürer. Böyle parçacıklar tek kutuplu (monopol) olarak adlandırılırlar ve standart Büyük Patlama kuramı üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilirler. Bununla birlikte hiçbir zaman gözlenmemişlerdir.
9. Guth ve Tye, süper-soğutulmuş Higgs alanının kozmoloji sabiti gibi davranacağını buldular ki bu daha önceleri Martinus Veltman ve başkaları tarafından da fark edilmişti. Aslında Tye bana eğer Guth'la birlikte yazdıkları makaleyi yayımlanmak üzere gönderdikleri *Physical Review Letters* dergisinin sayfa sınırlaması olmasaydı, makaleye, modellerinin üstel bir genişleme gerektirdiği yolundaki son cümleyi eklemiş olacaklarını söylemişti. Ama Tye, bir üstel genişleme döneminin (bu bölümün sonlarında ve diğer bölümde incelenecek) yol açacağı önemli sonuçları fark edenin ve şişmeyi kozmolojistlerin haritalarında öne ve merkeze yerleştirenin de Guth olduğuna işaret ediyor.

Zaman zaman dolambaçlı olan keşifler tarihinde, Rus fizikçi Alexei Starobin-

sky, birkaç yıl daha önce şimdi şişme genişlemesi olarak adlandırdığımız şeyi ortaya çıkarmanın bir başka yolunu bulmuştu. Bu çalışmanın anlatıldığı makale günümüzde batı bilim insanları tarafından pek bilinmez. Ama Starobinsky böyle hızlı bir genişleme döneminin kozmolojinin kilit problemlerini (yakında incelenecek olan ufuk ve düzlük problemleri gibi) çözeceğini vurgulamamıştı. Bu da çalışmasının neden Guth'un çalışması gibi heyecanlı tepkilerle karşılanmadığını kısmen açıklıyor. 1981 de Japon fizikçi Katsuhiko Sato da şişme kozmolojisinin bir türünü geliştirmişti. Hatta ondan da önce (1978'de) Gennady Chibisov ve Andrei Linde adlı Rus fizikçiler de şişme fikri üzerinde durmuştu. Ama -a3Tintih olarak bakıldığında- asal bir problem içerdiğini (not 11 de açıklanmıştır) anlamadıkları için çalışmalarını yayımlamamışlardı.

Matematiğe eğilimli okuyucun ivmeli genişlemenin nasıl ortaya çıktığının anlaşılmasının çok zor olmadığına dikkat etmesi gerekir. Einstein'ın denklemlerinden biri $d^2a/dt^2/a = -47t/3(p+3p)$ olarak yazılabilir ki burada a evrenin ölçek çarpanını (yani boyutunu), p enerji yoğunluğunu ve p basınç yoğunluğunu simgeler. Eğer bu denklemin sağ taralı pozitif ise, ölçek çarpanının giderek artan bir hızla büyüyeceğine, yani evrenin büyümesinin zamanla ivmeleneyeceğine dikkat edin. Bir platoya oturmuş olan Higgs alanının basınç yoğunluğu enerji yoğunluğunun tersine eşit olur (aynı şey kozmoloji sabiti için de doğrudur) ve sağ taraf gerçekte pozitif olur.

10. Bu kuantum sıçramalarının altında yatan fizik, Bölüm 4'te incelenen belirsizlik ilkesidir. Kuantum belirsizliğinin alanlara uygulanmasını hem Bölüm 11 de hem de Bölüm 12'de inceleyeceğim ama önceden şu noktalara dikkat çekeyim: Uzayda verilen bir noktada bir alanın değeri ve o noktada aynı alanın değerinin değişme hızı, alan için, konum ve hızın (momentumun) parçacık için oynadığı rolü oynarlar. Bu yüzden, nasıl bir parçacık hem kesin bir konuma hem de kesin bir hızla sahip olamıyorsa, bir alan da uzayda herhangi verilen bir noktada hem kesin bir değere hem de bu değerdeki kesin bir değişme hızına sahip olamaz. Herhangi bir anda alanın değeri ne kadar kesinse, değişim hızı o kadar belirsizdir, yani alanın değerinin bir an sonra değişme olasılığı o kadaryüksektir. Alanın değerindeki kuantum sıçramasından söz ederken kastettiğim şey, kuantum belirsizliğinin yarattığı böyle bir değişimdir.
11. Linde, Albrecht ve Steinhardt'ın katkıları son derece önemliydi çünkü Guth'un özgün modelinde -şimdi *eski şişme* olarak adlandırılıyor- tehlikeli çatlaklar vardı. Hatırlarsanız, süper-soğutulmuş Higgs alanı (ya da kısa bir süre sonra kullanacağımız terminolojiye göre *inflaton* alanı) uzayda *birömek* olarak enerji kâsesindeki bir tepede kalan değere sihiptir. Bu yüzden, süper-soğutulmuş inflaton alanının en düşük enerji düzeyine ne kadar çabuk düşeceğini tarif etmişsem de, bu kuantum-kaynaklı sıçramanın uzayda her yerde aynı anda olup olmayacağını sormak zorundayız. Cevapsa, olmayacağı şeklindedir. Guth'a göre, inflaton alanının sıfır enerji değerine düşmesi, kabarcık nükleasyonu adı verilen bir süreçle gerçekleşir: inflaton uzayda bir noktada sıfır enerjisine düşer ve bu düşüş dışarıya doğru yayılan, duvarları ışık hızıyla hareket eden ve duvarların geçtiği yerde alan değerinin sıfıra düştüğü bir kabarcıklanmayı tetikler. Guth, merkezleri rasgele olan böyle pek çok kabarcığın, eninde sonunda birleşerek evrende her yerde sıfır-enerjili bir inflaton alanı oluşmasını sağlayacağını öne sürdü. Ama sorun, Guth'un kendisinin de fark ettiği gibi, kabarcıkları çevreleyen uzayın sıfırdan farklı enerjiye sahip olan bir inflaton alanıyla dolu olması ve böyle alanların hızlı şişme genişlemesine devam ederek kabarcıkları birbirlerinden uzaklaştırması idi. Bu yüzden büyüyen kabarcıkların birbirlerini bularak büyük, homojen bir uzay bölgesi yaratacağının garantisi yoktu. Dahası, Guth inflaton alanı sıfır enerji değerine düşerken enerjinin kaybolmadığını, evreni κ^4 an bildiğimiz parçacıklara ve ışıma dönüştüğünü düşünüyordu. Ama gözlemlerle uyumlu bir evren ortaya çıkması için bu dönüşümün uzayda *birömek* bir madde ve enerji dağılımına yol açması gerekiyordu. Guth'un önerdiği süreçte

bu dönüşüm kabarcık duvarlarının çarpışmasıyla oluşacaktı ama hesaplar -Guth ve Columbia Üniversitesi'nden Erick Weinberg'in, Stephen Hawking, Ian Moss ve Cambridge Üniversitesi'nden John Steward in yaptığı hesaplar- madde ve enerji dağılımının bir örnek *olmadığını* ortaya koydu. Bu nedenle Guth'un özgün şişme modeli ayrıntılarda önemli sorunlarla karşılaştı.

Linde'nin, Albrecht ve Steward'in görüşleri -şimdi *yeni şişme* olarak biliniyor- bu can sıkıcı sorunları çözdü. Bu araştırmacılar, Şekil 10.2'deki enerji kâsesinin şeklini değiştirerek inflatonun sıfır enerjiye tepeden vadiye doğru yuvarlanarak" sakin ve özgün modeldeki kuantum sıçramalarına gerek olmayacak bir şekilde düşebileceğini fark ettiler. Yaptıkları hesaplar gösterdi ki, bu tepeden aşağıya doğru göreceli olarak yavaş yuvarlanma, uzayın şişme patlamasının süresini önemli ölçüde uzatarak tek bir kabarcığın kolayca büyüyerek bütün gözlenebilir evreri kaplamasını olası hale getirdi. Bu nedenle, bu yaklaşımda birleşen kabarcıklar için endişelenmeye gerek yoktur. Aynı derecede önemli olan bir başka şey de, inflaton alanının enerjisinin kabarcık çarpışmalarıyla bildiğimiz parçacıklara ve ışıma dönüşümek yerine, bu yeni yaklaşımda şişme bu enerji dönüşümünü uzayda yavaşça ve sürtünmeye benzer bir süreçle yapıyor olmasıydı: alan, enerji tepesinden aşağı yuvarlanırken -uzayın her yerinde bir örnek olarak- enerjisini daha bildik alanlarla "sürtünerek" (etkileşerek) parçacık ve ışıma dönüştürüyordu. Böylece yeni şişme, Guth'un yaklaşımının bütün başarısını geri getirdi ama karşılaştığı önemli sorunu dayamamış oldu.

Yeni şişmenin ortaya koyduğu bu önemli ilerlemeden bir yıl kadar sonra Andrei Linde bir başka atılıma öncülük etti. Yeni şişmenin başarılı bir şekilde ortaya çıkması için bir dizi kilit özellik yerli yerine oturmalı: potansiyel enerji kâsesi uygun şekilde olmalı, inflaton alanının değeri yüksekten başkmalı (ya da daha teknik bir deyişle, inflaton alanının değerinin kendisi yeterince büyük bir uzay bölgesinde bir örnek olmalı). Evrende böyle koşulların ortaya çıkması olası ise de, Linde şişme patlamasını daha basit bir yolla üretmenin bir yolunu buldu. Linde, Şekil 9. la daki gibi basit bir potansiyel enerji kâsesiyle ve inflaton alanının başlangıç değerini hassas bir şekilde ayarlamadan bile şişmenin hâlâ doğal olarak ortaya çıkabileceğini anladı. Fikir şöyle: Evrenin en erken dönemlerinde her şeyin "kaotik" olduğunu varsayın, örneğin değeri bir rakamdan diğerine rasgele olarak zıplayan bir inflaton alanının var olduğunu varsayın. Uzayda bazı temel noktalarda değeri düşük olabilir, diğer bazı noktalarda orta büyüklükte, bazı noktalarda ise yüksek olabilir. Alan değerinin küçük ya da orta büyüklükte olduğu noktalarda özel bir şey olmaz. Ama Linde, inflaton alan değerinin yüksek olduğu bölgelerde (bölge çok küçük, 10-33 cm çapında olsa bile) son derece önemli bir şeyin olacağını lark etmişti. İnflaton alanının değeri yüksek olduğunda -Şekil 9. la daki enerji kâsesinin yüksek bir yerinde bulunduğu- bir tür kozmik sürtünme devreye girer: alan değeri tepeden aşağıya, daha düşük potansiyel enerji değerlerine doğru yuvarlanmaya çalışır ama alanın yüksek değeri direnç yaratan bir sürtünme kuvvetinin ortaya çıkmasına katkıda bulunur, bu nedenle yuvarlanma son derece yavaş olur. Böylece inflaton alanının değeri neredeyse sabit olur ve (yeni şişmedeki potansiyel enerji tepesindeki şişmeye çok benzer şekilde) neredeyse sabit bir enerji ve neredeyse sabit bir negatif basınç katkıda bulunur. Şimdi artık iyi bildiğimiz gibi, bunlar şişme patlamasını tetiklemek için gerekli olan koşullardır. Böylece, özel biçimli bir enerji kâsesine ve inflaton alanının özel değerlerinin seçilmesine gerek olmadan, evrenin ilk dönemlerindeki kaotik ortam doğal olarak bir şişme patlamasına 3'0'1 açabilir. Anlaşılabilir nedenlerle Linde bu yaklaşıma *kaotik şişme* adını vermiştir. Birçok fizikçi bunu şişme paradigmasının en inandırıcı gerçekleşmesi olarak görür.

12. Bu konunun tarihini bilenler, kısaca anlattığımız ufuk ve düzlük problemleri gibi kozmolojinin kilit problemlerine getirdiği çözümler nedeniyle Guth'un keşfinin yarattığı heyecanı anlayacaklardır.
13. Elektrozayıf Higgs alanının veya büyük birleşik Higgs alanının, hem Bölüm 9'da anlatılan rolü oynamak, hem de henüz Higgs okyanusunun oluşmadığı erken

dönemlerde şişme patlamasını sürdürmek gibi iki işi de yapıp yapmadığını merak edebilirsiniz. Bu tür modeller ileri sürülmüştür ama hepsi de teknik sorunlarla karşılaşmışlardır. Şişme genişlemesinin en inandırıcı gerçekleştirmelerinde inflaton alanının rolünü yeni bir Higgs alanı oynar.

14. Bu bölümdeki not 1'e balcınız.
15. Örneğin ufkumuzu, merkezinde bizim olduğumuz, Büyük Patlamadan bu güne kadar geçen zaman içinde haberleşmiş olabileceğimiz şeylerle (kürenin içindeki şeyler) haberleşmiş olamayacağımız şeyleri (kürenin dışındaki şeyler) ayıran dev, varsayımsal bir küre olarak düşünebilirsiniz. Günümüzde, "ufuk küremizin" çapı yaklaşık olarak 14 milyar ışık yılıdır; evren tarihinin erken dönemlerinde ışığın hareketi için çok daha az zaman olduğundan, bu yarıçap çok daha küçüktü. Bölüm8'deki not 10'a da bakabilirsiniz.
16. Şişme kozmolojisinin ufuk problemini çözmesinin özü bu ise de, karışıklığı önlemek bakımından çözümün kilit noktasını açıklamak isterim. Eğer bir gece siz ve bir arkadaşınız, büyük bir alanda durup elinizdeki el fenerlerini yakıp söndürerek birbirinize işaretler veriyor iken birden dönüp birbirinizden uzağa doğru ne kadar hızla koşmaya başlarsanız başlayın, bu ışık sinyallerini almaya devam edersiniz. Neden? Çünkü sizin arkadaşınızın size gönderdiği ışık sinyallerini almanız veya onun sizin ona gönderdiğiniz ışık sinyallerini almanız için birbirinizden ışık hızından daha büyük bir hızla uzaklaşıyor olmanız gerekir ki bu olanaksızdır. Öyleyse evren tarihinin erken dönemlerinde ışık sinyallerini değiş-tokuş edebildiğimiz (ve örneğin aynı sıcaklığa geldiğimiz) uzay bölgelerinin şimdi kendilerini birbirlerinin haberleşme erimlerinin dışında bulmaları nasıl mümkün olabilir? El feneri örneğinin açıkça gösterdiği gibi, birbirlerinden ışık hızından daha hızlı uzaklaşmış olmaları. Gerçekten de, şişme evresindeki itici kütleçekiminin uyguladığı devasa itme kuvveti, uzayın her bölgesini diğer bütün bölgelerden ışık hızından çok dahil büyük hızlarla *uzaklaştırmıştı*. Işık hızının koyduğu sınır- uzayın içindeki hareketlerde geçerlidir. Bu hareket uzayın içinde bir hareket olmayıp uzayın kendisinin şişmesinden kaynaklandığı için özel görelilikle bir çelişki oluşturmaz. Bu nedenle şişme kozmolojisinin alışılmamış ve önemli bir özelliği, uzayın ışık hızından daha büyük hızlarla genişlediği kısa bir dönemi içeriyor olmasıdır.
17. Evren genişledikçe kritik yoğunluğun sayısal değerinin azaldığına dikkat edin. Ama önemli nokta şudur: eğer herhangi bir anda evrenin gerçek madde/enerji yoğunluğu kritik yoğunluğa eşitse, tam olarak aynı şekilde azalacak ve her zaman kritik yoğunluğa eşit kalacaktır.
18. Matematiğe eğilimli okuyucu şişme evresi boyunca uzay devasa bir biçimde şişerken kozmik ufkumuzun bo3atunun aynı kalmış olduğuna dikkat etmelidir (Bölüm8'deki not 10'da verilen ölçek çarpanının üstel biçimine bakıldığında kolayca görülebilir). Şişme yapısında dev evren içinde gözlenebilir evrenimizin minik bir benek oluşturmasının anlamı budur.
19. R. Preston, *First Light* (New York: Random House Trade Paperbacks, 1996) s. 118.
20. Karanlık möidde hakkında genel düzeyde mükemmel bir inceleme için bkz. L. Krauss, *Quintessence: The Mystery of Missing Mass in the Universe* (New York: Basic Books, 2000).
21. Konuyu bilen okuyucu, burada ilgilendiğim tek şeyin karanlık maddenin kozmik kütle yoğunluğuna katkısı olduğundan, farklı gözlem ölçeklerinde (galaksi ölçekli, kozmik ölçekli) ortaya çıkan değişik karanlık madde problemleri arasında bir ayırım gözetmediğimi fark edecektir.
22. Bütün la türünden süpernovaların ardında yatan mekanizmanın bu olduğu konusunda bazı kuşuklar olmakla birlikte (Bunu bana hatırlattığı için D. Spergel'e teşekkür ederim) bu o^darın birörnekliliğinin -ki tartışma açısından ihtiyacımız olan şey budur- güçlü gözlemsel dayanakları vardır.
23. Süpernova sonuçlarından yıllarca önce Princeton'dan Jim Peebles, Case Western'den Lawrence Krauss, Chicago Üniversitesi'nden Michael Turner ve Ohio

State den Gary Steigman'ın önsüzili kuramsal çalışmalarının, evrenin sıfırdan farklı bir kozmoloji sabitine sahip olabileceğini ileri sürmüş olması ilginçtir. O zamanlar, fizikçilerin çoğunluğu bu öneriyi fazla ciddiye almamıştı ama şimdi, süpernova verileriyle birlikte bu eğilim önemli ölçüde değişmiştir. Bu bölümün başlarında kozmoloji sabitinin dışarı doğru itişinin tıpkı platoda kalmış bir kurbağa gibi, en düşük enerji düzeninin üzerinde kalmış bir Higgs alanına benzetilebileceğini görmüş olduğumuza da dikkat edin. O yüzden, kozmoloji sabiti verilere son derece iyi uyuyor olsa da, çok daha kesin bir ifade şöyle olabilir: süpernova araştırmacıları uzayın, dışarıya doğru bir itiş üreten kozmoloji sabiti *benzeri* bir şeyle dolu olduğu sonucuna vardılar. (Şişme kozmolojisinin erken dönemlerindeki kısa süreli dışarıya doğru gerçekleşen patlamanın tersine, Higgs alanının uzun-süreli bir dışarıya doğru itiş ürettiği değişik yollar vardır. Bunu, verilerin gerçekten bir kozmoloji sabiti gerektirip gerektirmediği veya kütleçekimsel sonuçları benzer olan başka bir varlığın bundan sorumlu olup olmayacağı sorularına odaklanacağımız Bölüm 14'te inceleyeceğiz.) Araştırmacılar "karanlık enerji" kavramını genellikle evrenin gözümüze görünmeyen ama uzaydaki her bölgenin diğer bölgeleri çekmek yerine itmesine neden olan bileşenini anlatmak için kullanıyorlar.

24. Karanlık enerji gözlenen ivmeli genişleme için kullanılan en yaygın açıklama olmakla birlikte, ileri sürülen başka kuramlar da vardır. Örneğin bazıları, eğer kütleçekiminin değeri, son derece büyük uzaklıklar -kozmozolojik ölçekler- söz konusu olduğunda Newton ve Einstein tarafından hesaplanan bilindik değerinden farklı ise, verilerin açıklanabileceğini ileri sürüyorlar. Başkaları ise verilerin kozmik ivmelenme gösterdiği konusunda henüz ikna olmuş değiller ve daha kesin ölçümlerin yapılmasını bekliyorlar. Bu farklı görüşleri akılda tutmak önemli, özellikle de gelecekteki gözlemler günümüzdeki açıklamaları zora sokacak sonuçlara ulaşrsa. Ama şimdilik, ana metinde anlatılan kuramsal açıklamaların en inandırıcı olanlar olduğu yolunda yaygın bir fikir birliği vardır.

Bölüm 11

1. Kuantum çalkantılarının türdeşlik bozukluklarına nasıl yol açtığı konusunun 1980'lerin başlarındaki önderleri arasında Stephen Hawking, Alexei Starobinsky, Alan Guth, So-Young Pi, James Bardeen, Paul Steinhardt, Michael Turner, Viatcheslav Mukhanov ve Gennady Chibisov sayılabilir.
2. Ana metindeki açıklamadan sonra bile, bir inflaton beneğindeki çok küçük miktardaki kütle/enerjinin nasıl olup da gözlenebilir evrendeki devasa miktardaki madde/enerjiye yol açtığı konusunda kafanız hâlâ karışık olabilir. Sonuçta ortaya çıkan enerji nasıl başlangıçtakinden daha fazla olabilir? Cevap şu: ana metinde açıklandığı gibi, inflaton alanı negatif basınç yoluyla kütleçekiminden enerji ortaya çıkarır. Bunun anlamı, inflaton alanındaki enerjinin arttığı, kütleçekimi alanındaki enerjininse azaldığıdır. Kütleçekimi alanının Newton zamanından beri bilinen bir özelliği, enerjinin keyfi bir şekilde negatif olabilmesidir. Bu nedenle kütleçekimi, sınırsız miktarlarda kredi vermek isteyen bir banka gibidir -kütleçekimi temelde sınırsız miktarlarda enerji barındırır, uzay genişledikçe de inflaton alanı buradan enerji ortaya çıkarır.

Birörnek inflaton alanının başlangıç beneğinin özel kütlesi ve boyutları, incelenen şişme kozmolojisi modelinin ayrıntılarına bağlıdır (en çok da inflaton alanının potansiyel enerji kasesinin kesin ayrıntılarına). Metinde, başlangıçtaki inflaton alanının enerji yoğunluğunun yaklaşık olarak santimetreküpüte 10^{82} gram olduğunu varsaydım, bu durumda $(10^{26} \text{ cm})^3 = 10^{78}$ santimetreküpüteki toplam kütle yaklaşık 10 kilogram kadar olur. Bu değerler, geleneksel şişme modelleri için kullanılan tipik değerlerdir ama size yalnızca bir fikir verme amacını taşırlar. Olasılık aralığındaki çeşitliliği verebilmek için, Andrei Linde'nin kaotik şişme modellerinde (bkz. Bölüm 10, not 11) gözlenebilir evrenimizin çok daha küçük, 10^{10} cm boyutlarındaki (ki buna Planck uzunluğu diyoruz) ve enerji yoğunluğu santimetreküpüte 10^{94} gram olan

(toplam kütle olarak 10^{56} gram ediyor ki buna da Planck kütlesi diyoruz) başlangıç benliğinden çıktığını belirtelim. Bu şişme çeşitlerinde başlangıçtaki benek bir toz taneciği kadar kütleyle sahiptir.

3. Bkz. Paul Davies, "Inflation and Time Asymmetry in the Universe", *Nature*, c.301, s. 398; Don Page, "Inflation Does Not Explain Time Asymmetry", *Nature*, c. 304, s. 39 ve Paul Davies, "Inflation in the Universe and Time Asymmetry", *Nature*, c. 312, s. 524.
4. Temel noktayı açıklayabilmek için, entropiyi uzay-zaman ve kütleçekiminden kaynaklanan ve geriye kalan her şeyden kaynaklanan olarak iki parçaya ayırmak uygun olur. Böylece ana fikirler ortaya çıkar. Ama belirtmeliyim ki, entropiye olan kütleçekimsel katkının açıkça tanımlandığı, ayrıldığı ve açıklandığı matematiksel bir işleyişin, anlaşılması ve hatırlanması güç olacaktır. Yine de bu, ulaştığımız söz sonuçları için bir tehlike yaratmaz. Eğer bunu problemi buluyorsanız, bütün bu açıklamaların kütleçekimsel entropiden hiç söz edilmeden yeni baştan ifade edilebileceğini belirtelim. Bölüm 6'da vurguladığımız gibi, işin içinde bildiğimiz, sıradan kütleçekimi olduğunda madde kümelenmeleri oluşur. Madde kümelenirken kütleçekimsel potansiyel enerjiyi, sonradan kısmen ışıma dönüşerek kümeden uzaklaşan kinetik enerjiye dönüştürür. Bu, entropinin arttığı bir olaylar dizisidir (büyük ortalama parçacık hızları ilgili faz uzayı hacmini artırır; etkileşim yoluyla ışıma üretimi toplam parçacık sayısını artırır, ki bunların her ikisi de toplam entropi miktarının artmasına neden olur. Böylece, metinde *kütleçekimsel entropi* olarak söz ettiğimiz şey, *kütleçekimi kuvveti tarafından üretilen madde entropisi* olarak da adlandırılabilir. Kütleçekimsel entropinin düşük olduğunu söylediğimizde, kütleçekimi kuvvetinin maddenin kümelenmesine yol açarak önemli miktarlarda entropi artışı yaratma potansiyeli olduğunu kastediyoruz. Böyle bir entropi artışı potansiyelini gerçekleştirirken madde kümeleri birörnek ve türdeş olmayan bir kütleçekimi alanı -uzay-zamanda çarpılmalar ve dalgacıklar- yaratır ki metinde bu durumu daha yüksek entropiye sahip olarak tanımlamıştım. Ama bu tartışmadan da açıkça anlaşılacağı üzere bu, kümeli maddenin (ve bu süreçte üretilen ışımanın) (düzgün bir biçimde dağıldığı duruma oranla) daha yüksek entropiye sahip olması olarak da düşünülebilir. Konuyu iyi bilen okuyucunun dikkat edeceği gibi, eğer tutarlı bir graviton durumu olarak klasik graviton arka planını (klasik bir uzay-zaman) düşünürsek, temelde tek durum olduğundan entropisi düşüktür. Sadece uygun bir kaba pürüzlendirme yoluyla entropinin gerçek değerini alması mümkün olabilir. Ama bu notta da vurgulandığı üzere, bu çok da gerekli değildir. Öte yandan, eğer madde kara delik oluşturacak kadar etkili bir şekilde kümelense bile, ulaşamaz bir entropi görevi ortaya çıkar: bir kara deliğin olay ufğunun yüzey alanı (Bölüm 16'da ayrıntılı olarak açıklandığı gibi) kara deliğin entropisinin bir ölçüsüdür. Bu entropi de hiçbir kuşkuyla yer bırakmayacak şekilde kütleçekimsel entropi olarak adlandırılır.
5. Tıpkı bir yumurtanın hem kırılması, hem de kırılmış yumurtanın kabuklarının yeniden bir araya gelerek yeni bir yumurta oluşturmalarının olası olması gibi, kuantum-kaynaklı titreşimlerin die, hem (tarif ettiğimiz gibi) daha büyük dalgalanmalara dönüşmesi, hem de yeterince bağlantılı türdeşlik bozuklukları için birbirlerini yok ederek böylesi büyümeleri önlemesi olasıdır. Bu nedenle zamanın okunun gizinin çözülmesi konusunda şişmenin yaptığı katkı da yeterince bağlantılı başlangıç kuantum dalgalanmalarının varlığını gerektirir. Yine, eğer Boltzmann gibi düşünürsek, şişme için koşulları olgunlaştıran bütün dalgalanmaların arasında bu koşulu da sağlayan biri er geç bulunacak ve bildiğimiz evreni başlatacaktır.
6. Durumun tarif edildenden daha iyi olduğunu iddia eden bazı fizikçiler de vardır. Örneğin, Andrei Linde, kaotik şişmede (Bölüm 10'da 11. nota bakınız) gözlenebilir evrenin Planck ölçekli enerji yoğunluğuna sahip olan *birörnek* bir inflaton alanı içeren Planck ölçekli bir benekten çıktığını öne sürüyor. Belirli varsayımlar altında Linde, böylesi minik bir benekteki birörnek inflaton alanının entropisinin kabaca

diğer inflaton alanı dağılımlarının entropilerine eşit olduğunu ve bu nedenle şişmeye götüren koşulların özel olmadığını da iddia ediyor. Planck-ölçekli beneğin entropisi düşüktü ama Planck-ölçekli bir beneğin *sahip olabileceği* entropiye de eşitti. Çıkan şişme patlaması, bir çakışta çok daha yüksek entropiye sahip olan dev bir evren yarattı ama bu evrendeki düzgün, birörnek madde dağılımı nedeniyle entropi, olabileceğinin çok altında kaldı. Zamanın oku bu entropi açığının azaldığı yönü gösterir.

Ben bu iyimser bakış açısını kısmen destekliyorum olsam da, şişmenin çıktığı öne sürülen fiziği daha iyi anlayıncaya kadar kuşkucu olmak gerekir. Örneğin, konuyu iyi bilen okuyucu, bu yaklaşımın yüksek enerjili (transplancksal) alan modları -şişmenin başlamasını etkileyen ve bu nedenle yapı oluşumunda önemli roller oynayan modlar-hakkında uygun ama kanıtlanamayan varsayımlar yaptığına dikkat edecektir.

Bölüm 12

1. Burada aklımdaki koşullara bağlı kanıt, kütleçekimsel olmayan her üç kuvvetin büyüklüğünün de bu kuvvetlerin etkili olduğu ortamların enerjisi ve sıcaklığına bağlı olduğu gerçeğine dayanıyor. Gündelik yaşamımızın geçtiği ortamdakiler gibi düşük enerji ve sıcaklıklarda her üç kuvvetin büyüklükleri farklıdır. Ama evrenin ilk anlarındaki gibi çok yüksek enerji ve sıcaklıklarda bu üç kuvvetin büyüklüğü birbirine yaklaşır ve bu da, dolaylı olarak da olsa, üç kuvvetin temelde birleşik olabileceğini, yalnızca düşük enerji ve sıcaklıklarda farklıymış gibi görüldüğünü gösteren kuramsal ve deneysel kanıtlar vardır. Daha ayrıntılı bir inceleme için örneğin *Evrenin Zarafeti* kitabının 7. Bölümüne bakabilirsiniz.
2. Bilinen kuvvet akınlarından biri gibi bir alanın evrenin yapıtaşlarınınckm biri olduğunu bir kere anlarsak, o zaman her yerde var olduğunu - evrenin dokusunun içine yerleşmiş olduğunu biliriz. Tıpkı uzayın kendisini çıkarıp yok etmenin olası olmaması gibi bu alanı da çıkarıp yok etmek olası değildir. Bu yüzden alanı yok etmeye en çok yaklaşılabileceğimiz durum, enerjisinin en düşük olduğu değeri almasını sağlamaktır. Elektromanyetik kuvvet gibi kuvvet alanları için bu değer, metinde anlatıldığı gibi sıfırdır, inflaton veya standart model Higgs alanları için (ki basit olması için burada incelemiyoruz) bu değer, 9. ve 10. Bölümlerde incelediğimiz gibi, alanın potansiyel enerji kasesinin şekline bağlı olarak sıfırdan farklı bir sayı olabilir. Metinde belirtildiği gibi, bu tartışmayı daha verimli hale getirmek için, her ne kadar Higgs veya inflaton akınlarıyla ilgili dalgalanmalar sonuçlarımızda bir değişiklik yapmamızı gerektirmiyor olsa da, yalnızca değerleri sıfır olduğunda en düşük enerji düzeyine sahip olan kuantum dalgalanmalarını inceleyeceğiz.
3. Aslında matematiğe eğilimli okuyucu, belirsizlik ilkesinin, enerji dalgalanmalarının ölçümlerimizin zaman çözümlerleriyle ters orantılı olmasını gerektirdiğine, bu yüzden alanın enerjisini ölçtüğümüz zaman çözömlemesi hassaslaştıkça alan dalgalanmalarının da şiddetleneneğine dikkat etmelidir.
4. Bu deneyde Lamoreaux, Casimir kuvvetini küresel bir mercecek ve kuartz bir plakanın arasındaki çekimi ölçen bir düzenek kullanarak kanıtlamıştır. Daha yakın zamanlarda, Padova Üniversitesi'nden Gianni Carugno, Roberto Onofrio ve çalışma arkadaşları, iki paralel plaka içeren ve çok daha zor olan özgün Casimir düzeniyle bir deney yapmışlar (Plakaları tam anlamıyla paralel tutmak deneyin en zor kısmıdır.) ve şimdiye kadar Casimir'in hesaplarını yüzde 15 düzeyinde doğrulamışlardır.
5. Geçmişe baktığımızda bu görüşler eğer Einstein 1917 yılında kozmoloji sabitini ortaya atmasaydı, kuantum fizikçilerinin birkaç on yıl sonra kozmoloji sabitinin kendilerine özgü bir türünü ortaya atacıklarını gösteriyor. Hatırlayacağınız gibi, kozmoloji sabiti Einstein'ın bütün uzayı doldurduğunu düşündüğü ama onun -ve kozmoloji sabitinin günümüzdeki destekçilerinin- kaynağını belirsiz bıraktıkları bir enerjyidi. Şimdi artık kuantum fiziğinin boş uzayı salınan alanlarla doldurduğunu anlıyoruz. Doğrudan Casimir'in keşfinde gördüğümüz gibi, ortaya çıkan mikroskobik alan

titreşimleri uzayı enerji ile dolduruyor. Aslında kuramsal fiziğin karşısındaki en büyük zorluklardan biri, bütün alan titreşimlerinin toplam katkısının, Bölüm 10'da incelenen süpernova gözlemlerinin belirlediği gözlemsel sınırlar çerçevesinde, boş uzayda bir toplam enerjiye -toplam bir kozmoloji sabiti- yol açtığını göstermektedir. Şimdiye kadar bunu hiç kimse başaramamıştır; yapılan çözümlerlerin bunun su andaki kuramsal yöntemlerin kapasitelerinin ötesinde olduğunu göstermiştir. Yaklaşık hesaplarla gözlemlerden *kat kat* büyük cevaplar verir ki bu da yaklaştıranların doğru olmadığını gösterir. Çoğu kimse kozmoloji sabitinin değerinin açıklamasını (uzun zamandır düşünüldüğü gibi sıfır mı yoksa şişme ve süpernova verilerinin gösterdiği gibi sıfırdan farklı küçük bir değer mi olduğu) kuramsal fiziğin karşı karşıya olduğu, henüz çözülmemiş en büyük problemlerden biri olarak görüyorlar.

6. Bu bölümde genel görelilikle kuantum mekaniği arasındaki çelişkiyi görmenin bir yolunu tanımladım. Ama uzay ve zamanın gerçek doğasını araştırma temamıza uygun olarak genel görelilikle kuantum mekaniği arasında başka, daha az elle tutulur ama potansiyel olarak önemli bilmecelerin de ortaya çıktığına dikkatinizi çekmem gerekir. Bunlardan biri, klasik, kütleçekimsel olmayan kuramların (Maxwell'in elektrodinamiği gibi) bir kuantum kuramına dönüştürülmesinde kullanılan basityön-teminin klasik genel göreliliğe kadar yaygınlaştırılması (Şimdi Wheeler-De Witt denklemi olarak bilinen denklemde Bryce de Witt tarafından gösterildiği gibi) sırasında ortaya çıkar. Ortaya çıkan temel denklemde zaman değişkeni yer almaz. O yüzden, zamanın açıkça matematiksel olarak somutlaşması yerine -bütün diğer temel kuramlarda olduğu gibi- kütleçekimini kesikli hale getirmeye çalışılan bu yaklaşımda zamansal evrimin izi, evrenin düzenli bir şekilde değişmesini beklediğimiz fiziksel bir özelliği ile (yoğunluk gibi) sürülmelidir. Şimdilik, hiç kimse kütleçekiminin kesikli hale getirilmeye çalışıldığı bu sürecin uygun olup olmadığını bilmiyor (her ne kadar bu kuramin *halka kuantum kütleçekimi* adı verilen versiyonunda son yıllarda önemli gelişmeler sağlandıysa da; bkz Bölüm 16), bu nedenle açık bir zaman bağımlılığının olmayışının derin bir anlamı olup olmadığı (zaman ikincil bir kavram mı?) çok açık değil. Bu bölümde genel görelilikle kuantum mekaniğini birleştirme yolunda farklı bir yaklaşım olan *Süpersicim kuramı* üzerine odaklanıyoruz.
7. Sanki uzayda bir yermiş gibi, bir kara deliğin "merkezinden" söz etmek bir anlamda yanlıttır. Bunun nedeni, kabaca söylemek gerekirse, bir kimsenin kara deliğin olay ufkuna -dış kenarına- ulaştığında zaman ve uzayın rollerinin yer değiştirmesidir. Gerçekten, nasıl zamanda bir saniyeden diğerine gitmeye direnemiyorsanız, kara deliğin olay ufkunu geçtiğinizde kara deliğin "merkezine" doğru çekilmeye de direnemezsiniz. Zamanda ileriye doğru gitmekle kara deliğin merkezine doğru gitmek arasındaki bu benzerlik kara deliklerin matematiksel tanımını ile de güçlü bir şekilde desteklenir. Bu yüzden kara deliğin merkezini uzayda bir konum olarak düşünmek yerine, zamanda bir konum olarak düşünmek gerekir. Üstelik kara deliğin merkezinden öteye gidemeyeceğiniz için, onu zamanın sona erdiği uzay-zamanda bir konum olarak düşünme eğiliminde olabilirsiniz. Bu doğru da olabilir. Ama standart genel görelilik denklemleri böylesine büyük kütle yoğunluğu değerlerinde çoktğu için, böyle kesin cümleler kurmak pek doğru olmaz. Buradan da, eğer elimizde kara deliğin içlerinde bile çökmeyen denklemler olsaydı, zamanın doğası konusunda önemli bilgilere ulaşabilecek olduğumuz açıkça görülüyor. Süpersicim kuramının ana amaçlarından biri de budur.
8. Önceki bölümlerde olduğu gibi, "gözlenebilir evren" ile Büyük Patlama dan bu yana geçen zaman içinde evrenin, en azından ilke olarak, haberleşmiş olabileceğimiz bölümlerini kastediyorum. Bölüm 8'de incelendiği gibi, uzaysal olarak sonsuz bir evrende uzayın tamamı Büyük Patlama anında bir noktaya *sıkışmaz*. Elbette evrenin gözlenebilir kısımlarındaki her şey, başlangıca doğru gidildiğinde giderek daha küçük bir hacme sıkışacaktır ama göz önünde canlandırılması zor olsa da, madenin ve enerjinin yoğunluğu çok arttığında bile bizden sonsuza kadar ayırık kalacak -sonsuz derecede uzak- şeyler vardır.

9. Leonard Susskind "The Elegant Universe", NOVA, ilk olarak 28 Ekim-4 Kasım 2003 tarihlerinde yayımlanan üç saatlik PBS serisinde.
10. Gerçekten süpersicim kuramı için deneysel testler tasarlanmanın zorluğu, kuramın kabul edilebilirliğini zorlaştıran, son derece önemli bir engel olmuştur. Bununla birlikte, önümüzdeki bölümlerde göreceğimiz gibi, bu yönde büyük ilerlemeler olmuştur; sicim kuramcıları yakında başlayacak olan hızlandırıcı ve uzay deneylerinin kuramı koşullara bağlı olarak destekleyecek kanıtlar sağlayacağı, şansın da yardımıyla daha iyi şeylerin olacağı konusunda umutlular.
11. Her ne kadar metinde açıkça söz etmemiş de olsam, bilinen her parçacığın bir *karşı parçacığı* -aynı kütle ama ters kuvvet yüküne (ters elektrik yükü gibi) sahip olan parçacık- vardır. Elektronun karşı parçacığı pozitrondur; yukarı-kuarkın karşı parçacığı da, beklenebileceği gibi, karşı-yukarı-kuarktır vb.
12. Bölüm 13'te göreceğimiz gibi, sicim kuramı üzerinde son zamanlarda yapılan çalışmalar sicimlerin boylarının Planck uzunluğundan daha büyük olabileceğini ve bunun, kuramı deneysel olarak sınanabilir hale getirmek gibi bazı önemli sonuçları olabileceğini ortaya koyuyor.
13. Atomların varlığı başlangıçta dolaylı yollarla (çeşitli kimyasal maddelerin belirli oranlarda birleşmesi ve daha sonraları Brown hareketi gibi) tartışılmış; ilk kara deliklerin varlığı, onları doğrudan "görerek" değil, yakındaki yıldızlardan kara deliklerin üzerine düşen ışıkların etkileri gözlenerek (birçok fizikçiyi tatmin edecek şekilde) doğrulanmıştır.
14. Sakin bir biçimde titreşirken bile bir sicim *bir miktar enerjiye* sahip olduğundan, bir sicim titreşim deseninin nasıl kütesiz bir parçacığı temsil ettiğini merak ediyor olabilirsiniz. Cevap kuantum belirsizliği ile ilgilidir. Bir sicim ne kadar sakın olursa olsun, kuantum belirsizliği onun çok küçük bir ölçüde titreşip dalgalandığını söyler. Kuantum mekaniğinin acayıplığı nedeniyle belirsizlikten kaynaklanan bu titreşimlerin enerjileri *negatiftir*. Bu, bildiğimiz sicim titreşimlerinin en yumuşaklarıyla birleştiğinde, toplam kütle/enerji sıfır olur.
15. Matematiğe eğilimli okuyucu için, daha doğru ifade şudur: sicim titreşim modlarının kütlelerinin kareleri Planck kütesinin karesinin tamsayı kadarıyla verilir. Daha da kesin söylemek gerekirse (ve Bölüm 13'te incelenen gelişmelerle ilgili olarak) bu kütlelerin *kareleri sicim ölçeğinin* (ki sicim uzunluğunun tersinin karesiyle orantılıdır) tamsayı katlarıdır. Sicim kuramının geleneksel formüllemelerinde sicim ölçeği ve Planck kütesi birbirlerine yakındır ki, ana metinde durumu basitleştirmek için yalnızca Planck kütesinden söz etmemin nedeni budur. Bununla birlikte, Bölüm 13'te sicim ölçeğinin Planck kütesinden farklı olabileceği durumları da göz önüne alacağız.
16. Planck uzunluğunun Klein'ın çözümlemesine nasıl sızdığını anlamak çok zor değildir. Genel görelilik ve kuantum mekaniğinde doğanın üç temel sabiti kullanılır: c (ışık hızı), G (kilitçekimi sabiti) ve $\hbar$ (kuantum etkilerinin büyüklüğünü tarif eden Planck sabiti). Bu üç sabit birleştirilerek uzunluk boyutuna sahip olan bir büyüklük oluşturulabilir: $[\hbar G/c^3]^{1/2}$. Bu ise, tanım olarak Planck uzunluğundan başka bir şey değildir. Bu üç sabitin sayısal değerleri yerlerine konursa, Planck uzunluğunun değerinin 1.616×10^{-35} cm olduğu bulunur. Bu yüzden, kuramdan değeri 1'den çok farklı ve boyutsuz bir sayı çıkmadıkça -ki bu, basit ve iyi formülleştirilmiş bir kuramda çok ander olur- Planck uzunluğunun, kıvrılmış uzaysal boyutlar gibi boyutların karakteristik büyüklüğü olmasını bekleyebiliriz. Yine de bunun, kıvrılmış boyutların büyüklüğünün Planck uzunluğundan daha büyük olmaları olasılığını bertaraf etmediğine özellikle dikkat edin. Bölüm 13'te bu olasılığı yoğun bir şekilde araştıran, çağdaş bir çalışmadan söz edeceğiz.
17. Elektron elektrik yüküne ve onun minik kütesine sahip olan bir parçacığın yerleştirilmesi, yenilmesi zor bir güçlük oluştuyordu.
18. Dikkat ederseniz, evrenin şeklinin çeşitliliğini sınırlamak için Bölüm 8'de kullanmış olduğumuz birörnek simetri gerekliliği, *üç büyük boyut* içindeki astronomi gözlemle-

rinden (mikrodalga fon gözlemleri gibi) kaynaklanmıştır. Bu simetri sınırlamalarının olası altı minik fazladan uzay boyutunun şekliyle bir ilgisi yoktur. Şekil 12.9a, Andrew Hanson tarafından yaratılan bir görüntüye dayanıyor.

19. Yalnızca fazladan uzay boyutları değil, aynı zamanda fazladan zaman boyutları olup olmadığım da merak ediyor olabilirsiniz. Araştırmacılar (Güney Kaliforniya Üniversitesi'nden Itzhak Bars gibi) bu olasılığı araştırmış ve kuramları en azından fiziksel olarak mantıklı görünen ikinci bir zaman boyutuyla formülleştirilmenin olası olduğunu göstermişlerdir. Ama bu ikinci zaman boyutunuz bildiğimiz zaman boyutuna eşit mi olduğu yoksa yalnızca matematiksel bir araç mı olduğu henüz anlaşılmamıştır; genel eğilim ikinci olasılığın daha güçlü olduğu yolundadır. Tersine, sicim kuramının en basit yorumu, fazladan uzay boyutlarının en az bildiğimiz üç boyut kadar gerçek olduğunu söylüyor.
20. Sicim kuramı uzmanları (ve *Evrenin Zarafeti* Bölüm 12'yi okumuş olanlar), daha kesin ifadenin "sicim kuramının belirli formülleştirilmelerinin (bu kitabın 13. Bölümünde anlatılmıştır) on bir uzay-zaman boyutuna kadar izin verdiği" olduğunu fark edeceklerdir. Sicim kuramının temel olarak on bir uzay-zaman boyutuna sahip olan bir kuram olarak mı bakılması gerektiği, yoksa on bir boyutlu formülleştirmeye diğer boyutlara eşit, özel bir sınır (örneğin, 11A Türü formülleştirmede sicim eşleşme sabitinin büyük alınması gibi) olarak mı bakılması gerektiği konusunda tartışmalar hâlâ sürmektedir. Bu ayrım, bizim genel düzeyli incelememizde çok etkili olmadığı için, ben ilk bakış açısını seçtim. Bunun nedeni sabit ve birörnek bir toplam boyut sayısına sahip olmanın anlatımsal kolaylığıdır.

Bölüm 13

1. Matematığe eğilimli okuyucu için, burada sözünü ettiğim *konformal*/simetridir, yani önerilen temel bileşen süpürülen uzay-zaman hacmi üzerindeki açılarn keyfi bir biçimde korunduğu dönüşümler altındaki simetritler. Sicimler iki uzay-zaman boyutlu yüzeyleri süpürürler ve sicim kuramının denklemleri, *sonsuz* boyutlu bir simetri grubu olan iki boyutlu konformal grup altında değişmezdir. Bunun tersine, kendileri bir boyutlu olmayan cisimlerle ilişkili olarak, uzay-zaman boyutlarının başka sayılarında konformal grup sonlu-boyutludur.
2. Bu gelişmelere birçok fizikçi, hem altyapı sağlamak hem de izleyen keşiflerde rol almak yoluyla önemli katkılarda bulunmuşlardır: Michael Duff, Paul Howe, Takeo Inami, Kelley Stelle, Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin, Paul Townsend, Chris Hull, Chris Pope, John Schwartz, Ashoke Sen, Andrew Strominger, Curtis Callan, Joe Polchinski, Petr Hofava, J. Dai, Robert Leigh, Hermann Nicolai, Bernard deWit ve pek çok başka araştırmacı.
3. Aslında *Evrenin Zarafeti* kitabında 12. Bölümde açıklandığı gibi, ihmal edilen onuncu uzay boyutu ve p-zarlar arasında daha da sıkı bir ilişki vardır. Diyelim 11A türü formülleştirmedeki onuncu uzay boyutunun büyüklüğünü arttırdığınızda, bir boyutlu sicimler iki boyutlu iç tüplere benzeyen zarlara dönüşürler. Eğer onuncu boyutun bu keşiflerden önce her zaman yapılageldiği gibi, çok küçük olduğunu varsayarsanız, iç tüpler sicim gibi davranırlar. Sicimler için durum böyle olduğundan, bu yeni bulunan zarların bölünmez mi olduğu, yoksa onların da daha küçük yapıtaşlarından mı oluştuğu sorusu cevapsız kalır. Araştırmacılar şimdiye kadar sicim/M kuramında bulunan bileşenlerin, evrenin yapıtaşlarının araştırılmasına bir son vermeyeceği olasılığına da açıklar. Yine de son vermeleri olasılığı vardır. Şimdi anlatacaklarımızın çoğu bu konuyla ilişkili olduğu için en basit bakış açısını benimseyecek ve bütün bileşenlerin -sicimler ve çeşitli boyutlardaki zarlar- temel olduğunu varsayacağız. Daha yüksek boyutlu temel bileşenlerin fiziksel olarak anlamlı bir yapı içine uydurulamayacağını ileri süren daha önceki düşünceler ne olacak? O düşüncelerin kökeni bir başka kuantum mekanikine özgü yaklaşımdır şemasındaydı, ki bu yaklaşım standart ve sınanmış olmakla birlikte, heryaklaşım gibi bazı sınırlamaları vardı. Her ne kadar araştırmacılar şimdiye kadar kuantum

mekanikinin yüksek boyutlu cisimleri kapsamasındaki zorlukları hesaplamış değilse de, bu bileşenler beş sicim formülleştirilmesine de o kadar mükemmel ve tutarlı bir biçimde uyum sağlıyorlar ki, pek çok kimse kutsal fizik ilkelerinin korkulan şekilde ihlal edilmeyeceğine inanıyor.

4. Aslında üçü bildiğimiz uzayı dolduran, diğer boyutları ise kuramın gerektirdiği daha küçük, fazladan boyutları dolduran daha yüksek boyutlu bir zar üzerinde (bir dört-zarya da bir beş-zar) yaşıyor olabiliriz.
5. Matematiğe eğilimli okuyucu yıllar boyunca sicim kuramcılarının, sicimlerin T-ikiliği (Bölüm 16'da ve *Evrenin Zarafeti* kitabının 10. Bölümünde açıklandığı gibi) adı verilen kurala uyduğunu bildiklerine dikkat etmelidir. T-ikiliği, temelde, eğer fazladan boyut bir çember şeklinde ise, sicim kuramı için bu çemberin yarıçapının R ya da $1/R$ olmasının önemsiz olmasıdır. Bunun nedeni şudur: sicimler çemberin çevresinde hareket edebilirler ("momentum modları") ve/veya çemberin çevresine sarılabilirler ("sarılma modları") ve fizikçiler, eğer R , $1/R$ ile değiştirilirse, bu modların rollerinin birbirleri ile değişeceğini fakat kuramın geri kalan fiziksel özelliklerinin aynı kalacağını anlamışlardır. Bu mantığın temeli, sicimlerin kapalı halkalar olmasıdır çünkü eğer sicimler açık olurlarsa, bunların çembersel bir boyutun etrafına sarılmaları için topolojik olarak dengeli bir çözüm olmamasıdır. O yüzden, ilk bakışta açık ve kapalı sicimler T-ikiliği altında tümüyle farklı davranıyorlarmış gibi görünür. Ama Polchinski, Dai, Leigh, Horava, Green ve başka araştırmacılar, daha yakından bakıp açık sicimler için Dirichlet sınır koşullarını kullanarak bu bilmeceyi çözmüşlerdir.
6. Karanlık madde veya karanlık enerjiyi yasaklamaya çalışan öneriler, kütleçekiminin büyük ölçeklerde kabul edilen davranışının bile Newton veya Einstein'ın hesapladığından farklı olabileceğini ve bu yolla, yalnızca görebildiğimiz maddeyle uyumlayan kütleçekimsel etkileri açıklayabileceğimizi ileri sürmüşlerdir. Ama şimdilik bu öneriler yalnızca kurgusal olup deneysel ya da kuramsal türde çok az desteğe sahiptir.
7. Bu fikri ortaya atan fizikçiler S. Giddings, S. Thomas, S. Dimopoulos ve G. Landsberg'dir.
8. Dikkat edilirse, böyle seken bir evrenin çökme evresi genişleme evresinin tersine oynatıldığı durumla aynı değildir. Yumurtanın kırılması ve mumun erimesi genişleme evresinde zamanın olağan, "ileri" yönünde ortaya çıktığı gibi çökme evresinde de aynı şekilde ortaya çıkmayı sürdürür. Entropinin her iki evrede de artmasının nedeni budur.
9. Konuyu bilen okuyucu, yinelenen modelin üç-zarlardan biri üzerinde dört boyutlu etkili alan kuramının diliyle de ifade edilebileceğine ve bu biçimde daha bilindik skaler-alan kaynaklı şişme modellerinin pek çok özelliğini paylaşacağına dikkat etmelidir. "Radikal biçimde yeni bir mekanizma" derken, kendisi de kozmoloji hakkında düşünmenin çarpıcı, yeni bir yolu olan, çarpışan zarlar cinsinden kavramsal bir tarifi kastediyorum.
10. Boyut sayımında kafanız karışmasın. Bu iki üç-zar, aralarındaki uzay aralığıyla birlikte dört boyuta sahiptir. Zaman boyutların sayısını beşe çıkarır. Geriye altı tane daha Calabi-Yau uzayı kalır.
11. Bu bölümün sonunda ve ayrıntılı olarak Bölüm 14'te söz edilen önemli bir istisna, kütleçekimi alanındaki türdeşlik bozukluklarıyla ilgili olan ilkel kütleçekimi dalgalarıdır. Şişme kozmolojisi ve yinelenen model bu anlamda birbirlerinden farklıdır, birbirlerinden deneysel olarak ayırt edilme olasılıkları vardır.
12. Kuantum mekaniği rasgele bir dalgalanmanın yinelenen süreci (örneğin bir zarın diğerine göre bükülmesi) bozması ve modeli durdurmasının her zaman sıfırdan farklı bir olasılığı olduğunu bildirir. Olasılık son derece küçük de olsa, er geç gerçekleşecek ve yinelenmeler sonsuza kadar sürmeyecektir.

1. A. Einstein, "Vierteljahrschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen" 44 37 (1912) D. Brill ve J. Cohen, *Phys. Rev.* Cilt 143 no 4, 1011 (1966); H. Pfister ve K. Braun, *Class. Quantum Grav.* 2, 909 (1985).
2. Schiff ve Pugh'un özgün önerilerinden sonraki kırk yıl içinde diğer yapı sürüklenmesi deneyleri gerçekleştirildi. Bu deneylerde (Bruno Bertotti, Ignazio Ciufolini ve Peter Bender; I. I. Shapiro, R. D. Reasenberg, J. F. Chandler, R. W. Babcock ve diğerleri tarafından yapılmıştır) Ay'ın hareketi ile birlikte yer çevresindeki uyduların hareketleri incelenmiş ve yapı sürüklenmesine ilişkin bazı kanıtlar bulunmuştur. Kütleçekimi B Sondasının (Gravity Probe B) bir büyük avantajı, tümüyle deneycilerin kontrolünde olması ve bu nedenle yapı sürüklenmesinin en kesin ve en doğrudan kanıtlarını vermesidir.
3. Bunlar her ne kadar Einstein'ın keşfi konusunda bir fikir vermede etkili ise de, eğrilmış uzayın standart görüntülerinin bir başka sınırlaması, zamandaki eğrilmeleri göstermemesidir. Genel görelilik Güneş gibi sıradan bir cisim için, kara delik gibi uç bir cismin tersine zamandaki eğrilme (Güneşe ne kadar yaklaşırsanız, saatiniz o kadar yavaşlar) uzaydaki eğrilmeden çok daha belirgin olduğunu gösterdiği için bu önemlidir. Hem zamandaki eğrilmeyi çizimde göstermek, hem de eğrilmış zamanın Dünya'nın Güneş çevresindeki eliptik yörüngesi gibi eğri, uzaysal yörüngelere nasıl etki yaptığını anlatmak daha zordur. Şekil 3.10'un (ve genel göreliliği görselleştirmeye çalışan bütün şekillerin) yalnızca eğrilmış uzayda çizilmelerinin nedeni budur. Ama birçok genel astrofiziksel ortamda zamandaki eğrilmenin daha baskın olduğunu hatırla tutmaktayız var.
4. 1974'te Russell Hulse ve Joseph Taylor bir çift pulsar (atarca) sistemi -birbirlerinin etrafında dönen iki pulsar (hızla dönen nötron yıldızı)- keşfettiler. İki pulsar çok hızlı hareket ettikleri ve birbirlerine çok yakın oldukları için, Einstein'ın genel göreliliği bunların çok miktarda kütleçekimsel ışıınım yayacağını öngörür. Bu ışıınımı doğrudan saptamak çok zor olsa da, genel görelilik bu ışıının kendisini başka yollarla açığa çıkaracağını söyler: ışıınımla yayılan enerji iki pulsarın yörünge periyodunu yavaş yavaş azaltmalıdır. Pulsarlar keşfedildikleri günden itibaren sürekli olarak gözlenmişlerdi ve yörünge periyodu gerçekten kısalmıştı. Üstelik bu kısalma genel göreliliğin hesapladığı miktara 1000'de 1 oranında yakındı. Bu yüzden, yayılan kütleçekimsel ışıınım doğrudan gözlenmesi de, varlığı konusunda güçlü bir kanıt oluştuyordu. Keşifleri nedeniyle Hulse ve Taylor 1993 yılında Nobel Fizik Ödülünü aldılar.
5. Bununla birlikte yukarıya, Not 4'e bakınız.
6. Bu nedenle enerjilik açısından kozmik ışıınlar, sahip olduğumuz ya da öngörülebilir bir gelecekte yapabileceğimiz hızlandırıcılardan çok daha güçlü ve doğal bir hızlandırıcı oluşturur. Kusura ise, kozmik ışıınlardaki parçacıklar son derece yüksek enerjilere sahip olabilmelerine rağmen neyin neyle çarpıştığı konularında bizim hiçbir kontrolümüzün olmamasıdır. Kozmik ışıın çarpışmalarında bizler edilgen gözlemcileriz. Üstelik enerji düzeyi arttıkça, bu enerjilere sahip olan kozmik parçacıkların sayısı hızla azalır. Dünya yüzeyinin her kilometrekaresine saniyede, proton kütesine eşdeğer enerjiye sahip (Büyük Hadron Çarpıştırıcısının tasarım kapasitesinin binde biri) yaklaşık 10 milyar kozmik parçacık çarpıyorsa da (her saniye bedeninizin içinden de birkaç tanesi geçer), en yüksek enerjili parçacıklardan (proton kütesinin yüz milyar katı enerjiye sahip) yeryüzünün her kilometrekaresine *yüzyılda* çarpan parçacık sayısı yaklaşık bir tanedir. Hızlandırıcılar parçacıkları zıt yönlerde hızlandırarak çarpıştırabilir, böylece büyük bir kütle merkezi enerjisi yaratabilirler. Kozmik ışıın parçacıkları ise, bunun tersine, atmosferde görelilik olarak yavaş hareket eden parçacıklara çarpar. Yine de bu kusurlar, üstesinden gelinmez değildir. On yıllar süresince deneyciler bol bulunan, düşük-enerjili kozmik ışıın parçacıklarını inceleyerek çok şey öğrenmişler ve yüksek-enerjili çarpışmalar için azlığına rağmen çok sayıda parçacık yakalayabilmek için devasa detektör sistemleri

- kurmuşlardır.
7. Konuyu bilen okuyucu dinamik uzay-zamanla bir kuramda enerjinin korunumunun gerçekleşmesinin karışık bir konu olduğunu anlayacaktır. Elbette bütün kaynakların stres tensörü Einstein denklemleri için kovaryant bir biçimde korunacaktır. Ama bu, zorunlu olarak enerji için genel bir enerji korunumu yasasının varlığı anlamına gelmez. Bunun iyi bir nedeni vardır. Stres tensörü kütleçekimsel enerjiyle- genel görelilik için son dere güç bir kavram- ilgili değildir. Yeterince kısa uzaklık ve zaman ölçeklerinde -ki bunlar hızlandırıcı deneylerinde ortaya çıkar- yerel enerji korunumu geçerlidir ama genele, küresel korunum ifadelerinde dikkatli olmak gerekir.
 8. Bu en basit şişme modelleri için doğrudur. Araştırmacılar daha karmaşık şişme modellerinin kütleçekimi dalgalarının üretilmesini durdurduğunu bulmuşlardır.
 9. Kabul edilebilir bir karanlık madde adayı dengeli ve çok uzun ömürlü bir parçacık -diğer parçacıklara bozunmayan bir parçacık- olmalıdır. Süpersimetrik eş parçacıklardan en hafiflerinde bunun geçerli olması bekleniyor. Bu nedenle daha kesin bir ifade, zino, higgsino veya fotinonun en hafiflerinin uygun karanlık madde adayları olduğudur.
 10. Çok uzun olmayan bir zaman önce, işbirliği yapan ve Karanlık Madde Deneyi (DAMA) olarak bilinen bir İtalyan-Çin araştırmacılar grubu, İtalya'daki Gran Sasso Laboratuvarı'nda çalıştıkları sırada karanlık maddenin ilk saptanmasını gerçekleştirdikleri yolunda heyecan uyandıran bir açıklama yaptılar. Ama şimdiye kadar başka hiçbir grup bu iddiayı doğrulayamadı. Aslında Stanford'da üslenen, Amerikalı ve Rus bilim insanlarını kapsayan Kriyojenik Karanlık Madde Araştırması (Cryogenic Dark Matter Search, CDMS), birçoklarının DAMA'nın sonuçlarını bertaraf ettiğini düşündükleri veriler elde ettiler. Bu karanlık madde araştırmalarının yanı sıra birçok araştırma da hazırlık evresindedir. Bu konularda bilgi almak için http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/dark_matter/other_searches.html web adresine bakabilirsiniz.

Bölüm 15

1. Bu cümle, Bohm'uniki gibi gizli-değişken yaklaşımını göz ardı ediyor. Ama böyle yaklaşımlarda bile, cismin kuantum durumunu (dalga fonksiyonunu) tele-taşımak isteriz, bu nedenle yalnızca konumun ve hızın ölçülmesi yeterli olmaz.
2. Zeilinger'in araştırma grubu aynı zamanda Dick Bouwmeester, Jian-Wi Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl ve Harald Weinfurter'i; De Martini'nin grubu ise S. Giacomini, G. Milani, F. Sciarrino ve E. Lombardi'yi de içeriyor.
3. Kuantum mekaniğinin matematiksel gösterimini biraz bilen okuyucu için, kuantum tele-taşımanın temel adımları aşağıdaki gibidir. Varsayın ki benim New York'ta sahip olduğum fotonun başlangıç durumu $|F\rangle = |O\rangle + |I\rangle$ olsun. Burada $|O\rangle$ ve $|I\rangle$ iki foton polarizasyon durumu olup, belirli, normalize edilmiş ama keyfi katsayı değerlerine izin veriyor olalım. Amacım Nicholas'a, onun Londra'da tam olarak aynı kuantum durumunda bir foton üretmesi için yeterli bilgiyi vermektir. Bunu yapabilmek için önce Nicholas'ın ve benim, diyelim $|F\rangle = (|O\rangle + |I\rangle)/\sqrt{2}$ durumunda bir çift fotonumuzun olması gerekir. Bu yüzden, üç fotonlu sistemin başlangıç durumu $|F\rangle = (|O\rangle + |I\rangle)/\sqrt{2}$ olur. Foton 1 ve Foton 2 üzerinde Bell-durumu ölçümü yaptığımız zaman sistemin bu parçasını şu dört durumdan biri üzerine indirgeyebiliriz: $|O\rangle = (|O\rangle + |I\rangle)/\sqrt{2}$, $|I\rangle = (|O\rangle - |I\rangle)/\sqrt{2}$, $|O\rangle = (|O\rangle + |I\rangle)/\sqrt{2}$ ve $|I\rangle = (|O\rangle - |I\rangle)/\sqrt{2}$. Şimdi, Parçacık 1 ve Parçacık 2 için eigen durumların temelini kullanarak başlangıç durumunu yeniden ifade ederek, $|F\rangle = (|O\rangle + |I\rangle)/\sqrt{2}$ olur. Bu yüzden, ölçümümü yaptıktan sonra sistemi bu dört terimden biri üzerine "çöktürürüm". Nicholas ile (normal yollarla) haberleşip hangi terimi bulunduğumu bildirdikten sonra, Nicholas artık Foton 1'in özgün durumunu elde etmek için Foton 3'ü nasıl değiştirmesi gerektiğini bilir. Örneğin, eğer ölçümümün $|O\rangle$ durumunu verdiğini bulmuşsam, Nicholas Foton 3'e bir şey

yapmak zorunda değildir, çünkü yukarıdaki gibi Foton 3 zaten Foton 1'in özgün durumundadır. Eğer herhangi başka bir sonuç bulursam, Nicholas uygun bir dönme operasyonu uygulayarak (görebileceğiniz gibi, bunu benim bulduğum sonuç beliriyor) Foton 3'ü istenen duruma getirir.

4. Aslında matematiğe eğilimli okuyucu, "kuantumda kopyalama olmaz" adı verilen teoremi ispatlamanın çok zor olmadığını fark edecektir. Herhangi verilen bir durumu girdi olarak alan ve çıktı olarak da bunun iki kopyasını üreten üniter bir U kopyalama operatörü olduğunu varsayalım (herhangi bir $\mathcal{H} > \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2$ girdi durumu için $U: \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2 \rightarrow \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2$). Dikkat edilirse $U: (\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2) \rightarrow (\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2)$ gibi bir duruma uygulandığı zaman $(\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2) \rightarrow (\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2)$ ortaya çıkar ki bu da özgün durumun ikili kopyası olan $(\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2) \rightarrow (\mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2)$ değildir. Bu nedenle kuantum kopyalaması yapacak böyle hiçbir U operatörü yoktur. (Bu, ilk olarak 1980'lerin başlarında Wootters ve Zurek tarafından gösterilmişti.)
5. Kuantum tele-taşımanın gerçekleştirilmesinin kuramsal ve deneysel gelişimiyle pek çok araştırmacı ilgilenmiştir. Metinde söz edilenlerin yanı sıra birkaç isim vermek gerekirse, Cambridge Üniversitesi'nde iken Sandu Popescu'nun çalışmaları Roma deneylerinde önemli rol oynamış, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'ndeki Jeffrey Kimble'in grubu kuantum durumunun sürekli özelliklerinin tele-taşımasında öncülük etmiştir.
6. Çok-parçacık sistemlerinin bağlantılılığı üzerine son derece ilgi çekici bir çalışma için, bkz. B. Julsgaard, A. Kozhekin ve E. S. Polzik, "Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects", *Nature* 413 (Eyl. 2001), 400-403.
7. Kuantum bağlantılılığı ve kuantum tele-taşımayı kullanan en heyecan verici ve etkin araştırma alanlarından biri, kuantum hesaplama alanıdır. Kuantum hesaplamının modern ve genel-düzeydeki bir sunumu için bkz. Tom Siegfried, *The Bit and the Pendulum* (New York: John Wiley, 2000) ve George Johnson, *A Shortcut Through Time* (New York: Knopf, 2003).
8. Bölüm 3'te incelemediğimiz ama bu bölümde önemli bir rol oynayacak olan artan hızla zamanın yavaşlamasının bir özelliği ikiz paradoksu adı verilen çelişkili durumdur. Konunun ifadesi son derece basittir: eğer siz ve ben birbirimize göre sabit bir hızla hareket ediyorsak, ben sizin saatinizin benimkine göre daha yavaş çalıştığını düşünürüm. Ama siz de benim kadar hareketsiz olanın kendiniz olduğunu iddia edebileceğiniz için, hareket edenin benim saatim olduğunu, bu yüzden yavaşlayan saatin benimki olduğunu düşünürsünüz. Her birimizin, diğerinin saatinin yavaşladığını iddia etmesi çelişkili gibi görünüyorsa da öyle değildir. Sabit hızda, saatler birbirlerinden giderek uzaklaşacaklarından, hangisinin "gerçekten" yavaşladığını belirlemek için yüz yüze bir karşılaştırma yapmak olası değildir. Bütün diğer dolaylı karşılaştırmalar (örneğin, saatlerimizin gösterdiği zamanı cep telefonuyla konuşarak birbirimize iletebiliriz) uzaysal ayrıklıktan kaynaklanan bir zaman farkıyla gerçekleşeceği için, zorunlu olarak Bölüm 3 ve 5'te sözü edilen, farklı gözlemcilerin şimdi kavramlarındaki karmaşıklıkları için içine sokar. Bunları yeniden anlatmayacağım ama özel göreliliğe ilişkin bu karmaşıklıklar da çözümlenmeye girdiği zaman, her birimizin diğerinin saatinin yavaş çalıştığını öne sürmemizde bir çelişki olmaz (Teknik ama basit ve bütünlüklü bir inceleme olarak J. A. Wheeler'in *Spacetime Physics* adlı kitabına bakabilirsiniz). Eğer yavaşlayıp durursanız, sonra da dönerek bana doğru hareket ederseniz, saatleri yüz yüze karşılaştırarak farklı şimdi kavramlarından kaynaklanan karmaşıklıkları ortadan kaldıracak ama görünüşe göre olaylar daha içinden çıkmaz hale gelir. Karşılaştığımızda hangimizin saati diğerinden ileride olur? ikiz paradoksu adı verilen çelişki budur: eğer siz ve ben ikiz olsak, karşılaştığımız zaman aynı yaşta mı oluruz yoksa birimiz daha mı yaşlı oluruz? Cevap, benim saatimin sizinkinden ileride olacağıdır, yani ben daha yaşlı olurum. Bunun nedenini açıklamamın birçok yolu var ama en basiti, sizin hızınızı değiştirip ivmelendiğiniz zaman perspektiflerimiz arasındaki simetrisinin bozulmasıdır; hareket edenin kesinlikle siz olduğunu id-

- dia edebilirsiniz (örneğin, bunu *hissettiginiz* için veya Bölüm 3'teki tartışmaya göre, benimkinin tersine, sizin uzay-zamandaki yolunuz artık doğrusal değildir) ve bu yüzden sizin saatiniz benimkine göre yavaşlar. Sizin için geçen zaman benimkinden daha azdır.
9. Diğerlerinin yanı sıra John Wheeler 'da bir kuantum evreninde gözlemcinin sahip olduğu önemli rolü, ünlü aforizmalarından birinde şöyle özetlemiştir: "Basit bir olay, gözlenen bir olay olana kadar olay sayılmaz". Wheeler'in olağanüstü fizik hayatı hakkında daha çok şey öğrenmek için John Archibald Wheeler ve Kenneth Ford, *Oeons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998) kitabına bakabilirsiniz. Roger Penrose 'da kuantum fiziği ve zihin arasındaki ilişkileri , kendi yazdığı *The Emperor's New Alind ve Shadows of the Alind: A Search fort he Alissing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford University Pres, 1994) kitaplarında incelemiştir.
 10. Örneğin, bkz. "Reply to Criticisms", *Albert Einstein, The Library of Living Philosophers* c.7, P. A. Schilpp, ed. (New York: MJF Boks, 2001)
 11. W. J. Van Stockum, *Proc. R. Soc. Edin. A57* (1937), 135.
 12. Konuyu bilen okuyucu basitleştirme yaptığını görecektir. 1966'da John Wheeler'in öğrencisi olan Robert Geroch, en azından ilke olarak, uzayı delip yırtmadan bir solucan deliği yapmanın olası olduğunu gösterdi. Ama solucan deliği yapmanın daha sezgisel, uzayı delen ve solucan deliğinin varlığının zamanda yolculuğa olanak vermediği yaklaşımdan farklı olarak Geroch'un yaklaşımında yapım evresinin kendisi zorunlu olarak zamanı o kadar eğiltir ki, zamanda özgürce ileriye veya geriye gidilebilir (amayapımın başlangıcından daha eskiye gidilemez).
 13. Eğer uzayda böyle egzotik madde bulunan bir bölgeden hemen hemen ışık hızıyla geçer ve saptadığınız bütün enerji yoğunluk ölçümlerinin ortalamasını alırsanız, bulacağınız sonuç negatif olacaktır. Fizikçiler böyle egzotik maddenin, ortalaması alınmış zayıf enerji koşulunu ihlal edeceğini söylüyorlar.
 14. Egzotik maddenin en basit ortaya çıkışı, Bölüm 12'de incelenen Gasimir deneyindeki paralel plakalar arasındaki boşluk dalgalanmaları ile olur. Hesaplar, plakalar arasındaki kuantum dalgalanmalarının boş uzaya göre daha az olmasının negatif enerji yoğunluğu (ve negatif basınç) ortaya çıkardığını gösteriyor.
 15. Solucan deliklerine ilişkin pedagojik ama teknik bir inceleme için bkz. Matt Visser, *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (New York: American Institute of Physics Pres, 1996).

Bölüm 16

1. Matematiğe eğilimli okuyucu için, Bölüm 6'daki 6. notta hatırlanacağı üzere, entropi, yeniden düzenlenmelerin (durumların) sayısının *logaritması* olarak tanımlanır ve bu örnekte doğru cevap elde etmek için bunun önemi vardır. İki kabı birleştirdiğinizde hava moleküllerinin çeşitli durumları, ilk kaptaki hava moleküllerinin durumları, sonra da ikinci kaptaki hava moleküllerinin durumları verilerek belirlenir. Bu yüzden, birleşmiş olan kaplar için yeniden düzenlenmelerin sayısı, her birinin tek tek düzenlenme sayısının karesidir. Logaritmayı aldıktan sonra, bu bize entropinin iki katına çıktığını bildirir.
2. Farklı birimlere sahip oldukları için bir hacimle bir alanı karşılaştırmanın gerçekten pek de anlam ifade etmediğini fark edeceksiniz. Burada aslında kastettiğim, metinden de anlaşılacağı gibi, hacmin yarıçapla büyüme hızının alanın yarıçapla büyüme hızından çok daha büyük olmasıdır. Bu yüzden, entropi hacme değil yüzey alanına bağlı olduğu için, bölgenin boyutuyla, hacme bağlı olması durumundan daha yavaş artar.
3. Bu, entropi sınırı hakkında fikir veriyor olsa da, konuyu bilen okuyucu burada bir basitleştirme yaptığını fark edecektir. Raphael Bousso tarafından ileri sürüldüğü gibi, bu sınırın kesinliğinin artması boş hiperyüzeyden geçen akının (odaklama parametresi olan © her yerde pozitifdir) A/4 ile sınırlı olması demektir. Burada A

boş hıpeyüzeyin ("ışık-yaprağının) uzaysal arakesitinin yüzey alanıdır.

4. Daha doğrusu, bir kara deliğin entropisi olay ufkunun alanının Planck birimiyle ifade edilen miktarının 4'e bölünüp Boltzmann sabitiyle çarpılmasıyla bulunur.
5. Matematiğe eğilimli okuyucu Bölüm 8'in notlarından, bir gözlemcinin nedensel temasta olabileceği ve olamayacağı şeyleri ayıran yüzey olan bir başka ufuk kavramı -kozmik ufuk- olduğunu da hatırlayabilir. Böyle ufukların da, yine onların yüzey alanlarıyla orantılı olan entropiyi arttıracasına inanılıyor.
6. 1971'de Macaristan doğumlu fizikçi Dennis Gabor, *holografı* adı verilen şeyi bulduğu için Nobel ödülü aldı. Başlangıçta elektron mikroskoplarının çözümleme gücünü arttırmak amacıyla yola çıkan Gabor, 1940 larda bir cisimden yansıyan ışık dalgalarından daha fazla bilgi elde etmek için çalışıyordu. Örneğin bir fotoğraf makinesi ışık dalgalarının şiddetini kaydeder, fotoğrafta bu şiddetin daha büyük olduğu yerlere daha parlak, düşük olduğu yerlere ise daha karanlık noktalar koyar. Gabor ve pek çok başkaları şiddetin bir ışık dalgasının taşıdığı bilgilerin yalnızca küçük bir bölümü olduğunu fark etmişlerdi. Bunu, örneğin Şekil 4.2b'de görüyoruz: girişim deseni ışığın şiddetinden (genliğinden) etkileniyor olsa da (daha yüksek genlikli dalgalar bütün olarak daha parlak desen oluşturur), desenin kendisi, iki yarıktan geçerek detektör ekranına ulaşan dalgaların tepelerinin, çukurlarının veya rasgele bölgelerinin girişi sonucunda ortaya çıkar. Bu ikinci bilgiye *faz bilgisi* verilir: eğer verilen bir noktada iki ışık dalgası birbirini destekliyorsa (eğer aynı zamanda tepe ya da çukur noktasına ulaşıyorlarsa) *aynı fazda*, birbirlerini sönümlendiriyorlarsa (biri tepe noktasına ulaşırken diğeri çukur noktasına ulaşıyorsa) *ters fazda* olurlar. Daha genel olarak, bu noktalarda bu iki uç noktanın dışında, arada bir yerde kalmışlarsa, birbirlerini kısmen destekler ya da kısmen sönümlendirirler. Bu nedenle bir girişim deseni, girişen ışık dalgalarının faz bilgilerini kaydeder. Gabor bir cisimden yansıyan ışık dalgalarının faz bilgilerinin hem de faz bilgilerinin özel olarak tasarlanmış bir film üzerine kaydedilmesinin bir yolunu buldu. Modern dile çevirirsek, Gabor'un yaklaşımı Şekil 7.1'deki deney düzeneğine benzer ama iki lazer ışınının biri ilgili cisimden yansıyarak detektör ekranına ulaşır. Eğer ekrana uygun bir fotoğrafemülsiyonu kaplı olan bir film yerleştirilmişse, ekrana doğrudan ulaşan ışınla yansıyarak ulaşan ışın arasında bir girişim deseni -film-in yüzeyinde minik çizikler şeklinde- kaydedilecektir. Girişim deseni hem yansıyan ışının şiddetini, hem de iki ışın arasındaki faz ilişkilerini kapsayacaktır. Gabor'un görüşleri bilim açısından son derece dallanıp budaklandı ve biri dizi yeni ölçüm tekniğinin geliştirilmesini de beraberinde getirdi. Ama kamuoyu açısından en önemli sonuç, sanatsal ve ticari hologramların geliştirilmesi oldu.

Sıradan fotoğraflar yalnızca ışık şiddetini kaydettikleri için düz görünürler. Derinlik vermek için faz bilgisine ihtiyaç vardır. Bunun nedeni bir ışık dalgası hareket ederken bir tepe, bir çukur, sonra yeniden bir tepe gelmesi, böylece faz bilgisinin, daha doğrusu cismin birbirine yakın bölgelerinden yansıyan ışınlar arasındaki faz farklarının ışınların aldığı yollar arasındaki farklar konusunda bilgi taşımasıdır. Örneğin bir kediye karşıdan bakarsanız, gözleri burnundan biraz daha geridedir ve bu derinlik farkı gözden ve burundan yansıyan ışık ışınları arasındaki faz farkında gizlidir. Bir hologramı lazerle aydınlatığınızda hologramın kaydettiği bu bilgiyi açığa çıkarabiliriz ki bu da görüntüye derinlik katar. Sonuçları hepimiz görmüşüzdür: iki boyutlu plastikten üretilen üç boyutlu, olağanüstü görüntüler. Ama dikkat ederseniz gözleriniz derinliği görmek için faz bilgisini kullanmaz. Gözler bu amaçla paralaksı kullanır: verilen bir noktadan sol ve sağ gözünüze çok az farklı açılarla ulaşan ışık ışınları, beyninizde şifresi çözülerek cismin uzaklığı hakkında bilgi verir, işte bir gözünüzün görüş yeteneği kaybolduğunda (veya bir gözünüzü bir süre kapalı tuttuğunuzda) derinlik hissinin kaybolmasının (veya azalmasının) nedeni budur.

7. Matematiğe eğilimli okuyucu için buradaki ifade, bir ışık ışınının veya daha genel olarak kütesiz parçacıkların bir karşı-deSitter uzayının içinde herhangi bir noktadan uzaysal sonsuzluğa sınırlı bir zaman içinde gidip dönebilecekleridir.

8. Matematiğe eğilimli okuyucu için, Maldacena AdS. X S' bağlamında çalışmış, sınır kuramı AdS. in sınırından kaynaklanmıştır.
9. Bu ifadenin sosyoloji ile ilişkisi fizikle olan ilişkisinden fazladır. Sicim kuramı kuantum parçacık fiziğinden türemiş oysa halka kuantum kütleçekimi genel görelilikten ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, günümüzde yalnızca sicim kuramı genel göreliliğin hesaplarına uygun sonuçlar bulmaktadır. Bunun nedeni yalnızca sicim kuramının genel göreliliği büyük uzaklık ölçeklerinde inandırıcı bir şekilde indirgeyebilmesidir. Halka kuantum kütleçekimi kuantum alanında çok iyi anlaşılrsa da, büyük ölçekli olaylarla arasındaki açıklığın kapatılmasının güç olduğu görülmüştür.
10. Daha doğrusu, *Evernin Zarafeti* kitabının 13. Bölümünde daha ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi, Bekenstein ve Hawking'in 1970'lerdeki çalışmalarından bu yana kara deliklerin ne kadar entropi barındırdıklarını biliyoruz. Yine de, bu araştırmacıların yaklaşımı dolaylı idi ve buldukları entropiyi açıklayabilecek mikroskobik yeniden düzenlemeleri -Bölüm 6'daki gibi- hiç göz önüne almamışlardı. 1990'ların ortalarında bu açıklık kara deliklerle sicim/M-kuramındaki bazı zarların bazı durumları arasında zekice bir bağ kuran iki sicim kuramcısı, Andrew Strominger ve Cumrun Vafa tarafından kapatıldı. Bu araştırmacılar, belirli bazı özel kara deliklerin, tam olarak kendi temel yapıtaşlarının (bu yapıtaşları her ne iseler) sayılan kadar yeniden düzenlenmeye olanak verdiğini, bunun bazı özel zar birleşimleri için de geçerli olduğunu buldular. Böylesi zar yeniden düzenlenmelerinin sayısını belirlediklerinde (ve logaritmasını aldıklarında), buldukları cevap, karşılık gelen kara deliğin Planck birimiyle yüzey alanının 4 e bölünmüş haliydi, ki bu, kara deliğin entropisi için yıllar önce bulunmuş olan cevaptı. Halka kuantum kütleçekiminde de araştırmacılar bir kara deliğin entropisinin yüzey alanıyla orantılı olduğunu bulmuşlar, ama tam cevabı (Planck birimi cinsinden yüzey alanı bölü 4) bulmak çok zor olmuştu. Eğer Immirzi parametresi adı verilen özel bir parametre uygun şekilde seçilirse, o zaman gerçekten kara delik entropisi halka kuantum kütleçekiminin matematiğinden çıkar ama henüz kuramın kendi içinde, bu parametrenin doğru değerini neyin seçtiği konusunda evrensel olarak kabul edilen, temel bir açıklama bulunmamıştır.
11. Bu bölüm boyunca yaptığım gibi, niceliksel olarak önemli olan ama kavramsal anlamda etkisiz olan sayısal parametreleri görmezden geliyorum.

Sözlük

açık sicimler: Sicim kuramında iki ucu da serbest olan sicimler
alan: Uzaı: kaplayan ve kuvvetleri ileten, parçacıkların varlığını/hareketini tanımlayan "sis" veya "temel". Matematiksel olarak uzayın her noktasında alanın değeri temsil eden bir dizi noktayı kapsar.
arka plandan bağamsızlık: Fiziksel bir kuramın, uzay ve zamanın ön koşulu olarak sonradan sokulması yerine daha temel kavramlardan çıkıyor olması özelliği
bağılantıcılık, kuantum bağılantıcılığı: Uzaysal olarak birbirlerinden uzakta bulunan parçacıkların uyumlu özellikler gösterdiği kuantum olgusu
belirlenimsizlik ilkesi: Kuantum mekaniğinin, birbirlerini tamamlayan bazı fiziksel özelliklerin aynı anda ölçülebilmesi veya belirlenebilmesinde temel bir sınırlama olduğunu belirten ilkesi
birçok dünya yorumu: Kuantum mekaniğinin, olasılık dalgasının temsil ettiği tüm potansiyel olasılıkların farklı evrenlerde gerçekleştiği bir yorumu
birleşik kuram: Bütün kuvvetleri ve maddeyi tek bir kuramsal yapıda tanımlayan kuram
boşluk: Bir bölgenin olabileceği kadar boş hali; en düşük enerji durumu
boşluk alan dalgalanmaları: bkz. kuantum dalgalanmaları
büyük birleşme: Güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetleri birleştirme girişimi kuramı
büyük ezilme: Büyük Patlama'nın tersine dönerek uzayın kendi üzerine çıktığı, olası bir evrenin sonlanması senaryosu
Büyük Patlama kuramı/standart Büyük Patlama kuramı: Doğum anından itibaren sıcak ve genişleyen bir evreni tanımlayan kuram
Casimir kuvveti: Boşluk alan dalgalanmalarının dengesizliği sonucu ortaya çıkan kuantum mekaniğine özgü kuvvet
D-zarlar, Dirichlet-p-zarlar: "Yapışkan" bir p-zar; açık sicim uçlarının iliştiirdiği bir p-zar
dalgı fonksiyonu: bkz. olasılık dalgası
dönme değişmezliği, dönme simetrisi: Bir fiziksel sistemin dönme hareketinden etkilenmeme özelliği veya kuramsal yasası
düz uzay: Uzaysal evrenin herhangi bir eğrilik içermeyen olası şekli
düzlük problemi: Kozmoloji kuramlarının uzayın gözlenen düzlüğünü açıklama zorluğu
elektromanyetik alan: Elektromanyetik kuvveti uygulayan alan
elektromanyetik kuvvet: Doğadaki dört temel kuvvetten biri; elektrik yükü olan parçacıklar üzerinde etkilidir.
elektron alanı: Elektron parçacığının, en küçük parçası ya da bileşeni olduğu alan
elektrozayıf Higgs alanı: Soğuk, boş uzayda sıfırdan farklı bir değere sahip olan alan; temel parçacıkların kütle kazanmalarına neden olur.
elektrozayıf kuram: Elektromanyetik ve zayıf nükleer kuvvetleri elektrozayıf kuvvet olarak birleştiren kuram
enerji kasesi: bkz. potansiyel enerji kasesi
entropi: Fiziksel sistemlerin düzensizliğinin bir ölçüsü; bir sistemin genel

görünüşü değişmeden temel bileşenlerinin yeniden düzenlenme sayısı

esir: Uzayı dolduran ve ışığa yayılması için ortam sağlayan varsayımsal madde; varlığı çürütülmüştür.

evlensizlik: Bir cismin ivmelenendirilmeye tepki gösterme özelliği

faz geçişi: Sıcaklığı, büyük bir aralıkta değiştirildiğinde fiziksel bir sistemde ortaya çıkan niteliksel değişikliklik

foton: Elektromanyetik kuvvetin haberci parçacığı; ışık taneciği

genel görelilik: Einstein'ın kütleçekimi kuramı; uzay ve zamanın eğri olduğunu kabul eder.

girişim: üst üste binen dalgaların ayırt edilebilir bir desen yarattığı olgu; kuantum mekaniğinde görünüşe göre birbirini dışlayan seçenekler de girişim yapabilir,

glüonlar: Güçlü nükleer kuvvetin haberci parçacıkları

göreci: Bütün hareketlerin görelil olduğunu ve uzayın mutlak olmadığını ileri süren görüş

gözlenebilir evren: Evrenin kozmik ufukmuzun içinde kalan bölümü; evrenin yaydığı ışıgın bugün bize ulaşabilen bölümü; evrenin görebildiğimiz bölümü

gravitonlar: Kütleçekimi kuvvetinin varsayımsal haberci parçacıkları

güçlü nükleer kuvvet: Doğanın kuarklar üzerinde etkili olan kuvveti; proton ve nötronların içinde kuarkları bir arada tutar.

haberci parçacık: Bir kuvvetin, etkisini ileten en küçük "paketi" veya "birimi"

hangi-yoldan bilgisi: Kaynaktan detektöre giden parçacığın hangi yoldan gittiğini tanımlayan kuantum mekaniksel bilgi

hız: Bir cismin hareketinin sürati ve yönü

hızlandırıcı, atom çarpıştırıcı: Parçacık fizikinde parçacıkların yüksek hızlarda çarpıştırılmalarını sağlayan araştırma aracı

Higgs alanı: bız. elektrozyayıf Higgs alanı

Higgs alanı boşluk beklenen değeri: Higgs alanının boş uzayda sıfırdan farklı bir değer aldığı durum; Higgs okyanusu

Higgs okyanusu: Higgs alanı boşluk beklenen değerinin bu kitapta kullanılan kuantması

Higgs parçacıkları: Bir Higgs alanının en küçük kuantum bileşenleri

inflation alanı: Enerjisi ve negatif basıncı şişme genişlemesinin kaynağı olan

ivme: Hızın büyüklüğü ve/veya yönünün değiştiği hareket

Kalusa-Klein kuramı: Üçten fazla uzay boyutu içeren evren kuramı

kapalı cisimler: Sicim kuramında yer alan halka şeklindeki enerji iplikçikleri

kara delik: Devasa kütleçekiminden ötürü kendisine çok yaklaşan (kara deliğin olay ufkundan daha yakına gelen) her şeyi, ışığı bile kendine çekerek uzaklaşmasına izin vermeyen gök cismi

karanlık enerji: Uzayı birörnek dolduran varsayımsal enerji ve basıncı; enerji-si/basıncı zamanla değişebildiği için kozmoloji sabitinden daha genel bir kav-

karanlık madde: Uzayı dolduran, kütleçekimi uyguladığı halde ışık yaymayan madde

Kelvin: Sıcaklıkların mutlak sifra göre (Celsius ölçeğindeki olası en düşük sıcaklık olan -273 derece) belirlendikleri ölçek

kendiliğinden simetri kırılması: Higgs okyanusu oluşumunun teknik adı; önceleri açık olan simetrinin gizlendiğiysa da bozulduğu süreç

klasik fizik: Bu kitapta kullanıldığı gibi, Newton'un ve Maxwell'in fiziksel yasaları. Daha genel olarak, özel ve genel görelilik de aralarında olmak üzere, kuantum dışı bütün fizik yasalarını anlatmak için kullanılır.

Kopenhag yorumu: Kuantum mekaniğinin büyük cisimlerin klasik yasalara,

küçük cisimlerinde kuantum yasalarına uyduğunu öngören yorumu

kozmetik mikrodalga fon ışıması: Evrenin ilk dönemlerinden kalan ve tüm uzayı kaplayan kalıntı elektromanyetik ışıma

kozmetik ufuk, ufuk: Evrenin başlangıcından bugüne kadar henüz ışığın bize ulaşmadığı konumlar

kozmooloji: Evrenin kökenini ve evrimini inceleyen bilim dalı

kozmooloji sabiti: Kökeni ve yapısı bilinmeyen, evreni birörnek dolduran varyasyımsal enerji ve basınç

kritik yoğunluk: Uzayın düz olmasını gerektiren madde/enerji yoğunluğunun miktarı; yaklaşık metreküpte 10^{-23} gram

kuantum dalgalanmaları, kuantum titreşimleri: Küçük ölçeklerde bir alanın değerinde, kuantum belirsizliğinden kaynaklanan kaçınılmaz olarak ortaya çıkan hızlı değişiklikler

kuantum kromodinamiği (kuantum renk dinamiği): Güçlü nükleer kuvvetin kuantum mekaniksel kuramı

kuantum mekaniği: Atomların ve atomaltı parçacıkların dünyasını açıklamak üzere 1920'lerde ve 1930'larda geliştirilen kuram

kuantum ölçüm problemi: Bir olasılık dalgasının içerdiği devasa sayıda olasılıkların ölçüldüğünde nasıl olup da tek bir sonuç verdiğini açıklayan problem.

kuarklar: Güçlü nükleer kuvvetin etkisi altındaki temel parçacıklar; altı türü vardır (alt, üst, aşağı, yukarı, acayip ve cazibe)

M-kuramı: Sicim kuramının beş türünü birleştiren ve şu anda eksik olan kuram; bütün kuvvetlerin ve bütün maddenin tam kuantum mekaniksel kuramı

Mach ilkesi: Bütün hareketlerin göreceli olduğu ve durağanlık standardının evrendeki ortalama madde dağılımı tarafından belirlendiği ilkesi

mikrodalga fon ışıması: Bkz. kozmik mikrodalga fon ışıması

mutlak uzay: Newton'un uzay kavrayışı; uzayı değişmez ve içinde bulunan her şeyden bağımsız kabul eder.

mutlak uzay-zaman: Uzaya özel görecelliğin bakışı; uzayı zamanın bütünlüğü penceresinden, değişmez ve içindekilerden bağımsız olarak görür,

mutlakçı: Uzayı mutlak olarak gören bakış açısı

negatif eğrilik: Kritik yoğunluktan daha az yoğunlukta madde içeren uzayın eğili; eğer bükimindedir

olasılık dalgası: Kuantum mekaniğinde bir parçacığın verilen bir konumda bulunma olasılığını veren dalga

olasılık dalgasının çökmesi, dalga fonksiyonunun çökmesi: Bir olasılık dalgasının (dalga fonksiyonunun) yayılmış durumdan sivrilmiş duruma geçtiği varsayımsal gelişme

olay ufkı: Bir kara deliğin çevresinde geri dönüşü olmayan noktaları birleştiren varsayımsal küre; bir kara deliğin olay ufkunu geçen herhangi bir şey kara deliğin kütleçekiminden kurtulamaz.

özel görecellik: Einstein'ın, uzay ve zamanın tek başlarına bağımsız olmadıklarını, farklı gözlemcilerin göreceli hareketlerine bağlı olduklarını anlatan kuramı

p-zar: Sicim/M-kuramındaki p-uzaysal boyutlu bileşenler. Ayrıca bkz. D-zar

Planck kütle: Titreşen bir sicimin tipik kütle (10⁻³ gram, bir toz tanecığının kütlesi; proton kütesinin on milyar kere milyar katı)

Planck uzunluğu: Daha aşağısında kuantum mekaniği ile genel görecellik arasındaki çelişkinin ortadan kalktığı boyut (10⁻³³ cm); bildiğimiz uzay kavramının çıktığı uzunluk

Planck zamanı: Işğın Planck uzunluğunu kat etmesi için geçen süre (10⁻⁴³

sanitve); daha aşığında bildiğimiz zaman kavramının çıktığı zaman aralığı

potansiyel enerji: Bir alanda veya cisimde depolanan enerji

potansiyel enerji kâsesi: Verilen bir değeri için alanın enerjisini tanımlayan şekil; teknik olarak alanın potansiyel enerjisi olarak adlandırılır,

sicim kuramı: Tek-boyutlu, titreşen enerji ipiliklerine dayanan (bkz. süpersicim kuramı), ama zorunlu olarak süpersimetriyi kapsamayan kuram. Bazı durumlarda süpersicim kuramının kısıltması olarak kullanılır,

simetri: Bir fiziksel sistemin görünüşünü değıştirmeyen bir dönüşüm (örneğin mükemmel bir kürenin merkezi etrafında dönmesi kürenin görünüşünü değıştirmez); bir fiziksel sistem üzerinde, o sistemi tanımlayan yasalar üzerinde herhangi bir etkisi olmayan bir dönüşüm

spin: Temel parçacıkların, tıpkı dönmekte olan bir topaçta olduğu gibi, dönme hareketine karşılık gelen kuantum mekaniksel özelliğı (temel parçacıklar yapısal olarak açıl momentumu sahiptir)

standart yuma gücü: Astronomide uzaklık ölçümünde yararlı olan ve bilinen yapısal parlaklığı sahip gök cismi

standart model: Kuantum kromodinamiğı ve elektrozaıf kuramdan oluşan kuantum mekaniksel kuram kütleçekimi dışındaki bütün kuvvetleri ve maddeyi tanımlar. Nokta parçacık kavramı üzerine temellenir.

süpersicim kuramı: Temel bileşenleri tek-boyutlu titreşen enerji halkaları (kapalı sicimler) veya ipilikleri (açık sicimler) olan, genel görellikle kuantum mekanikini birleştiren ve süpersimetriyi de kapsayan kuram

süpersimetri: Tamsayı spine sahip parçacıklarla (kuvvet parçacıkları) tamsayının yarısı kadar spine sahip parçacıkların (madde parçacıkları) yer değıştirmesi durumunda yasaların değışmediğı bir simetri türü

şişme kozmolojisi: Evrenin ilk dönemlerinde kusa ama devasa bir uzaysal genişleme patlaması olduğunu ileri süren kozmoloji kuramı

termodinamiğın ikinci yasaı: Bir fiziksel sistemin entropisinin verilen bir andan itibaren ortalama olarak artma eğiliminde olacağını söyleyen yasa

ufuk problemi: Kozmoloji kuramlarının açıklamaya çalıştığı problem (birbirlerinin kozmik ufuklarının ötesinde olan uzay bölgelerinin nasıl olup da hemen hemen aynı özelliklere sahip olduğu sorusu)

uzay-zamanı: Uzay ve zamanın ilk olarak özel görellik tarafından öngörülen birlikteliğı, bütünlüğü

W ve Z parçacıkları: Zayıf nükleer kuvvetin haberci parçacıkları

yer değıştirme simetrisi, yer değıştirme değışmezliğı: Kabul edilmiş olan doğa yasalarının uzayın herhangi bir noktasında uygulanabilme özelliğı

zaman-tertsiamesi simetrisi: Doğanın kabul edilmiş olan yasalarının zamanın bir yönü veya diğeri arasında ayırım yapmama özelliğı. Verilen bir andan itibaren yasalar geçmiş ve gelecek yönünde tam olarak aynı şekilde davranır,

zaman dilimi: Tek bir anda uzayın tamamı; uzay-zaman bloğundan yani sonunundan alınan tek bir dilim

zamanın oku: Zamanın -geçmişten geleceğı doğru- gösteriyor gibi görüldüğü yön

zayıf nükleer kuvvet: Doğanın atomaltı ölçeklerde etkili olan ve radyoaktif bozunma gibi olaylardan sorumlu olan kuvveti

zar dnyasal senaryosu: Sicim/M-kuramında yer alan ve bildiğimiz üç uzay boyutunun bir üç-zar olma olasılığı

Dizin

Albrecht, Andreas, 344, 347
Antoniadis, Ignatios, 482
Aristoteles, 6, 36, 54, 97
Arkani-Hamed, Nima, 481, 482
Aspect, Alain, 139, 141, 144-145, 146

Bachas, Constantin, 482
Banks, Tom, 588
Bekenstein, Jacob, 576-577
Bell, John, 104, 127, 131, 135
Bennett, Charles, 531-534
Bohm, David, 129-130, 149, 251, 252
Bohr, Niels, 25, 110, 115, 116, 117
Boltzmann, Ludwig, 16, 184-185, 194, 203, 386-389
Bolyai, Janos, 500
Born, Max, 109
Brassard, Giles, 531
Braun, K., 501, 502
Brill, Dieter, 501

Calabi, Eugenio, 445
Camus, Albert, 4-5, 6, 23, 25
Candelas, Philip, 450
Carnap, Rudolph, 172
Casimir, Hendrik, 400-401
Chiao, Raymond, 236
Chibisov, Cennady, 622
Clauser, John, 139
Cohen, Jeffrey, 501
Compton, Arthur, 600
Crepeau, Claude, 531

Dai, Jin, 468
Davissen, Clinton, 106-107
de Broglie, Prince Louis, 611, 612
De Martini, A. Francesco, 531, 536
Descartes, Rene, 8, 31
De Sitter, Willem, 281, 341
Deutsch, David, 540, 549
de Witt, Bryce, 625
Dimopoulos, Savas, 481, 482, 483
Dirac, Paul, 110, 463
Drühl, Kai, 235-238
Duff, Michael, 456, 462
Dummett, Michael, 540
Dvali, Gia, 481, 482

Eddington, Sir Arthur, 15
 Euler, Leonhard, 410
 Everett, Hugh, 251
 Everitt, Francis, 503

 Faraday, Michael, 50-52, 79
 Farhi, Eddie, 380
 Feng, Jonathan, 510, 511
 Feynman, Richard, 25, 220
 Fischler, Willy, 588
 Ford, Kent, 259
 Freedman, Stuart, 139
 Friedmann, Alexander, 280-281, 334, 341
 Fry, Edward, 139
 Fuller, Robert, 561

 Gabor, Dennis, 633
 Gauss, Carl Friedrich, 84, 500
 Gell-Mann, Murray, 259
 Georgi, Howard, 323-325, 617
 Germer, Lester, 106-107
 Ghirardi, Giancarlo, 253-254, 255, 261-264
 Gisin, Nicolas, 141
 Glasnow, Sheldon, 321, 322-325, 397, 617
 Gliozzi, Ferdinando, 429
 Gott, Richard, 554
 Gödel, Kurt, 552, 553, 554
 Green, Michael, 414-416, 429, 463, 469, 541
 Griffiths, Robert, 259
 Grossmann, Marcel, 78
 Guth, Alan, 341-347, 380, 617, 618

 Hafele, Joseph, 62
 Hartle, Jim, 259
 Heisenberg, Werner, 110, 117
 Hess, Viktor, 510
 Higgs, Peter, 311
 Hooft, Gerard t', 580
 Hofava, Petr, 457, 469, 489
 Hull, Chris, 456, 462
 Hülse, Russell, 629

 Joos, Erich, 256
 Jozsa, Richard, 531

 Kaluza, Theodor, 435-437
 Kaluza-Klein kuran, 442
 Kant, Immanuel, 566
 Keating, Richard, 62
 Kelvin, Lord, 10, 11, 12
 Khoury, Justin, 489
 Klein, Oskar, 437, 439, 440
 Kwiatt, Paul, 236

Lamoreaux, Steve, 401, 624
 Leibniz, Gottfried Wilhelm von, 7, 37, 38, 40, 75, 348, 376
 Leigh, Robert, 468
 Lemaitre, Georges, 281, 334, 335, 341
 Lenin, Vladimir, 44
 Lense, Joseph, 500
 Linde, Andrei, 344, 347, 389, 619, 620, 622, 623
 Lippershey, Hans, 508
 Lobachevsky, Nikolai, 500
 Lykken, Joe, 482

 Maidacena, Juan, 581-583, 634
 Mills, Robert, 310
 Minkowski, Hermann, 66, 597, 598, 602-605
 More, Henry, 36, 54
 Morley, Edward, 54-55, 596
 Morrison, David, 465

 Nambu, Yoichiro, 411
 Neveu, Andre, 429
 Nielsen, Holger, 411

 Oersted, Hans, 52
 Olive, David, 429
 Omnes, Roland, 259
 Ovrut, Burt, 489

 Pauli, Wolfgang, 120, 130, 616
 Penrose, Roger, 16, 207
 Penzias, Arno, 614
 Peres, Asher, 531
 Perlmutter, Saul, 363, 364
 Pilster, Herbert, 501, 502
 Planck, Max, 96
 Platon, 36, 380
 Polchinski, Joe, 468-471
Principia Mathematica (Newton), 9, 35, 57, 79
Principia Philosophiae (Descartes), 31
 Pugh, George, 502

 Quinn, Helen, 324

 Ramond, Pierre, 429
 Randall, Lisa, 482
 Riemann, Georg Bernhard, 84, 500
 Rimini, Alberto, 253-355, 261, 262
 Rubin, Vera, 359

 Salam, Abdus, 321-323, 397
 Sato, Koshiro, 619
 Scherk, Joel, 412-413, 420-421, 429, 431, 463
 Schiff, Leonard, 502

Schmidt, Brian, 363, 364
 Schrödinger, Erwin, 109, 245
 Schwarz, John, 411-416, 420-421, 429, 431, 456, 463
 Scully, Marian, 235, 237, 238
 Seiberg, Nathan, 489
 Sen, Ashoke, 456
 Shapere, Alfred, 510, 511
 Shenker, Stephen, 588
 Smith, Sinclair, 358
 Solvay konferansları, 115-117
 Spaarnay, Marcus, 401
 Starobinsky, Alexei, 619, 622
 Steinberg, Aephraim, 236
 Steinhardt, Paul, 344, 347, 489, 619
 Strominger, Andrew, 450, 465, 627
 Sundrum, Raman, 482
 Susskind, Leonard, 410-411, 580, 588

 Taylor, Joseph, 629
 Thirring, Hans, 500
 Thompson, Randall, 139
 Thorne, Kip, 554, 556, 561
 Tipler, Frank, 554
 Tolman, Richard, 488-489
 Townsend, Paul, 456, 462
 Turok, Neil, 489-490, 518
 Tye, Henry, 341, 342, 345, 618

 Vafa, Cumrun, 634
 van Stockum, W. J., 552-553
 Veneziano, Gabriele, 410, 411
 Visser, Matt, 561

 Weber, Tullio, 253-255
 Weinberg, Steven, 321-324
 Wheeler, John, 228, 229-230, 251, 556, 561, 596
 Wilson, Robert, 614
 Witten, Edward, 450, 456-460, 461-462, 464, 468, 469-470, 482, 489
 Wootters, William, 531

 Yang, C. N., 310
 Yau, Shing-Tung, 445

 Zeh, Dieter, 256, 257
 Zellinger, Anton, 531, 536
 Zurek, Wojciech, 256
 Zwicky, Fritz, 358