DİJİTAL KÜTÜPHANE KANALI

Keyifli Okumalar Dileriz

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

RESMİ WEB SİTEMİZ

https://rantey.org

Yedek ve Duyuru Kanallarımız
Sitemize erişim engeli gelmesi veya adres değişikliği durumunda aşağıdaki kanallardan güncel giriş adresine erişebilirsiniz:

• Telegram: https://t.me/birkitapbir

• WhatsApp Kanalımız : https://whatsapp.com/channel/0029VbDHv8uE50Us4IvMoc0Y

ART HOBSON

KUANTUM ÖYKÜLERİ

Fiziğin En Temel Kuramını Anlamak İçin Bir Kılavuz

Çeviren: Mihriban Doğan

SAY

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Atomlardan oluşan bir dünyada yaşıyoruz diyebilirsiniz, ama aslında kuantumlardan oluşan bir evrende yaşıyoruz demeniz daha doğrudur. Pek çok şey atomlardan yapılmamıştır: ışık, radyo dalgaları, elektrik akımı, manyetik alanlar, kütleçekimi alanları. Nötron yıldızları, kara delikler, karanlık enerji, karanlık madde gibi tuhaf şeyleri saymaya bile gerek yok. Ama atomlar dahil her şey, fazlasıyla birleşik ya da "yapışık" halde bulunan, "kuantumlar" dediğimiz enerji demetlerinden yapılmıştır. Kuantumlar da başka her şey gibi belli kurallara boyun eğer. Bu kurallara "Kuantum Fiziği" denir. Bu kitap kuantumları konu alıyor ve onların beklenmedik, belki de kimilerinin diyeceği gibi, tuhaf davranışlarına ilişkin öyküleri içeriyor.

Kuantum Öyküleri kuantumların tuhaf alışkanlıklarını matematiğe başvurmadan, gündelik dille açıklıyor. Kuantum fiziğiyle ilgili diğer popüler bilim kitapları konuyu tarihsel süreç içinde ele alırken, bu kitap dalga-parçacık ikiliği, temel rastgelelik, kuantum halleri, süperpozisyonlar, dolaşıklık, yerbilmezlik, Schrödinger'in kedisi ve kuantum sıçraması gibi fenomenler üzerinden ilerliyor. Konuyla ilgili genel bilgi sahibi olmak, en son fikirleri ve bulguları öğrenmek isteyenler için ideal bir kitap.

internet satış
saykitap.com
55 TL
ISBN 978-605-02-0853-5

sayyayincilik.com
facebook.com/sayyayinlari
twitter.com/sayyayinlari
instagram.com/sayyayincilik

SAY YAYINLARI

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Kuantum Öyküleri

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Art Hobson
ABD'nin Arkansas eyaletindeki Fayetteville kentinde bulunan Arkansas Üniversitesi'nde fizik dalında emeritus profesör olarak görev yapıyor ve aktif şekilde bilimsel araştırma faaliyetleri yürütüyor.

Mihriban Doğan
Denizli'de doğdu. Bornova Anadolu Lisesi ve Dokuz Eylül Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. Özel sektörde çeşitli firmalarda çalıştı. 2010 yılından beri çeviri yapıyor. Carl Sagan'ın *Cennetin Ejderleri,* Robert Winston'un *Baş Belası İcatlar,* Susan Wise Bauer'in *Dünya Tarihi* adlı eserlerini dilimize kazandırdı.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

ART HOBSON

Kuantum Öyküleri

Fiziğin En Temel Kuramını Anlamak İçin Bir Kılavuz

İngilizceden çeviren:
Mihriban Doğan

SAY

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Say Yayınları
Bilim

Kuantum Öyküleri: Fiziğin En Temel Kuramını Anlamak İçin Bir Kılavuz / Art Hobson
Özgün adı: *Tales of the Quantum: Understanding Physics' Most Fundamental Theory*

© Oxford University Press, 2017
Tales of Quantum was originally published in English in 2017. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Say Yayinlari is solely responsible for this translation from the original work and the Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions, inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon.
Kuantum Öyküleri *(Tales of the Quantum)* ilk kez İngilizce olarak 2017 yılında yayımlanmıştır. Bu çeviri Oxford University Press aracılığıyla yayımlanmıştır. Eserin İngilizce orijinalinden yapılmış bu Türkçe çeviriden Say Yayınları tek başına sorumludur ve bu çeviride olabilecek hata, eksiklik, kusur ve belirsizliklerden ya da bunlardan doğabilecek zararlardan Oxford University Press sorumlu tutulamaz.

Türkçe Yayın Hakları Libris Ajans aracılığıyla © Say Yayınları
Bu eserin tüm hakları saklıdır. Tanıtım amacıyla, kaynak göstermek şartıyla yapılan kısa alıntılar hariç yayınevinden yazılı izin alınmaksızın alıntı yapılamaz, hiçbir şekilde kopyalanamaz, çoğaltılamaz ve yayımlanamaz.

ISBN 978-605-02-0853-5
Sertifika no: 10962

İngilizceden çeviren: Mihriban Doğan
Editör: Sinan Köseoğlu
Kapak tasarımı: Gülizar Ç. Çetinkaya

Baskı: Yıldız Mücellit Matbaacılık
Maltepe Mah. Gümüşsuyu Cad. Dalgıç Çarşısı
Apt. No:3/4 Zeytinburnu/İstanbul
Tel: 0212 613 17 33
Sertifika No: 46025

1. baskı: Say Yayınları, 2021

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

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

Ücretsiz PDF Kitap Arşivi - https://rantey.org

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ 7
1. Giriş: Vitrindeki Kuantumun Öyküsü 13
KISIM 1 - EVREN KUANTUMLARDAN OLUŞUR 35
2. Kuantum Fiziğinin Konusu Nedir? 37
3. Parçacıklar ve Klasik Mekanik 71
4. Alanlar ve Klasik Elektromanyetizma 106
5. Bir Kuantum Nedir? 137
KISIM 2 - KUANTUMLARIN DAVRANIŞLARI 185
6. Mükemmel Rastgelelik 187
7. Kuantum Halleri ve Hallerin Değişimleri 222
8. Süperpozisyonlar ve Makroskobik Kuantumlar 250
9. Dolanık, Yerbilmez Bir Evren 278
KISIM 3 - NORMAL DÜNYAYA GERİ DÖNÜŞ 315
10. Schrödinger'in Kedisi ve "Ölçüm" 317
11. Monitör Olarak Çevre 358
TEŞEKKÜR 385
ÇİZİMLER 389
NOTLAR 391
SÖZLÜK 437
DİZİN 469

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

ÖNSÖZ

Çocukluğumda kitap okumayı, öyküler dinlemeyi çok severdim. Fizikle ilk kez yıllar sonra, müzik bölümünden mezun olup orduda görev aldıktan sonra tanıştım. Manhattan'daki Kansas Üniversitesi'nde fizik okurken, ders kitaplarında ve derslerde öğrendiklerimin çoğunun büyüleyici, genellikle tuhaf ve daima yeni ufuklar açan öyküler olması bana keyif veriyordu. Ancak şimdi bunlar doğal dünya hakkındaki merakımı giderek daha çok uyandıran gerçek öykülerdi. Bir uçak üzerinde etkili olan kuvvetlerin açıklaması, dünyanın güneş etrafında eliptik bir yörünge izlediğini ispatlayan şık bir kanıt veya ışığın bir dalga olduğunu kanıtlayan ünlü deneyin bir açıklaması; bunların hepsi de zihnin büyüleyici serüvenleriydi. Elli beş yıl sonra doğayla olan gönül ilişkim hâlâ devam ediyor.

Bu kitap herkesin anlayabileceği şekilde, matematik veya gereksiz teknik detaylar olmaksızın kuantum evrenimizin öykülerini anlatıyor. Başoyuncum kuantum, argümanlarla da kanıtlanabileceği gibi kozmik sahnedeki esas aktör. Kuantum fiziği hakkındaki en popüler kitaplar konunun tarihini ele almakla birlikte, *Kuantum Öyküleri* fenomenleri ele alıyor: dalga-parçacık ikiliği, temel rastgelelik, aynı anda iki yerde

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

birden bulunma, kuantum sıçramaları, vs. Bu kitap ancak fenomenleri aydınlattıkları ölçüde tarihi ve insanları tanıtıyor. Yine de, umarım *Kuantum Öyküleri*'nin hem bilimcilere hem de bilimci olmayanlara anlamlı gelecek hikâyeyi andıran bir niteliği vardır. Bu kitap bu dünyadan ayrılmadan önce evrenin işlemesini neyin sağladığını daha iyi anlamak isteyen herkes için yazılmıştır.

Kuantum Öyküleri'nin asli bir mesajı var: Kuantum fiziği olduğu haliyle iyi ve sağlamdır. Teorinin radikal yapısı 1920'lerden günümüze kadar Albert Einstein dahil birçoklarını kuantum ilkelerinden birinde kusur bulmaya ve düzeltmek için çalışmaya teşvik etmiştir. Ancak kuantum fiziğinin düzeltilmeye ihtiyacı yoktur. Teori tuhaf olabilir ama gizemli değildir. Teorinin varsayılan bütün paradokslarının çözülebilir olduğunu ve cebir, teknik detaylar veya doğaüstü güçler gerekmeden, günlük dilde tutarlı bir şekilde açıklanabileceğini keşfedeceğiz.

Kitabın en özgün özelliği ölçüm problemine, namı diğer Schrödinger'in kedisine dair bir çözüm önerisi içermesidir. 10. Bölüm'de çözümün ilk kez 1968'de yapılan ve o zamandan bu yana ben dahil birçok fizikçi tarafından yeniden keşfedilen bir önermeden doğduğu ileri sürülüyor. Bu önermeden hareketle benim kendi araştırmam, Schrödinger'in ünlü kedisinin ilk başta göründüğü gibi ölü bir kedi ile canlı bir kedinin şoke edici "kuantum süperpozisyonu" değil de, 10. Bölüm'de açıklayacağım gibi, hiç de paradoksal olmayan "ilintilerin bir süperpozisyonu" olduğunu göstermiştir. Benim görüşüme göre kuantum fiziğinin hâlâ ihtilaflı olan tek önemli temel meselesi ölçümdür. Bazı insanların çözülmemiş, bazılarının çözülmüş ve bazılarının da hâlâ çözüm gerektirmeyen, salt sahte bir problem olarak gördükleri bu problem uzmanları bölüyor ve ismi çözümsüzlüğünü artırıyor. Buna ölçüm prob-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

lemi denmesi kuantumun temellerinin bilimsel ölçüm yapan insanlarla bir ilgisi olduğu izlenimini uyandırıyor; bu da bazı kişilerin, kuantum fiziğinin insan aklını Kopernik'ten bu yana ilk kez fiziğin merkezine geri getirdiği sonucuna varmalarına yol açıyor. Hatta normal fiziksel gerçekliğin kuantum dünyasından doğması için insan bilincinin gerekli olduğu bile ciddi olarak öne sürülmüştür.

Wojciech Zurek ve daha birçok kişinin çalışmaları ölçüm problemini bütünüyle çözmese de, kuantum fiziğinin deneyim dünyamıza nasıl yol açtığını anlamamızda ölçümlerin hayati önem taşıdığını açıklığa kavuşturmuştur. Ancak bu "ölçüm" adı verilen şeylerin ille de insanlarla bir ilgisi yoktur; bunlar evrende kendi kendine cereyan eden şeylerdir. İnsan bilinci kuantum fiziğinin temellerinde asli bir rol oynamaz.

Bu kitabın başka bir özgün yönü de ünlü dalga-parçacık ikiliği meselesine yönelik perspektifidir. Evren uzayda yayılmış "alanlardaki" dalgalardan mı, küçük parçacıklardan mı, yoksa her ikisinden de mi oluşur? *American Journal of Physics*'teki 2013 tarihli makalemin başlığının da belirttiği gibi, "parçacık yoktur, sadece alanlar vardır". Evren bütünüyle alanlardan oluşur; dünyanın kütleçekimi alanı ve muhtemelen mıknatıslarla oynarken deneyimlemiş olduğunuz manyetik alanlar gibi. Richard Feynman dikkate değer bir istisna olmakla birlikte, çoğu kuantum alanı kuramcısı –kuantum fiziğini Einstein'ın görelilik teorisiyle bütünleştiren fizikçiler– bu görüşü kabul etmiştir, ancak bu nedense daha geniş bir fizikçi ve başka bilimci zümresine ve halka ulaşmamıştır.

Kuantum Öyküleri birkaç rakam dışında matematik içermiyor. Matematiksel fizikçi Paul Dirac şöyle demiştir: "Matematik sadece bir araçtır ve kişi fizik fikirlerini matematiksel forma başvurmadan aklında tutmayı öğrenmelidir."[1] Ancak bazı fizikçiler kuantum fiziğinin doğru bir sunumunun ma-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

tematiksel olması gerektiği ve dolayısıyla bilimci olmayanlar tarafından anlaşılamayacağı ve halkın anlayabileceği bir sunumun yanlış olması gerektiği kanısındadır. Kesinlikle aynı fikirde değilim. Bilimci olmayanlar için teknik olmayan bir dilde yazılmış çok sayıda iyi fizik kitabı bu görüşü çürütür. Albert Einstein ve Leopold Infeld'in –klasik niteliğindeki– *Fiziğin Evrimi* (Evrensel Basım Yayın, 2015), Brian Greene'in *Evrenin Zarafeti* (TÜBİTAK Yayınları, 2013) ve Louisa Gilder'in *The Age of Entanglement: When Quantum Physics Was Reborn* (Dolanıklık Çağı: Kuantum Fiziği Yeniden Doğunca) (Alfred A. Knopf, 2008) adlı kitapları kuantum fiziği dahil, fiziğin doğru olarak ve teknik olmayan şekilde açıklanabileceğini gösterir.

Hem bilimcilere hem de bilimci olmayanlara hitap edecek bir kitap yazmayı amaçladığımdan, ilave yorum, destekleyici referans ve bazı daha teknik bilgiler sağlayan numaralı notlarda birçok detay belirttim. Bu notlar metin akışını bozmadan rahatlıkla es geçilebilir. Ayrıca kitabın sonunda kapsamlı bir sözlükçe de yer alıyor.

En azından eski Yunanlardan bu yana, felsefeyle ilgilenen insanlar evrenin esas öğelerinin neler olduğunu bilmek istemişlerdir. Gerçeklik neden oluşur ve nasıl davranır? Popüler bir yanıt olan, gerçekliğin atomlardan ibaret olduğu görüşü çağdışı ve yanlıştır. Birkaç on yıldır evrenin çoğunun aslında kimyasal atomlardan oluşmadığını biliyoruz. Bununla birlikte, atomlar ve diğer her şey atomlardan daha temel ve hatta daha merak uyandırıcı şeylerden, yani "kuantumlar" halinde toplanmış "alanlardan" oluşur. Bu kitap bu iki anahtar kavramdan, alanlar ve kuantumlardan hareket ediyor. Alışması biraz zaman alsa da bunları kavrayabilirsiniz. Eksantrik bir arkadaş gibi, kuantumun da anlaşılması biraz zaman ister. *Kuantum Öyküleri*, başoyuncumuzu 1. Bölüm'den 5. Bölüm'e

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

kadar genel hatlarıyla tanıttıktan sonra, 6. Bölüm'den 11. Bölüm'e kadar kuantumun detaylarına yakından bakacak.

1958'de fizikçi Wolfgang Pauli'nin Columbia Üniversitesi'nde yaptığı yeni bir temel parçacık kuantum teorisi sunumunun ardından –kuantum fiziğinin kurucu babalarından biri olan– Niels Bohr, Pauli'ye şöyle dedi: "Hepimiz senin teorinin çılgınca olduğunda hemfikiriz. Hemfikir olamadığımız mesele ise bunun doğru olabilecek kadar çılgınca olup olmadığı."[2] Doğa insan imgeleminden çok daha yaratıcıdır ve mikroskobik dünya Niels Bohr veya başka birinin tahmin edebileceği bir şey değildir. Kuantum fiziği gerçekten tuhaftır ve kimileri bu tuhaflığı nedeniyle onun bazı yönlerini reddetmişlerdir, ancak tuhaflık tek başına bilimsel bir teoriyi reddetmek için zorlayıcı bir sebep değildir.

Modern fiziğe alışmak biraz zaman alır. Albert Einstein, Werner Heisenberg'in 1927'de belirsizlik ilkesini anlattığı konuşmasını duyduğunda şöyle dedi: "Ne güzel, bu günlerde gençler ne fikirler üretiyor! Ancak ben bunların bir kelimesine bile inanmıyorum."[3] Çağdaş fiziği öğrenmek bebeğin ana rahminin dışındaki yaşamla ilk karşılaşmasına benzeyebilir. Bu, karşılaşmayı beklediğiniz bir şey değildir, ancak açık fikirli olmayı başararak ona bir anlam verebilirsiniz.

Bu kitap üzerinde çalışmam görüp görebileceğim en büyüleyici fikirler demeti olarak kuantum fiziğini takdir etmemi sağladı. Umarım bu kitabı okurken benim onu yazarken aldığım kadar çok keyif alırsınız.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

1

Giriş

Vitrindeki Kuantumun Öyküsü

Kuantum teorisi özellikle eski Yunanlar mitolojiden vazgeçerek evrenin rasyonel bir anlayışını edinmek amacıyla araştırmalara başladıklarından bu yana bakış açımızdaki en ufuk açıcı değişimdir.

— Nobel Ödülü Sahibi ve Fermilab Emekli Öğretim Görevlisi Leon Lederman ve Christopher Hill, (*Quantum Physics for Poets* içinde)

O cumartesi sabahı vitrinde Alice'in tasavvur edebileceğinden daha çok gizem vardı. Fayetteville'deki eski şehir meydanında bahar zamanı yöreye özgü çiçekler açmış, çiftçi pazarından kaldırımlara ve civardaki sokaklara çiçek demetleri, yiyecekler, resimler, el işleri, müzik, sohbet, köpekler ve insanlar saçılmıştı. Block Bulvarı'nın ilerisinde dolaşan Alice alışveriş ederken ve sokağa bakan bir kulübede yöreye özgü kahveden yudumlarken yansıması düz bir vitrin camında görülebiliyordu. Yakınlardaki Arkansas Üniversitesi'nde fizikçi olmayanlar için açılmış bir fizik kursuna devam eden Alice

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

kendi görüntüsünü vücudundan yansıyan güneş ışığının cama vurması ve camdan yansıyarak gözüne gelmesi nedeniyle görebildiğini biliyordu. Ancak bundan fazlası vardı.

Alice dükkânda satış danışmanı olarak çalışan arkadaşı Bob'a el salladı. Bob da el sallayarak karşılık verdi. Bob'un da kendisini görmüş olması gerektiğinin farkına varan Alice camın sadece kendi görüntüsünü kendisine yansıtmakla kalmayıp aynı zamanda bu görüntüyü içinden iletmiş olduğu sonucuna vardı. Dolayısıyla biri yansıtılan, biri de iletilen olmak üzere iki görüntü vardı.

Bu, üzerinde ciddi olarak düşünülmesi gereken bir şeydir; özellikle, kitap boyunca açıklayacağım gibi, kişi ışık ve başka her şeyin son derece birleşik, çok küçük enerji demetlerinden oluştuğunu göz ardı ederse. Bu enerji demetlerine *kuantumlar* denir. Kuantumlar bu kitabın ana karakterleridir. O sabah meydanda dolanan Alice üzerinde kafa yormamız çabucak bazı temel ilkeleri gözden geçirerek kuantum dünyasına dair genel bir fikir edinmenizi sağlayacaktır. Bazı detaylar şimdilik gözünüzden kaçabilir fakat daha sonra bunlara döneceğim, o yüzden endişelenmeyin.

Alice'in görüntüsünü taşıyan ışık elektromanyetik bir alanın hızlı hareketleriyle iletilir, bu alan bütün mıknatısları çevreleyen ve yakınlardaki demir nesneler üzerinde kuvvet uygulayan bildik manyetik alana benzer. Fizikçilerin kullandığı *alan* kelimesinin anlamı, kelimenin "havaalanı" gibi sözcükler içinde taşıdığı anlama yakındır. Bu önemli kelimeyi daha sonra daha detaylı olarak tanımlayacağım, ancak şimdilik alanı belirli fiziksel özellikleri olan bir uzay bölgesi olarak tanımlayalım. Duman bir odayı nasıl kaplıyorsa elektromanyetik alan da uzayı öyle kaplar. Bu evrenin çeşitli *kuantize alanlarından* biridir; enerjisi, her biri bir enerji *kuantumu* (bu terim Latince "kuantus" yani "miktar" [*quantity*] kelimesinden gelir)

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

taşıyan, son derece birleşik demetler yani *kuantumlar* şeklinde işlev görür. Işık durumunda bu kuantumlara *foton* denir. Dolayısıyla Alice'in görüntüsünü taşıyan ışık zilyonlarca (çok büyük bir rakam için benim kullandığım bir ifade) fotondan oluşur.

Kuantumlarla ilgili kilit nokta bölünemez olmalarıdır.[1] Dolayısıyla hem Alice hem de Bob Alice'in görüntüsünü gördükleri için, bütün haldeki fotonların bazılarını dükkânın içindeki Bob tespit ederken, kalanları dışarıda, kaldırımda bulunan Alice tespit etmelidir. Dışarıda ve içeride tespit edilen kısımları, tahmin edebileceğiniz gibi vitrin camının özellikleri belirler.

Ancak burada bir tuhaflık vardır: *Bir foton cama ulaştığında ne olur*? İkiye bölünemediği için ya Alice tarafından (yansıtmayı gösterir), ya da Bob tarafından (iletimi gösterir) tespit edilmesi gerekir.[2] Bir kuantumun hangi yoldan gideceğini belirleyen nedir? Şaşırtıcı yanıt ise bunu hiçbir şeyin belirlemediğidir. Kuantumun birleşik yapısı *doğanın esasen belirsiz yani "rastgele" olmasını* gerektirir ve deneyler de bunu gösterir. Lazer ışınının kısmen yansıtma yapan yüksek nitelikli bir cam levhaya yönlendirildiği, dikkatle yürütülen deneylerde bilim insanları bütün fotonların özdeş ve levhanın kusursuz ölçüde homojen olmasını sağlayabilirler. Bu durumda her foton tam olarak aynı koşullara tabi olduğu için levhaya çarptıklarında aynı şekilde davranmalarını bekleyebilirsiniz; gene de bazıları levhadan geçerken bazıları plakadan yansır. Hiç kimse, hatta doğa bile hangi fotonların hangi yoldan gideceklerini bilmez. Doğa özünde rastgeledir.[3]

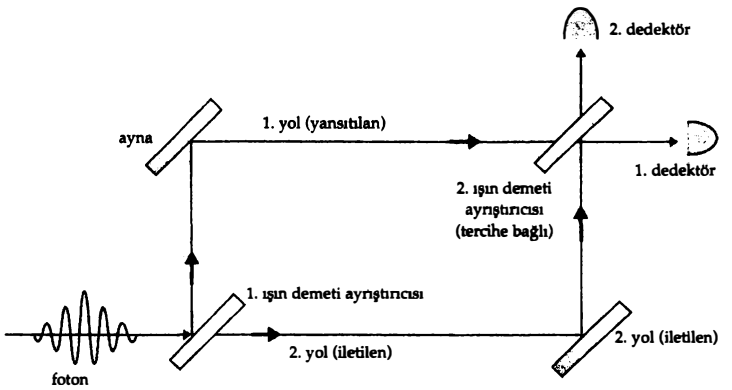
1900'den önce bilim insanları özdeş koşulların özdeş sonuçlara yol açtığını düşünüyorlardı. Ama öyle değildir. Doğa 1650'den 1900'e kadar olan dönemde geçerli olan "klasik fiziğin" öngördüğü bu akla uygun ilkeyle çelişir. Klasik fiziğe

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

göre evren tamı tamına, doğru bir saatin tahmin edilebilir olduğu kadar tahmin edilebilirdir. Ancak doğa saat gibi değildir. Doğa aktif olarak evrendeki her kuantuma her an bir şeyler olmasına neden olurken kendisi de neler olacağını bilmez.

Bu durum epeyce tuhaf olduğu için içinizden şu soruyu sormak gelebilir: Nasıl biliyoruz? *Bu daima mükemmel bir sorudur*. Bu tüm bilimin temelidir. Nasıl biliyoruz? Bilimsel bilgiler ve özellikle tuhaf bilimsel iddialar kanıtlara dayandırılmalıdır.

Kuantum rastgeleliği için şöyle bir kanıt sunabiliriz. *Mach-Zehnder interferometresi* (Şekil 1.1), yansıtılan ve iletilen ışın demetlerini tekrar birleştirmek için kullanılan bir cihazdır. Şekildeki birinci ışın demeti ayırıcısı ön vitrin gibi işlev görür. Bu şekilde yandan görülen, çarpan ışığın yüzde 50'sini yansıtan ve yüzde 50'sini de ileten bir cam levhadır. Ancak bu levha gelen fotonların yoluna dik değil, 45 derecelik bir



Şekil *1.1* Mach-Zehnder interferometresi. Işın demeti ayrıştırıcıları arasındaki iki yolun uzunluğu da aynalardan birinin konumunun hafifçe ayarlanmasıyla değiştirilebilir. Bu basit cihaz karakteristik kuantum fenomenlerinin çoğunu sergileyebilir.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

açıyla yerleştirilmiştir, öyle ki yansıtılan bir foton 1. yola dik olacak şekilde yön değiştirir ve iletilen bir foton da 2. yola yatay hareket eder.[4] Her bir yol bir veya iki metre uzunluğundadır ve bir laboratuvar masası üzerinde dikkatle ayarlanmıştır. Aynalar ışın demetlerini bir kesişme noktasına getirir, deneyi yapanlar isterlerse bu noktaya ikinci bir ışın demeti ayırıcısı yerleştirebilir.

Tek bir fotonun sol alttan girdiğini ve 2. ışın demeti ayrıştırıcısının olmadığını varsayalım. Foton ilk ışın demeti ayrıştırıcısına ulaştığında ne olur? Yansıtılır mı, iletilir mi, yoksa her ikisi de mi olur? Deney şunu gösterir: *Foton ya birinci ya da ikinci detektörde daima tek bir tam foton olarak tespit edilir*. Detektör 1 ve 2 iki farklı gözlemcinin gözleri olabilir[5] veya her ikisi de ışığı tespit ettiklerinde ses çıkaran veya başka bir belirti gösteren laboratuvar detektörleri olabilir. Dolayısıyla ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı mevcut olmadığında, bu deney Alice ve Bob'un vitrin gözlemlerindeki yansıtılan ve iletilen fotonlara benzer. *Deney bölünmez kuantumların varlığını doğrular,* çünkü detektörler daima ya bir foton tespit eder ya da etmez, asla bir fotonun bir kısmını tespit etmezler. *Deney aynı zamanda kuantum rastgeleliğini de doğrular*: Sol alttan birçok foton tek tek verildiğinde çarpmaların istatistiği kesinlikle rastgeledir; yani tekil sonuçlar (fotonun detektör 1'e veya detektör 2'ye çarpması) mümkün olsalar da öngörülemezler. Sabahtan akşama kadar fotonların bir o detektöre, bir bu detektöre çarpmasını izleyebilirsiniz, ne var ki bir sonraki fotonun hangi detektöre çarpacağını bilmeniz yine de mümkün değildir. Oysa bütün fotonlar aynı şekilde hazırlanır ve aynı koşullara tabi tutulur.

Bu tek deneyin "hangi yolun" seçileceğinin rastgele olduğunu mutlaka kanıtlamadığını iddia edebilirsiniz. Belki farklı bir ışın demeti ayrıştırıcısı veya farklı bir deney düzeneği

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

öngörülebilir bir sonuç verebilirdi. Bu tarz itirazlar oldukça makuldür. Aslına bakarsanız deneyler asla genel bir bilimsel ilkeyi mutlak olarak kanıtlayamaz çünkü tek tek vakalara dayanarak genel bir bildirimi mantıksal olarak kanıtlayamazsınız. Her ne kadar genel ilkeyle çelişen tek bir ikna edici deney bir ilkeyi çürütebilse de, deneyler ancak genel bir ilkeyi "doğrulayabilir"; destekleyebilir fakat mutlak olarak kanıtlamaz. Bilim gözlenebilir kanıtların ışığında, mantıklı olana dayanarak işlev görür. 6. Bölüm bu deneyin mutlak öngörülemezliğine dair daha fazla kanıt sunuyor.

İkinci ışın demeti ayrıştırıcısı yerleştirildiğinde ise yeni bir şey olur. İkincisi ışın demeti ayrıştırıcısı iki yolu birbirine karıştırır. Eğer foton birinci yoldaysa (yüzde 50-50 olasılıkla) ya birinci detektöre iletilir ya da ikinci detektöre yansıtılır; foton ikinci yoldaysa (yüzde 50-50 olasılıkla) ya birinci detektöre yansıtılır ya da ikinci detektöre iletilir. Böylece foton hangi yola girerse girsin, yüzde 50-50 olasılıkla ya birinci detektöre, ya da ikinci detektöre ulaşır. Dolayısıyla *detektörler artık fotonun hangi yola girdiğine ilişkin hiçbir ipucu sağlamaz.* Kuantum fiziğinin matematiğinin gösterdiğine ve doğanın da doğruladığına göre, bir deney bir fotonun veya başka bir kuantumun hangi yola gireceğine ilişkin hiçbir bilgi sağlamadığında *foton bütün olası yollara aynı anda girer.* Bu size tuhaf mı geliyor? Eğer öyleyse yalnız değilsiniz.

Yani her bir foton iki ayrı yolun ikisinde de yol alır! Buna inanmak çok zor. Tek bir foton gönderildi, detektörler daima tam olarak bir foton tespit etti, fotonlar asla parçalara ayrılmadı ve yine de ben size bir fotonun iki yolda da mevcut olduğunu söylüyorum. Haydi canım! Bir foton nasıl aynı anda iki yönde de gidip iki yerde birden olabilir?

Üstelik bu iki yönde de aynı anda gitme ikinci ışın demeti ayrıştırıcısının mevcut olup olmamasından bağımsız olarak

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

gerçekleşmelidir. Ne de olsa, foton ilk ışın demeti ayrıştırıcısına ulaştığında, onun "sistem çıkışında" ikinci bir ışın demeti ayrıştırıcısı olup olmadığını "bilmesi" mümkün değildir. Bu demektir ki Fayetteville'deki dükkânın vitrinine ulaşan tüm fotonlar iki yöne de, yani hem Alice'e hem Bob'a gitti, ancak nasıl olduysa her birini sadece biri, yani ya Alice ya da Bob *tespit etti*.

Tüm bunları destekleyen güçlü kanıtları şu an sunmam pedagojik açıdan doğru olmaz. Bunu 8. Bölüm'de yapacağım. Notlarda kısa bir teknik açıklama var.[6]

Süperpozisyon adı verilen bu iki yöne de gitme olayı bizim daha önceki bir paragrafta sunulan, ışığın birleşik demetlerden oluştuğu görüşünü sorgulamamıza sebep olur.[7] Belki de her bir foton birinci ışın demeti ayrıştırıcısında bölünür ve her biri bir yola gider. Ancak deney böyle bir önermenin tersini kanıtlar. Eğer ışık birinci ışın demeti ayrıştırıcısında bölünür ve her bir parça ayrı yola giderse, iki detektör de ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı mevcut olmadığında aynı anda ses çıkarmalıdır. Ancak asla her iki detektör de aynı anda ses çıkarmaz; bu da herhangi bir zamanda cihazda iki değil, sadece bir cismin mevcut olduğunu gösterir. Fotonun herhangi bir zamanda bölündüğünü gösteren hiçbir kanıt yoktur.

Dikkat edin: Fotonlar ve diğer kuantumlar çok küçük parçacıklar gibi birer birer detektörlere çarpsalar da bunlar parçacık değildir. Bu kitap boyunca öğreneceğiniz gibi, bütün kuantumlar *bazen* küçük parçacıklar gibi davranan, uzayda yayılmış cisimlerdir. Bu kavram bir fotonun bir interferometrede iki yola birden nasıl girdiğini anlamamıza yardım eder: Her bir foton duman kümesine benzer, yayılmış bir cisimdir; iki yol da müsait olduğunda iki yolda da yayılır.

Bunu tuhaf buluyorsanız sizinle aynı fikirdeyim. Bilim daima fenomenler için en az tuhaf açıklamayı bulmaya ça-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

lıştığından ötürü (*Occam'ın usturası* olarak bilinen bir yalınlık ilkesi) bu tuhaf kavramların kabul edilmeleri için on yıllarca süren deneyler, tartışmalar ve kuramlaştırmalar yapılması icap etti; doğrusu, kuantumun bazı temel ilkeleri halen tartışılıyor.

Örneğin Werner Heisenberg kuantumun anlaşılması kolay olmayan ve çelişkili görünen davranışları karşısında hüsrana uğramıştı. Şöyle yazmıştı: "Bohr'la gece çok geç vakitlere kadar devam eden ve adeta umutsuzlukla sonuçlanan tartışmalarımızı hatırlıyorum. Tartışmaların sonunda yakındaki parkta tek başıma yürüyüşe çıktığımda kendi kendime sürekli olarak şu soruyu sorardım: Doğa bu atom deneylerinde bize göründüğü kadar absürt olabilir mi?" Başka bir zaman Heisenberg, Bohr'la yaptığı hararetli bir konuşma sırasında gözyaşlarına boğulmuştu.[8]

Zamanla tek bir fotonun iki farklı yolda hareket ettiği gibi tuhaf açıklamalar kabul edildi, çünkü *daha basit açıklamaların hiçbirinin gözlemlenen kanıtlara uymadığı ortaya çıktı*. Biz bilim insanları birbirimizle en tuhaf teoriyi kim bulacak diye yarışmayız. Gelgelelim süreç acılı olsa da ve hatta bizi gözyaşlarına boğsa da kanıtlar ve mantık çoğu kez bizi bu tarz sonuçlar çıkarmaya mecbur eder.

Öykümüz şimdi başka bir dolambaçlı sürece giriyor. Burada tanımlanan davranış sadece ışık değil, maddi cisimler –ışığın aksine ağırlığı olan cisimler– dahil, bildiğimiz her şey için de geçerlidir. Örneğin *atomları* yani kimyasal elementlerin, bu elementin özelliklerini taşıyan en küçük bileşenlerini ele alalım (bir demir atomu demirin daima demir gibi davranan en küçük öğesidir). Fotonların aksine, atomlar ve moleküller (bağlı atom grupları) maddi cisimlerdir. Buna rağmen, fo-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

tonların yaptığı aynı kuantum numaralarını, süperpozisyon ve temel rastgelelik gibi numaraları yaparlar. Her ne kadar beysbol topu ve masa gibi makroskobik (mikroskop olmadan görülebilen) cisimler üzerinde gözlemlenebilir kuantum etkilerini yaratmak son derece zor olsa da, kuantum fiziği aynı zamanda bunlar için de geçerlidir.[9] Bildiğimiz kadarıyla her şey kuantum fiziğine uyar.

Etrafınızdaki maddi cisimler zilyonlarca atomdan oluşur. Her bir atomun merkezinde çok küçük bir çekirdek, çekirdeğin etrafında ise çok çok küçük elektronlar yer alır ve her çekirdekte *protonlar* ve *nötronlar* bulunur. Güneş ve gezegenlere olan benzerliği yüzünden bu basitleştirilmiş atom yapısı görüşü *atomun gezegen modeli* ("model" basitleştirilmiş bir açıklamadır) olarak bilinir. Atomlar elektrik kuvvetleriyle bir arada tutulur; protonlar "pozitif yüklü", elektronlar ise "negatif yüklüdür" ve zıt elektrik yükleri birbirini çeker. Böylece çekirdek elektronları çekerek onları çekirdeğin yanındaki konumlarında tutar. Öte yandan nötronlar ise yüksüzdür (yani elektrik yönünden nötrdür).

Tekrar belirtmek istiyorum. Bildiğimiz kadarıyla tüm bu maddi cisimler –elektron, proton, nötron, çekirdek, atom, molekül ve hatta beysbol topu ve masa– tıpkı ışık gibi kuantum kurallarına uyarlar.

Işığın ve diğer elektromanyetik ışımaların en temel kuantum özelliği *foton* adı verilen tekil demetler halinde bölünmüş, yani *kuantize* olmuş olmalarıdır. Madde de kuantizedir. Çeşitli maddi kuantum türleri vardır. Bunların bazılarını biliyorsunuz: Elektron, proton, atom ve moleküller. Hepimiz maddenin atomlardan oluştuğunu duyduğumuz için, maddenin kuantize olma yani demetlenme kavramı şaşırtıcı değildir. Şaşırtıcı olansa *bu maddi kuantumların, az evvel ele aldığımız fotonlar için geçerli, aynı tuhaf ilkelere uymalarıdır.*

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Örneğin Viyana Üniversitesi'nden fizikçi Anton Zeilinger, 60 veya daha fazla karbon atomu içeren molekülleri, bir Mach-Zehnder interferometresinde iki yolu da izleyen fotonlar gibi aynı anda iki yolu da izleyen süperpozisyonlar haline getirmiştir. Atomik standartlara göre böyle bir molekül oldukça büyük bir madde parçasıdır. 60 atomunun her biri altı proton, altı nötron ve altı elektron içerir, toplamda binden fazla atomaltı kuantum bulunur. Bu kadar büyük ve karmaşık bir cismin aynı anda iki yerde birden bulunabilme becerisini göstermesi şaşırtıcıdır. Ne de olsa, bilim insanları gerçekte asla bir beysbol topunun, hatta minicik bir toz zerresinin bile aynı anda iki yerde birden bulunduğunu gözlemlememişlerdir. Buna rağmen, bu mikroskobik dünyada sürekli meydana gelir; her ne kadar deney açısından büyük zorluk içerse de, kuantum fiziği beysbol topu gibi büyük cisimlerde bile bunun *meydana gelebileceğini* öngörür. 8. Bölüm'de, aynı anda iki farklı yol izleyecek şekilde süperpoze edilen, (zar zor da olsa) çıplak gözle görülebilecek kadar büyük bir cisimle –bugüne kadar başarılmış en büyük kuantum süperpozisyonuyla– karşılaşıyoruz.

Bu tuhaf fenomenin basit fakat şaşırtıcı bir açıklaması vardır (detayları 5. Bölüm'de bulabilirsiniz). *Gerçeklik görünmeyen alanlardaki dalgalardan oluşur*. Foton, elektron, atom ve molekül gibi kuantumlar "şeyler" değildir. Bunlar bir suda oluşan dalgalar gibi alanlardaki dalgalardır. Süperpozisyon dalgalarda alışılmış bir şeydir. Klasik (kuantum dışı) bir kıyaslama yapmak adına, durgun bir gölet düşünün; bunun batı yarısı ince bir yağ tabakasıyla kaplı, doğu yarısı ise yağsız olsun. Batıdaki yarısına küçük bir taş attığımızı düşünelim. Bu dışa doğru hareket eden dalgacıklar yaratır. (Şunu unutmayın: Su dalgacıkları bir kuantum fenomeni değildir, kuantumların bazı yönlerini taklit eden, klasik bir fenomendir.) Eğer bu

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

dalgacıklar kısmen su-yağ sınırından sekip batıya doğru geri yönelseler ve ayrıca kısmen sınırı aşıp doğuya doğru devam etseler muhtemelen bu durum sizi şaşırtmazdı. Orijinal dalga artık iki yerde bulunan iki dalga halindedir. Bu tarz bir şey dalgalarda daima meydana gelir ve bir su dalgasından söz ettiğimizi fark ettiğinizde bu durum ne şaşırtıcı ne de mantığa aykırıdır.

İnterferometre deneyimiz buna benzer. *Her bir foton* (fotonu dalga olarak düşünün) *birinci ışın demeti ayrıştırıcısına ulaştığında iki yola da girer*. Daha şaşırtıcı ve eşsiz bir biçimde kuantum olan şey ise, su dalgalarının aksine bu dalgaların iki yerde *tek* bir foton olarak kalmalarıdır. Su durumunda, orijinal dalga seti göletin hem doğu hem de batı tarafındaki gözlemciler tarafından teyit edilebilen, iki yönde de hareket eden iki dalga seti yaratır. Ne var ki interferometre deneyinde daima tek bir foton tespit ederiz, asla iki foton tespit etmeyiz. Bir foton gerçekte aynı anda iki yerde birden olabilen tek bir şeydir.

Ve madde de aynı şekilde davranır. Maddi bir molekül de bir alandaki bir dalgadır ve aynı anda iki yerde birden olabilir. Aslına bakarsanız, herhangi bir cisim prensipte aynı anda iki yerde birden olabilir.

Dolayısıyla bir dahaki sefere bir dükkân vitrininin önünden geçerken kafa yorabileceğiniz çok şey mevcut.

İnanılmaz Kuantum

Kuantum teorisi muhtemelen tüm zamanların en geniş kapsamlı, en doğru ve ekonomik yönden en ödüllendirici teorisidir.

Birinci iddiaya ilişkin olarak, kuantum fiziği esasen foton ve atom gibi küçük şeylerle ilgilenmesine rağmen, evren gibi büyük şeyler için de önemli olası sonuçları vardır. Fizikçiler evrenin büyük ölçekteki evriminin ve yapısının Albert Eins-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

tein'ın genel görelilik teorisiyle doğru bir şekilde tanımlandığı konusunda hemfikirdir. Ayrıca madde ve enerjinin küçük ölçekteki yapısının kuantum fiziğiyle yönetildiğine dair de hemfikirdirler. Bu bir probleme yol açar. Bilim insanları genel görelilik teorisini uzayın küçük bölgelerini içeren belirli fenomenlere uyguladıklarında, genel göreliliğin kuantum fiziğinin ilkelerini kapsamamasıyla ilişkili bariz hatalarla karşılaşırlar.

Kara delikler bir örnektir. Yıldızlar çoğunlukla en basit atom türlerinden –hidrojen ve helyumdan– oluşur. Enerjilerini hidrojeni helyuma dönüştüren bir süreç olan nükleer füzyondan elde ederek ısı ve ışık üretirler. Ancak yıldızlar zamanla hidrojen yakıtlarını tüketince can çekişmeye başlar ve genel kütlelerine (ağırlıklarına) bağlı olarak farklı şekillerde ölürler. Bu son nokta daima kütleçekimi kuvvetinin yıldızı orijinal hacminin çok küçük bir bölümüne sıkıştırmasından kaynaklanan bir çökme halidir. Çok büyük yıldızların çoğunda bu çökme hali bir kara deliktir; bu genel görelilik teorisinin, yıldızın hızla sıfır hacme düştüğünü öngördüğü bir haldir. "Sıfır" gerçekten mutlak surette sıfır anlamına mı gelir? Evet, öngörü budur.

Gel gör ki bu öngörünün kuantum fiziğiyle çeliştiği görülür; kuantum fiziğinin, yıldızın atomik boyutlara çöktükten sonraki durumu hakkında söyleyecek önemli şeyleri vardır. Dolayısıyla fizikçiler kuantum ilkelerini genel görelilik teorisine dahil etmeye çalışırlar. Tahmin edebileceğiniz gibi, bilim biri kozmiğe, diğeri mikroskobiğe odaklanmış iki güçlü teoriyle karşı karşıya kaldığında, bunları birleştirme çabası inanılmaz teorilere ve spekülasyonlara yol açar. Bu teorileri burada derinlemesine ele almayacağım.

Benzer bir ikilem evrenin başlangıcı üzerinde düşündüğünüzde de ortaya çıkar. Her şey 13,798 ± 0,037 milyar yıl önce

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

meydana gelen bir kuantum olayı olan büyük patlamayla başladı. Bu ateşli başlangıcın kalıcı görüntüsü, kozmosun bir ucundan öbür ucuna ve dolayısıyla zamanda çok öncesini araştırarak (sonuçta 14 milyar yıllık ışığı görüyoruz) büyük patlama sonucu dünyaya ulaşan ışınları tespit eden gelişmiş cihazlarca halen gözlemlenebilir. Bu ışınlar büyük patlamanın, kuantum fiziğinin hâkim olduğu, son derece mikroskobik bir kökeni olduğunu gösterir. Ancak büyük patlamada muazzam miktarlarda madde ve enerji ortaya çıktığı için genel görelilik ilkeleri de çok büyük bir rol oynadı. Dolayısıyla burada da yine genel göreliliği kuantum fiziğiyle birleştirmek gibi zor bir problemle karşı karşıya kalıyoruz.

Fizikçiler arasında eninde sonunda genel göreliliği kuantum fiziğiyle tutarlı bir biçimde birleştiren tek bir teori geliştireceğimize dair genel bir mutabakat vardır. Ne de olsa doğa mantıken kendisiyle çelişemez ve iki teori bugünkü şekilleriyle evrendeki zilyonlarca kara deliğe ve evrenin başlangıcına uygulandığında birbiriyle çelişir. Bu teorileri, büyük ölçekte genel göreliliğe ve küçük ölçekte kuantum fiziğine yaklaştıran tek bir teoride birleştirmenin bir yolu olmalıdır.

Böyle bir "her şeyin teorisi" kuantumun nihai öyküsü olurdu. Bunun bir kuantum teorisi –kuantum fiziğinin ana ilkelerini kapsayan bir teori– olması beklenir. Eğer keşfedersek, bu teori, prensip olarak –protonları ve nötronları oluşturan kuarklardan kozmosa kadar– fiziksel olan her şeyi tanımlayacaktır.

Üstünlük dereceleri listemdeki ikinci iddiaya ilişkin olarak, kuantum fiziğinin doğruluğu hayret vericidir. Örneğin atomlardan çıkan ışığı göz önüne alalım. Doğadaki en basit ve her yerde var olan atom olan hidrojenden çıkan ışığa dair

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

kuantum tahminleri özellikle doğrudur. Aşağı yukarı her hidrojen atomu çekirdeğinde tek bir proton ile çekirdek etrafında hareket eden tek bir elektrondan oluşur. Kuantum teorisi "atom halleri" arasında geçiş yapan bütün atomların bu süreçte bir foton yayarak ışık saçtıklarını öngörür. Şimdi bunun ne anlama geldiğini açıklayalım.

Kuantum kuralları bir hidrojen atomundaki elektronun sadece belirli "hareket hallerinde" hareket etmesi gerektiğini belirtir. Elektron için böyle birçok *atom hali* vardır, bunların her biri belirli ve öngörülebilir miktarda enerjiye sahiptir; bu biraz bir vantilatörün hızlı, orta ve yavaş çalışma halinde olmasına benzetilebilir.[10] (Küçük bir not: İyi bilinen *enerji* kelimesini birkaç kez kelimeyi tanımlamadan kullandım, çünkü çoğu insanın enerjinin ne olduğuna dair şu an için yeterli olacak kadar fikri vardır. Enerji fiziğin en önemli kelimesidir ve onun için net bir tanımlama gerekir ki bu da 3. Bölüm'de olacak.) Teoriye göre atomlar yüksek enerjili bir halden düşük enerjili bir hale geçiş yaparken süreçte bir foton yayarak ışık ve diğer ışımaları yayar. Toplam enerji daima korunduğu için (3. Bölüm), fotonun enerjisi, atom düşük enerjili hale "düştüğünde" kaybettiği enerjiye eşit olmalıdır. Görünüşe göre (5. Bölüm) bir fotonun enerjisi atomun yaydığı ışımanın dalga boyunu (dalganın iki tepesi arasındaki mesafeyi) belirler.

Kuantum fiziği işte bu şekilde herhangi bir hidrojen atomunun yaydığı görünür ışığın farklı renklerinin ve diğer ışımaların dalga boylarını tahmin edebilir. Bu dalga boyu sınıflandırmasına hidrojenin görünür *spektrumu* (bu kelime "aralık" anlamına gelir ve genellikle bir dalga boyu aralığını ifade eder) denir. Bir kutu hidrojen atomunu korlaşana kadar ısıtırsanız, birçok atomu daha yüksek enerjili hallere "uyarırsınız" ve bu uyanlmış atomlar sürekli olarak hidrojen spektrumuna ait olan dalga boylarına sahip fotonlar yayarak

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

enerjilerini salar.[11] İşte bu nedenle güneş veya neon ışıklı tabela gibi sıcak gazlar parlar.[12] Daha sonra prizma veya başka bir cihaz kullanarak ışığı büker ve farklı renklere (farklı dalga boylarına) ayırırsanız, bükme miktarı size her rengin dalga boyunu söyler. Bu dalga boyları birçok rakama kadar tahmin edilip ölçülebilir. Örneğin bir hidrojen atomunun bir sonraki en düşük enerjiden olası en düşük enerjiye geçişi sırasında yaydığı dalga boyunun 0,000000121568 metre olduğu tahmin edilir. Küçük bir cismin içinde oluşturulan dalgalarda, tahmin edebileceğiniz gibi, atom dalga boyları normalde çok küçüktür. Hidrojenin bu özel dalga boyu görünür ışığın dalga boyları aralığından daha kısadır ve *morötesi* (mordan yüksek, mor ışıktan daha çok enerji içeren) aralıkta bulunur. Ölçülen ve tahmin edilen dalga boyları deneysel hata sınırları içinde uyuşur. Bu tarz altı rakamlı doğruluk atom fiziğinde normaldir.

Spektrum çalışması bilimin en verimli girişimlerinden biridir, her türden bilim ve teknolojide kullanılan, oldukça çok sayıda doğru bilgi sağlar. Kuantum fiziği olmasa bu mümkün olmazdı.

Tarihte en hassas biçimde doğrulanmış bilimsel tahmin öyküsü *kuantum elektrodinamiği* alanından çıkmıştır.

Her elektron etrafındaki uzayda elektrik ve manyetik etkiler yaratır. Manyetik etkilerin bir nedeni de her elektronun içsel bir dönüye sahip olmasıdır: Tıpkı dünyanın bir kuzey-güney ekseni etrafında dönmesi gibi, elektronlar da daima bir eksen etrafında dönerler. Bu dönüşün büyüklüğünün sabit olması doğanın temel bir olgusudur; her elektronda aynıdır, ne durdurulabilir ne de değiştirilebilir. Elektrik yüklü cisimlerin bu tarz hareketleri daima manyetik etkiler yaratır (4.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Bölüm). Dönen bir elektronun manyetik etkilerinin kuvveti elektronun *manyetik momenti* adı verilen bir terimle nicel olarak ifade edilir; bu, elektronun *g-faktörü* adı verilen anahtar bir faktör hariç hesaplanması kolay bir miktardır. G-faktörünün anlamını bir yana bırakacak olursak, bizim için önemli olan bunun tam olarak tahmin edilebilmesi ve aynı zamanda tam olarak ölçülebilmesidir; dolayısıyla bu kuantum teorisini deneysel gerçeklikle kıyaslamada önemli bir araçtır. Bunun boyutsuz bir sayı olduğu görülür (yani her ölçüm sisteminde aynı sayıdır). Elektronun bu özelliğini ölçmek için deneyi yapanların *tek bir elektronu* güçlü bir manyetik alan içinde *aylarca tutmaları* gerekir ki bu epeyce zor bir iştir. Bunun en son ölçülen değeri 0,00115965218073(28)'dir ve parantez içindeki iki rakam belirsizdir.[13] Dolayısıyla elektronun g-faktörü 12 rakama kadar ölçülmüş, 14 rakama kadar da yaklaşık olarak ölçülmüştür. Kuantum kuramcıları da gerçekte elektronun g-faktörünü 12 rakama kadar hesaplayabiliyorlar. Hesaplama altmış yıllık bir dönemde giderek artan bir kesinlikle yürütülen, göz korkutucu on binlerce tekil hesaplamaya dayanır. Bu hesaplamanın sonucu da tam olarak aynı 12 rakamdır!

Bu olağanüstü bir şey! İnsanlar 12 rakamlı belirli bir sayıyı tahmin edebiliyorlar. Başkalarına şöyle diyebiliyorlar: "Eğer bir laboratuvara gider, şunu şunu yaparsan, bu 12 rakamlı sayıyı bulursun." Ve insanlar bu denilenleri yaptıklarında doğa ananın bu tahmini doğruladığını görürler. Binlerce yıl önce bazı kültürler yılın en uzun gününde güneşin ufkun yaklaşık olarak neresinden ve ne zaman doğacağının yanı sıra, başka göksel olayları da yaklaşık olarak tahmin edebiliyorlardı. Kısmen bu tarz olaylar için bir gözlemevi olarak inşa edilen İngiltere'deki Stonehenge gibi Taş Devri yapıları[14] bu tahminlerin büyük huşu uyandırdığını kanıtlar. Kuantum fiziğinin çok daha doğru ve detaylı tahminleri, insanların doğayla bağlantı

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

kurma ve doğayı anlama becerisinin huşu uyandıran örnekleri olarak aynı ışık altında değerlendirilmelidir. Umarım bu kitapta anlatılanlar da sizde benzer bir merak uyandırır.

Finansal açıdan faydasına gelince, diyebiliriz ki, günümüzde tüm dünya ekonomisi kuantum bilgimize bağlıdır. Elektronik bilgisayar, transistor, lazer ve hatta internet sunucuları ağı bile çoğunlukla kuantum alanında araştırma yapan fizikçiler tarafından icat edilmiştir.[15] Adeta bütün dünya ekonomisi bu teknolojilere bağlıdır. Tüm bunlara bir fiyat etiketi takmak zordur, ancak söylendiğine göre, 2001'de bu teknolojiler sayesinde sağlanan kazanç ABD'deki gayri safi yurtiçi hasılanın yüzde 30'una eşitti[16] ve günümüzde kuşkusuz Birleşik Devletler'de yılda trilyonlarca dolara ve dünyada da onlarca trilyon dolara ulaşıyor.

Transistor (enformasyon devriminin temelini oluşturur), tünel diyotu, lazer, maser, fiber optik, röntgen cihazı, dönüş tabanlı elektronik, senkroton ışık kaynağı, radyoaktif izleyici, taramalı tünelleme mikroskobu, süperiletken mıknatıs, elektron mikroskobu, pozitron yayınlayıcı tomografi (PET) taraması, x ışını bilgisayarlı tomografi (CAT), manyetik rezonans görüntüleme (MRI), süper akışkan sıvılar, nükleer reaktör, nükleer bomba, nükleer manyetik rezonans, nükleer tıp, radyoaktif izleyici, mikroçip ve yarı iletkenler gibi uygulamaların arkasında kuantum fiziği yatıyor.

Kuantumun Temellerine Dair Kuşkular

Kuantumun doğumundan beri bir yüzyılı aşkın bir süre geçmiş olmasına rağmen, dayandığı temellerin halen tartışmalı olması şaşırtıcıdır. 2011'de Anton Zeilinger'in düzenlediği "Kuantum Fiziği ve Gerçekliğin Doğası" adlı konfe-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

ransta 27 fizikçi, 5 düşünür ve 3 matematikçiye kuantumun temellerindeki ana meseleleri kapsayan 16 çoktan seçmeli sorudan oluşan bir anket verildi. Konferansa katılanlar bazı temel ilkelerde büyük oranda ihtilafa düştüler. Toplantıyı düzenleyenler anketi şu sözlerle özetledi: "Bilim camiasında teorinin temel yapıtaşlarının yorumuna ilişkin halen bir mutabakat yok. Anketimiz bu olağandışı duruma dair acil bir uyarı niteliğindedir."[17]

Problem kuantum teorisinin denklem ve ifadelerinin aslında ne anlama geldiğini anlamanın kolay olmamasıdır. Formel matematik teorisi diğer fizik teorilerine göre daha soyuttur ve somut olarak yorumlanması daha zordur. Hatta birçok bilim insanı teorinin gerçek dünyayı mı tanımladığını yoksa sadece deneysel sonuçları tahmin etmede yararlı bir matematiksel yönerge mi olduğunu bile sorguluyor. Sonraki sayfalarda göreceğimiz gibi, teorinin öne sürülen birçok değiştirilmiş hali ve yorumu var.

Günümüzde tartışmalar en az üç mesele etrafında toplanıyor: Dalga-parçacık ikiliği (5. Bölüm), yerbilmezlik (*nonlocality*) (9. Bölüm) ve ölçüm problemi (10. Bölüm). Birkaç on yıl önce, kuantum rastgeleliği de bu halen tartışmalı konular listesindeydi. Einstein ve diğer birçok bilim insanı, radyoaktif bozunmanın ve diğer kuantum fenomenlerinin belirsizliğinin sadece görünüşte olduğunu ve geleceğin tamamen şimdiki zaman tarafından belirlendiğini gösterecek, kuantum fiziğinin ötesinde, henüz keşfedilmemiş bir teori olduğunu düşünüyorlardı. Birkaç fizikçi böyle belirlenimci (deterministik) bir doğa tanımını araştırmaya devam etse de, çoğu fizikçi belirsizliğe dair muazzam sayıda kanıt olduğunu kabul ediyor (6. Bölüm).

Dalga-parçacık ikiliğine ilişkin olarak, kuantum alan teorisinin –kuantum fiziğini Einstein'ın görelilik teorisinde belirttiği uzay ve zaman hakkındaki fikirleriyle birleştiren teo-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

rinin– başarıları Steven Weinberg ve Frank Wilczek gibi önde gelen kuantum kuramcılarını, evrenin boş uzaydaki parçacıklar yerine alanlardaki dalgalardan oluştuğuna ikna etmiştir; hem bilimsel mutabakat hem de kanıtlar artık bu yöne işaret ediyor.[18]

Yerbilmezliğe gelince, 1935'te Albert Einstein ve meslektaşları kuantum fiziğinin bu fenomeni öngördüğüne dikkat çeken ilk bilim insanlarıydı.[19] Ancak yerbilmezlik Einstein'ın görüşüne göre o kadar "acayipti" ki, Einstein acayip olmayan, –yerbilmez olmayan– daha "tam" bir teorinin kuantum fiziğinin yerine geçmesi gerektiği sonucuna vardı. 9. Bölüm'de 1970'ten bu yana yapılan deneylerin, doğanın aslında kuantum fiziğinin öngördüğü yerbilmezliği sergilediğini gösterdiğini göreceksiniz. Dolayısıyla giderek artan ve bir mutabakata yaklaşan bir kuantum yerbilmezliği kabulü söz konusu.[20]

Ölçüm problemi, namı diğer "Schrödinger'in kedisi" halen temel bir sorun; benim görüşüme göre kuantumun sürüncemede kalmış tek önemli temel meselesi. Bazı uzmanlar bunu çözümlenmemiş, bazıları çözümlenmiş ve bazıları da çözüm gerektirmeyen, sahte bir problem olarak görüyor. Uzmanların çoğu fizikçilerin bununla ilgili ciddi bir fikir birliğine varmaları gerektiği konusunda hemfikir. Bu meseleyi ilk olarak 1968'de Josef Jauch'un öne sürdüğü ve o zamandan bu yana başkalarının geliştirdiği bir çözümü destekleyen yeni argümanlar sunduğum 10. Bölüm'de ele alıyoruz. 1960'lardan bu yana kaydedilen gelişmeler, özellikle "dolaruklık" adı verilen yerbilmezlik fenomenine dair daha derin kavrayışımız (9. Bölüm) Schrödinger'in kedisinin asıl anlamına yeni bir ışık tutuyor.

Kuantum fiziği çoğunlukla göremediğimiz şeylerle ilgilidir. Temel ilkeleri en hafif deyimiyle şaşırtıcıdır ve kuantu-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

mun 115 yıllık tarihi boyunca temel ilkelerine dair bilimsel ihtilafların ardı arkası kesilmez. Dolayısıyla kuantumdan esinlenen birçok *sahte bilimsel* yaklaşımın –destekleyici kanıtlardan ve rasyonel inandırıcılıktan yoksun olmasına rağmen bilimsel görünecek şekilde sunulan, bilimsel süreçlerin çarpıtılmış yanıltıcı hallerinin– ortaya atılması şaşırtıcı değildir. Bilimsel okuryazarlığa şiddetle ihtiyaç duyulan bir dünyada sahte bilim bize hiç lazım olmayan şeydir.

Birkaç örneği inceleyelim. 2004 yapımı popüler bir film olan *What the Bleep Do We Know?* 10 milyon dolar hasılat yaptı ve birkaç film ödülü kazandı. Filmin ana fikri kendi realitemizi bilinç ve kuantum fiziği vasıtasıyla yarattığımızdır. Düşüncelerin buz kristallerinin yapısını değiştirdiğini gösterdiği iddiasında bulunur. Bir medyum tarafından "kanalize edilen" 35.000 yaşındaki bir ruhla röportaj yapar ve "etrafımızdaki maddi dünyanın bilincin olası hareketleri dışında bir şey olmadığı" gibi şeyler söyleyen fizikçileri ön plana çıkarır.[21]

Popüler televizyon doktoru Deepak Chopra bize kuantum şifacılığının, zihinsel güç uygulayarak hastalıklarımızı tedavi edebileceğini söylüyor.[22] Chopra'nın *New York Times*'ın en çok satanlar listesine giren *Yaşlanmaz Beden Sonsuz Zihin* adlı kitabı dünya çapında iki milyondan fazla sattı.

Ölçüm probleminden bir kaçış arayan fizikçiler tarafından öne sürülen birçok kuantum yorumundan biri, insan bilincinin, bir kuantum halinin nihayet nasıl "çökebildiğini" açıklamasıdır (9. ve 10. Bölümler). Ancak insan bilincinin bu süreçte en ufak bir rol oynadığına ilişkin hiçbir kanıt yoktur. Bilincin dıştaki fiziksel olayları kontrol edebildiği görüşü, kerameti kendinden menkul medyum Uri Geller'in sırf zihin gücüyle kaşıkları eğdiği iddiasının tıpatıp benzeridir. Bu iddia, kuantum hallerinin evrenin insanların olmadığı geri kalanında nasıl çöktüğünü veya insanlar var olmadan önce na-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

sıl çökebildiğini veya bir bebeğin veya akıllı bir maymunun kuantum hallerini çökertip çökertemeyeceği sorusunu akla getirir. Bu konuları muhtemelen herkesten daha iyi bilen seçkin fizikçi Eugene Wigner, büyük matematikçi ve kuantum temelleri analisti John von Neumann gibi bir süre bu görüşü benimsedi. Wigner on yıl sonra, 1970'te bu görüşten vazgeçti.[23] Ancak kuantum fiziğinin gözden düşmüş "bilinç" görüşü sürekli ortaya çıkmaya devam ediyor. 2006'da yayımlanan ve California Üniversitesi'nde ve başka yerlerdeki temel bilimler fizik derslerinde yaygın olarak kullanılan bir ders kitabının adı şudur: *Kuantum Muamması: Fizik Bilince Karşı*.[24] Kitap, Wigner daha sonra reddetmesine rağmen, kuantum fiziğinin bilinç yorumu için Wigner'in modası geçmiş görüşlerini kanıt olarak kullanmaya devam ediyor.[25] Mantıklı düşüncenin bu görüşü doğrudan reddetmesi gerektiği halde, 10. Bölüm'de bilinç yorumunu açıkça ve ikna edici bir biçimde çürütmek için bu sorunu ele alan, yayımlanmış bir deneyi anlatacağım.

Kuantumdan esinlenen sahte bilim, duyu ötesi algıdan alternatif tıbba kadar çok sayıda hayret verici fakat sorgulanabilir iddiayı destekler.[26] Kitabevi yöneticilerinin ve kütüphanecilerin, bir kitabın *new age*, din ve kuantum fiziği raflarından hangisine koyulacağını şaşırdığı bu dönem bilim için iyi bir zaman değildir.

Kuantum Öyküleri iyimser bir bakış açısı sunuyor yani kuantumun genel çerçevesi mevcut haliyle iyidir ve görünüşteki paradokslar bu çerçeve içinde çözülür veya çözülebilir. Sahte bilimsel çarpıtmaları kesinlikle reddetmeliyiz; üstelik herhangi bir türden temel düzeltmeye veya alışılmadık yorumlara bariz bir ihtiyaç yoktur. Bilimin en temel teorisi onun aleyhinde olanların tasavvur edebileceğinden daha iyi bir durumdadır.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

KISIM I

EVREN KUANTUMLARDAN OLUŞUR

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

2

Kuantum Fiziğinin Konusu Nedir?

Bu bölüm sıklıkla en küçük ölçeklerdeki madde ve enerjinin bilimi olarak tanımlanan *kuantum fiziğinin* genel yapısını tanımlıyor. Kuantum fiziğinin çoğu moleküler, atomik ve atomaltı ölçeklerde yapılmasına rağmen, boyuta dayalı bu tanımlama aşırı basitleştirilmiştir, çünkü kuantumlar ille de küçük değildir; aslında dünya büyüklüğünde olabilirler (5. Bölüm). Ve iki veya daha fazla "dolanık" kuantum (9. Bölüm), parçaları derinlemesine birleşik olan ve farklı galaksilerde bulunsalar bile birbirlerini ânında etkileyebilen tek bir birleşik kuantum olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla bu kitap şu tanımlamadan hareket ediyor:

Bildiğimiz kadarıyla, evrendeki her şey tümüyle kuantumlardan oluşur. Kuantum fiziği evrenin bu temel öğelerinin doğasıyla ve davranışlarıyla ilgilenir.

Öyleyse kuantum nedir? Bu kolay bir soru değil. Kuantumlar güç algılanır, sezgilere aykırıdır ve tam olarak anlaşılamamıştır. Gelgelelim bu soruyu 1951'de anladığımızdan daha iyi anlıyoruz ki o zamanlar Albert Einstein bir meslektaşına şöyle yazmıştı: "Elli yıl boyunca üzerinde çok kafa yormama rağmen, 'Işık kuantumları nedir?' sorusunu yanıtlamaya yaklaşamadım bile. Bugünlerde her önüne gelen bunu bildiğini sanıyor ama yanılıyor."[1]

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

1905 yılında kuantum fikrini ilk kez kabul eden çığır açıcı bir çalışma kaleme alan Einstein bahsettiği şeyin bilincindeydi. Çalışması bir metale vuran ışığın metalin yüzeyinden dışarı elektronların çıkmasına neden olduğu, *fotoelektrik etki* denen basit bir fenomenle ilgiliydi. Işığın küçük demetlerden, yani "parçacıklardan" oluştuğunu varsayan Einstein bu fenomenin sayısal detaylarını açıklayabildi. Kuantumlara dair ilk matematiksel ipucu 1900'de Max Planck'tan geldi, fakat Einstein'ın çalışması kuantumu fiziksel bir cisim olarak sunan ilk çalışmaydı. Einstein'ın 1921'de kazandığı Nobel Ödülü, daha önemli olan özel görelilik teorisi (1905) ile genel görelilik teorisine (1915) değil, 1905 tarihli bu çalışmasına verildi. 1921 itibariyle Einstein'ın bir Nobel Ödülü'nü hak ettiği belliydi fakat görelilik üzerine olan çalışması halen tartışmalıydı, o yüzden Nobel Komitesi yaygın olarak kabul gören, fotoelektrik etki üzerine olan çalışmasına ödül verdi. Einstein çoğunlukla problemli meseleler hakkında paha biçilmez yorumlar sunan, çok zeki bir eleştirmen olarak hayatı boyunca kuantum fiziğiyle ilgilenmeye devam etti.[2]

Kuantum kelimesi "miktar" (*quantity*) kelimesinden gelir. Kuantumun temel bir tanımı şudur: *Kuantum, oldukça birleşik, uzayda yayılmış, belirli miktarda bir alan enerjisidir.* Bu kitap bu söylenmesi ve anlaşılması zor ifadeyi anlamaya ve çetrefilli ayrıntılarını anlatmaya adanmıştır. Foton, elektron, proton, atom ve moleküller kuantum örnekleridir. Kuantumu bir enerji demeti olarak düşünün. Ancak *demet* terimi yanıltıcı olabilir, çünkü tek bir kuantum kilometrelerce uzunlukta bir bölgeye ince bir şekilde yayılabilir ve hatta kozmolojik mesafelerle ayrılmış, belli belirsiz bir şekilde bağlı parçaları bile kapsayabilir; iki gözlemenin bir kızartma tavasının içinde ince bir hamur katmanıyla bağlanması gibi. Kuantumlar bir kuantumun kilometrelerce genişlikte olsa bile ya bütünüyle

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

mevcut olması ya da hiç mevcut olmaması anlamında "sayısaldır". Bir kuantumun bir parçasına sahip olamaz, bir kuantumu derece derece yaratamaz ve yine derece derece yok edemezsiniz.[3] Bir kuantum daima her yerde ânında oluşur, kaybolur veya konfigürasyonunu değiştirir. Işığı açtığınızda uzayda yayılmış her bir ışık kuantumu (her bir proton) ânında var olur ve ışık kaybolduğunda foton kilometrelerce genişlikte olsa bile her bir tam kuantum ânında yok olur. Üstelik kuantumlar bazen bir konfigürasyondan büsbütün farklı bir konfigürasyona ânında sıçrar.[4] Bu ya hep, ya hiç niteliği kuantumun büyük tuhaflığıyla yakından ilgilidir.[5]

Kuantum fiziği "Kuantumlar nedir ve nasıl davranırlar?" sorusunu yanıtlar. 2. Bölüm'den 5. Bölüm'e kadar ilk soru ve 6. Bölüm'den 9. Bölüm'e kadar da ikinci soru ele alınıyor. 10. ve 11. Bölümlerde sezgilere aykırı bu kuantumların nasıl normal dünyaya yol açtığı ele alınıyor.

Evren Kuantumlardan Oluşur

Bazı kişiler her şeyin atomlardan oluştuğunu söyler, fakat günümüzde bunun hiç de doğru olmadığını biliyoruz. Birçok şey –lahanalar, krallar, ayaklar– atomlardan oluşur. "Atomlar" kimya sınıflarında asılı çizelgelerde listelendiğini fark etmiş olabileceğiniz aşağı yukarı 100 temel kimyasal "elementin" tanınabilir en küçük parçalarıdır. Örneğin hidrojen elementi, tanınabilir (hidrojenle ilişkili özelliklere sahip) en küçük parçaları hidrojen atomları olan, gaz halinde bir maddedir.

Ancak birçok şey atomlardan oluşmaz. Işık buna bir örnektir. Işığa benzer fakat görünmez olan radyo, kızılötesi, x ışınları ve diğer görülmeyen ışımalar (diğer adıyla *radyasyonlar*; bu ismin verilmesinin nedeni merkezî bir kaynaktan dışa doğru yaklaşık yarım daire biçiminde yayılmalarıdır) atomlardan

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

oluşmaz. Atomlardan oluşmayan diğer şeyler arasında elektrik akımı, her mıknatısı kuşatan manyetik alan ve dünyanın yerçekimi alanı vardır. Her ne kadar atomlar proton, nötron ve elektronlardan oluşsa da, bunlar atomlardan oluşmaz. Her proton ve nötronun içinde atomlardan oluşmayan üç kuark bulunur. 2012'de Cenevre'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda keşfedilen ünlü Higgs bozonları atomlardan oluşmaz.[6] Şu anda zarar vermeden vücudunuzdan geçmekte olan trilyonlarca nötrino (bazıları boydan boya gezegenin içinden geçmek zorunda olsalar bile şu an itibariyle 2 saniye sonra ayın yörüngesini geçmiş olacaktır) atomlardan oluşmaz.[7]

Miktar olarak bunların herhangi birinden daha önemli olanlar ise evrenin enerjisinin %95'ini oluşturan görünmez *karanlık madde* ve *karanlık enerjidir*. Bu karanlık kesim neredeyse tespit edilemez olmasına rağmen etrafınızı çepeçevre sarar ve evreni kaplar. Birkaç astronom 1930'lar gibi erken bir tarihte karanlık maddenin varlığından şüphelenseler de, 20. yüzyılın sonlarına kadar varlığından haberimiz yoktu. Karanlık maddeye biraz yaklaştık, ama halen ikisinin de ne olduğunu bilmiyoruz. Ne karanlık maddenin ne de karanlık enerjinin atomlardan oluşmadığını biliyoruz. Muhtemelen kuantumlardan oluştukları ve evrenin çoğu da karanlık madde ve karanlık enerjiden oluştuğu için, bunlar üzerinde biraz daha düşüneceğiz.

Fakat biraz duralım. Evrendeki enerjinin yüzde doksan beşi atomlardan oluşmuyor, dört bir tarafımızda yer alıyor ve biz onu göremiyor muyuz? Bunu uydurmadığımı nereden biliyorsunuz? Böyle tuhaf bir iddia kanıt gerektirir. Şunu sormalısınız (ve sorarsanız şapka çıkarırım): "Nee? Bunu nereden biliyoruz peki? Kanıt var mı?" Bilim insanları doğuştan şüphecidir.

Bunun hakkında konuşabilmek için bazı yeni kavramlara ihtiyacımız var. *Madde* ağırlığı olan materyal anlamına gelir.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Normal madde (lahanalar, krallar, ayaklar) atomlardan ve moleküllerden oluşur. Atomların ve moleküllerin lahanalarla önemli bir benzerliği vardır. Bunları, kaçınılmaz olan kuantum rastgele titreşim hareketine tabi olmaları haricinde, önünüze hareketsiz halde koyabilirsiniz (6. Bölüm). Ağırlıkla ilgili bir kavram –yani kütle– bunu açıklar. Maddi bir cismin *kütlesi*, hareketsiz haldeki bir cismi ivmelendirmek (hızlandırmak) için gereken kuvvetin (itme) bir ölçüsüdür. Kilogram cinsinden ölçülür. Dolayısıyla 2 kilogramlık bir cismi (belirli bir miktara kadar) ivmelendirmek için, 1 kilogramlık cismi ivmelendirmek için gerekenden 2 kat fazla kuvvet gerekir. Bir cismi ivmelendirmeye yönelik bu zorluk aynı zamanda cismin *ataleti* olarak da bilinir. Işık ve diğer ışımaların kütle ve ataletlerinin olmaması şaşırtıcıdır. Bir ışıma kuantumu olan fotonu ivmelendirmek son derece kolaydır. Onu hareket ettirmek için hiç kuvvet gerekmez. Bunu bilmemizin nedeni bugüne kadar gözlemlenmiş olan her fotonun ışık hızında hareket etmesidir. Asla bir fotonun sıfırdan ışık hızına ulaştığını görmeyiz. Örneğin bir ampulün düğmesinin açılmasıyla birlikte oluşan bir foton ışık hızında hareket eder.[8] Dolayısıyla madde ile ışıma arasındaki fark maddenin kütlesi varken ışımanın kütlesinin olmamasıdır.

Karanlık maddeye dair en dolaysız kanıt galaksi gözlemlerinden elde edilir.[9] Samanyolu galaksimiz dahil, galaksiler genellikle ya patates ya da ince gözleme biçiminde, kütleçekimiyle bir arada tutulan, devasa yıldız topluluklarıdır. Gözlemlenebilir evrende her biri tipik olarak yüz milyarlarca yıldız içeren yüz milyarlarca galaksi vardır. Karanlık maddeye dair ilk kanıtlar 1930'larda, kütleçekimi kuvvetiyle birbirlerine bağlanmış galaksi kümelerinin incelenmesinden elde edildi. Bazı kümeler, astronomların galaksilerdeki bütün parlayan, görünür maddenin tahmini kütleçekimi kuvvetiyle

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

açıklayabileceklerinden daha sıkı bir şekilde bir arada duruyorlardı. Astronomlar parlamayan, yeni bir madde formunun kümeleri bir arada tutmaya yardımcı olduğu varsayımında bulundu.

Maddenin görünmeyen formuna dair bu hipotez radikal gibi görünür, ancak alternatifi daha da radikaldir. Eğer maddenin parlamayan yeni bir formu olmasaydı, o takdirde sadece Newton'un kütleçekimi yasasının değil, aynı zamanda Einstein'ın yaygın olarak kabul gören genel görelilik teorisinin de yanlış olması gerekirdi. Bu bilimsel süreçte önemli bir derstir: Bilim insanları bir hevesle veya şık bir şekilde radikal olmak için tuhaf fikirler icat etmezler. Bu fikirleri bilim insanlarına gözlemlenen olgular dayatır, çünkü bunun alternatifi daha da radikal olurdu.

1970'lerde astronom Vera Rubin galaksileri tek tek inceleyerek bu kanıtlara yenilerini ekledi. Disk şeklindeki galaksiler bir taş plak gibi kendi merkezleri etrafında döner ve yıldızları arasındaki kütleçekimi kuvvetiyle bir arada tutulurlar. Gelgelelim Rubin şunu keşfetti: Bazı galaksiler o kadar hızlı dönüyorlardı ki, yıldızların tıpkı hızlanan bir arabanın keskin bir virajı alırken otobandan uçmasına benzer şekilde, galaksi merkezinin etrafındaki yaklaşık olarak dairesel yörüngelerinden çıkmaları gerekirdi. Galaksinin görünür yıldızlarının kütleçekimi dışında ilave bir şey yıldızları yörüngelerinde tutuyor olmalıydı. Parlamayan madde yine en iyi yanıt gibi görünüyordu.[10]

Karanlık enerjiye dair en iyi kanıt evrenin genişlediğinin gözlemlenmesinden elde edilmiştir. 13,8 milyar yıl önce evrenin büyük patlamayla başlamasından bu yana her şey dışa doğru hareket etmeye devam etmiştir. Galaksiler (ortalama

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

olarak) birbirlerinden, galaksimizden ve diğer bütün galaksilerden uzaklaşıyor.[11] Evrenin genişlemesi galaksilerin hangi hızda dışa doğru hareket ettiklerini ve ne kadar uzaklaştıklarını ölçen sayısız gözlemle doğrulanmıştır. Bu kitapta astronomların bu şeyleri ölçtükleri fantastik yöntemlere girmiyoruz (bunları herhangi bir astronomi ders kitabında bulabilirsiniz).

1980'lerde iki astronom ekibi çok uzak galaksilerin mesafelerini ve genişleme hızlarını bu galaksilerdeki *süpernova* adı verilen patlayan yıldızlardan alınan ışığa dayanarak ölçmek için yeni bir yöntem kullandılar. Tipik bir galakside sadece birkaç on yılda bir meydana gelen her patlamadan sonra süpernova birkaç gün veya hafta boyunca içinde bulunduğu galaksinin tamamından daha fazla parlar ve bu olay bilinen evrenin tamamından görülebilir. Bu çalışma bize çok çok uzak olan süpernovaların ve dolayısıyla bunları içeren galaksilerin bize olan uzaklıklarını ve bizden uzaklaşma hızlarını da tespit etti. Çok uzak mesafede olan herhangi bir şeyin uzun zaman önceki halini görürüz, çünkü ışığın oradan buraya ulaşması uzun zaman alır. Örneğin güneşin 8 dakika önceki halini görürüz, çünkü güneş ışığının dünyaya ulaşması 8 dakika sürer. Kim bilir, belki güneş 7 dakika önce patlamış da olabilir. Dolayısıyla ışığının dünyaya ulaşması örneğin 12 milyar yıl süren, yeterince uzak bir süpernova, evrenin genç olduğu, büyük patlamadan 2 milyar yıl sonraki haliyle görülürdü. Evren bir çeşit tek yönlü zaman makinesi gibidir; biz daima geçmişe bakıyoruz.

İki ekibin süpernova ölçümlerinden yeni bir şoke edici sonuç ortaya çıktı. Evren 13,8 milyar yıldır genişlediği gibi bu genişleme halen hızlanıyordu! 1929'dan bu yana herkes büyük patlamanın evrenin genişlemesine yol açtığını biliyordu. Aynı zamanda herkes, yukarı doğru fırlatılan bir taşın yükse-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

lirken onu aşağı çeken yerçekimi kuvvetinin sonucu olarak yavaşlamasının gerekmesiyle aynı nedenden bu genişlemenin yavaşlaması gerektiğini de "biliyordu". Görünüşe bakılırsa tek soru şuydu: Genişleme hangi hızda yavaşlıyordu? Ancak bilim risklidir. Yeni gözlemler eski teorilerin tekerine çomak sokabilir. Yeni bir olgu vardı. Genişleme hızlanıyordu.

Bu devrim niteliğinde bir gözlemdi. Bunu 1998'de *Science* dergisinde okuduğumu hatırlıyorum. Her ne kadar önceki ipuçları bu sonucu akla getirmiş olsa da, bütün bilim camiası gibi ben de şaşırmıştım. Hiçbir şey evreni hızlandırıyor gibi görünmediği halde evren nasıl hızlanabiliyordu?

Ancak bilim insanları hızlanmakta olan evreni hemen ciddiye aldılar, çünkü bu gerçek kanıtlarla destekleniyordu. Hızlanma birbirinden bağımsız çalışan iki tecrübeli grubun yıllar süren zahmetli çalışmalarıyla ölçülmüştü. Bilim camiasında hızla yayılan bu yeni sonuç *Science* dergisinde yılın öyküsü oldu. İki yıl içinde astronomlar bu devrim niteliğindeki yeni olguyu kabul etmişlerdi.[12]

Burada alınacak bir ders vardır. Bilimsel sonuçlar kişinin sıkı sıkıya bağlı olduğu inançlarına uygun olmayabildiği için, ABD halkının bir kesimi bilime kuşkuyla yaklaşır. Bazı şüpheciler asıl geri kafalı olan ve yeni olgular ortaya çıktığında geç değişen kişilerin bilim dışı inançlarına tutunanlar değil de, bilim insanları olduğu görüşüyle savunuyorlar iddialarını. Örneğin "yaradılış teorisine inananlar" evrim teorisinin geçerliliğini yitirmemesinin tek nedeninin, biyologların 150 yıldır sıkı sıkıya bağlı oldukları fikirlerini değiştirme düşüncesine katlanamamaları olduğuna kendilerini inandırmışlardır. Ancak bilim insanları evrim teorisini onun lehinde muazzam sayıda kanıt ortaya çıkmaya devam ederken, aleyhinde hiçbir kanıt olmadığı için kabul ediyor. Bilim insanlarının yeni kanıtları kabul etmede mantığa sığmayacak ölçüde

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

yavaş kaldıkları durumlar olmuştur,[13] fakat hızlanan evren konusu, kanıtlar desteklediğinde bilimin yeni teorileri hızla kabul edebildiğini gösterir. Bilimsel süreç kusursuz işlemez ama sonuçta işler.[14]

Genişledikçe yavaşlayan bir evrenin harekete geçmesi için büyük patlama gibi dışa doğru iten bir ilk patlama enerjisi gerekir. Bununla birlikte, harekete geçtiğinde, vuruş yapıldıktan sonra bile bir beysbol topunun saha dışına doğru uçmaya devam etmesiyle aynı nedenden ötürü, daha fazla itme olmadan genişlemeye devam edebilir.[15] Ancak evren yavaşlamak yerine hızlandığı için, bilinen fiziğe göre bir şeyin onu hızlandırması gerekir. Her ne kadar bu şeyin ne olduğunu bilmesek de, ona bir isim verdik: *Karanlık enerji*.[16]

Hem karanlık madde hem de karanlık enerji büyük patlamadan bize gelen yüksek enerjili ışımada kodlanmıştır. Bu ışımanın çok az bir kısmı soğurulmuştur, o yüzden halen evreni kaplar. Zaten başka nereye gidebilirdi ki? Bu ışıma hâlâ bizi çepeçevre sarar, ama şimdi bir mikrodalga fırında yiyeceğinizi ısıtan ışımaya benzeyen ancak yoğunluğu ondan çok daha az olan, dalga boyu uzun mikrodalgalar halinde uzamıştır (evrenin genişlemesi nedeniyle). Astronomlar yörüngede bulunan uydulardaki mikrodalga detektörlerini kullanarak bu ışımanın yoğunluğunu farklı yönlerde ve mikrodalga spektrumunun tümü boyunca kaydetmişlerdir. Bu dalgalar büyük patlamanın bazı yönlerdeki sıcak noktaları ile diğer yönlerdeki soğuk noktalarına dair bilgi taşır; bu bilgiler de evrenin büyük patlama sırasında enerjisinin ancak yüzde 68'inin karanlık enerji, yüzde 27'sinin karanlık madde ve yalnızca yüzde 5'inin normal madde (bunlar günümüzde yaygın olarak kabul edilen rakamlardır) olarak açıklanabileceği şekilde uzadığını ve sıkıştığını söyler.[17] Normal madde aslında o kadar da normal değildir!

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Son olarak, bu bölümün başlığı olan "Evren Kuantumlardan Oluşur" ibaresi "Evren Atomlardan Oluşur" ifadesinden çok daha doğrudur, fakat bu ifade iki sınırlama gerektirir. İlk olarak, karanlık enerjinin *kuantum vakumu* olma olasılığı yüksektir. 5. Bölüm'de göreceğimiz üzere, kuantum vakumu kuantum fiziğinin önemli bir bölümünü oluşturduğu ve enerji içerdiği halde, "kuantumlardan oluştuğu" söylenemez. Durum tam tersidir: Kuantumlar evreni kaplayan kuantum vakumu alanındaki dalgalardır. İkinci olarak, kuantum fiziğinin karanlık maddeyi ve karanlık enerjiyi açıklayabilmesi için üzerinde biraz değişiklik yapılması gerekebilir. Karanlık madde ve karanlık enerjinin kuantum formatına uyduğu görüşü bu noktada tümüyle teoriktir: Başka her şey kuantum fiziğine uyduğuna göre, neden karanlık madde ve karanlık enerji de uymasın? Kuantum fiziğinin bu zorluğun üstesinden geleceğine dair bahse girerim, fakat sporcu ve filozof Yogi Berra'nın dediği gibi, "Tahminde bulunmak zor, özellikle gelecek hakkında". Ne de olsa çoğumuz (ben dahil) evrenin genişlemesinin yavaşlamakta olduğunu düşünmüştük.

Kuantumun İzinde: Çift Yarık Deneyi

Kuantum basittir fakat algılaması güçtür. Birkaç kuantum örneğinden söz ettim: foton, elektron, atom, molekül ve Higgs bozonları. Peki, bu şeyler nedir? Bunlar ufacık bir bezelye tanesi veya bundan daha küçük toz zerresi gibi basbayağı küçük parçacıklar mıdır? Bunun yanıtı basittir: Hayır. *Parçacık* bu şeyler için popüler ama zayıf bir kelime seçimidir, ben kullanmamaya çalışırım. Fizikçilerin çoğu *parçacık* kelimesini sık kullanmalarına rağmen bunu bilirler. Kuantumlar bezelye tanesine veya toz zerresine pek benzemezler. Bazen parçacık gibi davransalar da çoğu zaman öyle davranmazlar.

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

Işık bilinen bir örnektir. Bizi çepeçevre kuşatır ama onu tanımlamak zordur. Platon gözlerimizin gördüğümüz cisimlere doğru hareket eden, görünmez ışınlar yaydıklarını düşünüyordu.[18] Isaac Newton aydınlatılmış cisimlerin gözlerimize parçacık akışı gönderdiğini,[19] Newton'un çağdaşı Christian Huygens ise aydınlatılmış cisimlerin gözlerimize giren dalgalar yaydıklarını düşünüyordu. Işığın doğası bilimin en eski meselelerinden biridir; ışığı kavrama arayışı modern fiziğin iki dayanağına –Einstein'ın görelilik teorisine ve kuantum fiziğine– yol açtı.[20]

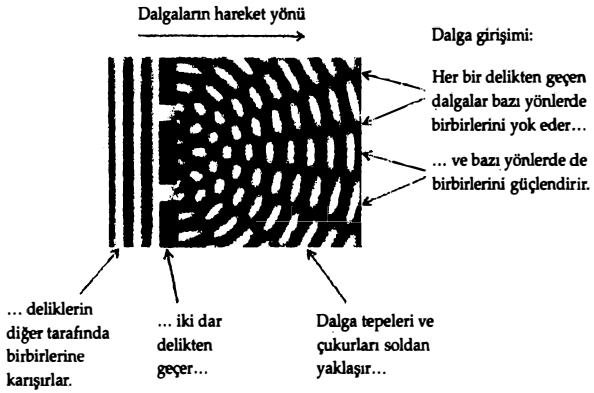
Huygens haklıydı: Işık bir dalgadır. Platon epeyce yanılıyordu. Newton kısmen haklıydı: Işık dalgaları gerçekte foton adı verilen küçük kuantumlardan oluşur. Bununla birlikte bu fotonlar Newton'un düşündüğü gibi ufak mermilere benzer, küçük, izole parçacıklar değildir. Kuantumlar bundan daha muğlaktır. Onlara adım adım yaklaşacağız. Burada çoğunlukla ışığın dalga yönlerine odaklanıyor, kuantumun detaylarını da 5. Bölüm'e saklıyorum.

Şimdi ışığın dalga olduğunu öğrenme öykümüzü anlatalım.

Şekil 2.1 bir *dalga tankı deneyindeki* su yüzeyinin yukarısından çekilen bir fotoğraftır. Fotoğrafta küçük su dalgaları yandan aydınlatılmıştır, böylece dalga tepeleri parlak ve çukurları karanlık görünür. Uzun düz dalgalar soldan, iki küçük deliği olan bir bariyere yaklaşır. Dalgalar deliklerden geçer ve bariyerin sağ tarafında ortaya çıkar.

Tüm dalgaların ortak bir özelliği olan ve kuantum fiziğinde çok önemli olan iki fenomen dikkate değerdir. İlk olarak, deliklerden geçen dalgalar her bir deliğin uzağına, her yarığın yukarısında ve aşağısındaki, gölge bölgesi olarak kabul

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org



Şekil 2.1 Su dalgası girişimi, bir dalga tankı deneyinde iki delikten geçen dalgalara tepeden bakış.

edilebilecek bölgenin içine yayılır. *Kırınım* adı verilen bu yayılmanın daha dar deliklerde daha belirgin olduğu görülür.

İkinci olarak, iki delikten geçen dalgalar deliklerin ötesinde *karışacak (girişim yapacak)* şekilde üst üste biner. Yani iki dalga seti bazı yerlerde üst üste binerek büyük dalgalar oluşturur, bazı yerlerde de birbirlerini iptal ederek hiç dalga oluşturmaz. Gördüğünüz gibi, dalgaların birbirini iptal ettiği yerlerde iki delik bölgesinden dışa doğru, yaklaşık olarak durgun suda düz çizgiler oluşurken, dalgaların üst üste bindiği yerlerde aynı merkezden dışa doğru yönelen, büyük dalga çizgileri oluşur.

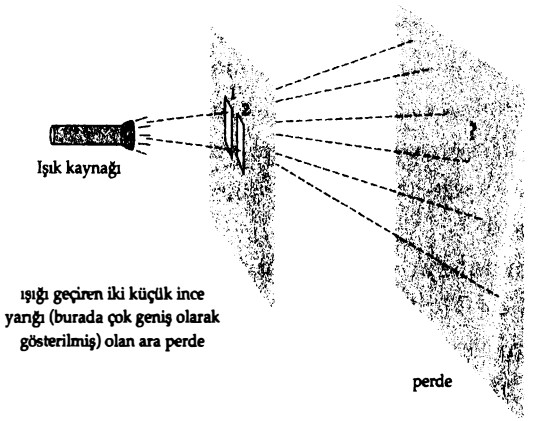
Şimdi bunun nedenini açıklayalım. Ayrı ayrı işlev gören her bir delik dışarı doğru yarım daire biçiminde dalgalar gönderir; iki delikten çıkan dalgalar birbirlerinin içinden bozunmadan geçer, böylece iki tepe karşılaştığında su iki kat yükselir, iki çukur karşılaştığında iki kat alçalır ve bir tepe ile çukur karşılaştığında ise hem alçalır hem yükselir ve sonuçta yüksekliği değişmez. İki dalga setinin birbirlerini güç-

Ücretsiz PDF Kitap Arsivi - https://rantey.org

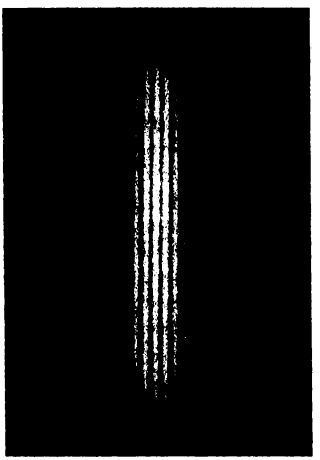
lendirdikleri veya iptal ettikleri bu fenomene *dalga girişimi* veya basitçe *girişim* denir. Bunun olması için iki veya daha fazla dalga seti gerekir ve bunun olması da su yüzeyinde en az iki dalga setinin aynı anda bulunduğunun kesin kanıtıdır. Girişimin anahtar niteliğinde bir kuantum fenomeni olduğu ortaya çıkar. Ayrıca ışığın bir dalga olduğunu kanıtlamanın da anahtarıdır.

Tüm zamanların en güzel fizik deneylerinden birini ilk olarak 1801'de Thomas Young gerçekleştirdi.[21] Bu deney bu kitapta Young'ın hayal edemeyeceği şekillerde tekrar tekrar ortaya çıkıyor. Young iki kaynaktan çıkan ışığın dalga girişimi sergilediğini gösterdi. Deney Şekil 2.2'de tasvir ediliyor, fakat notlarda açıklandığı gibi biraz basitleştirilmiş olarak. Işık opak bir bölmedeki iki uzun dar yarıktan geçer. Işık yarıklardan geçtikten sonra bir görüntüleme perdesi ışığı tespit eder.

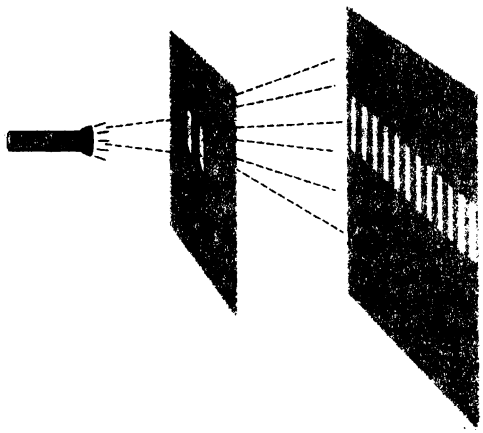
Şekil 2.3 ışığın görüntüleme perdesinde oluşturduğu görüntüyü gösterir. Bu fotoğraf Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, alıcı perdenin konumuna fotoğraf filmi yerleştirerek elde edildi. Birçok uzun parlak ışık çizgisi ve bunların aralarında birçok uzun, karanlık çizgi görürüz. Bu çizgileri açıklayabilmek için Şekil 2.1'e dönelim ve dalga tankının yalnızca uzaktaki sağ sınırına bakan bir gözlemci hayal edelim. Bu gözlemci sınırda bazı noktalara gelen büyük dalgalar ile bunların aralarında hiç dalganın gelmediği noktalar görür. Bu dalga tankı deneyinin üçüncü boyuta uzadığını hayal edelim; tank sayfadan çıkar, böylece Şekil 2.1'deki iki delik Şekil 2.4'teki iki yarık halini alır. Aralarında dalgasız bölgelerin olduğu büyük dalgaların girişim örüntüsünün sınıra gelmesi Şekil 2.3'teki duruma benzer; bu şekildeki parlak çizgiler görüntüleme perdesine gelen büyük ışık dalgaları, karanlık çizgiler de hiç dalganın gelmediği bölgelerdir.



Şekil 2.2 Işıkla yapılan çift yarık deneyi. Görüntüleme perdesinde ne gözlemlenecek?



Şekil 2.3 Işıkla yapılan çift yarık deneyinin sonucu



Şekil 2.4 Işıkla yapılan çift yarık deneyi: deneysel düzenek ve sonuç

Başka bir deyişle, Şekil 2.3, Şekil 2.1'de gösterilen iki boyutlu yüzey dalgaları girişiminin üç boyutlu benzeridir. Işık dalgaları iki yarıktan geliyorsa, bu görüntüleme perdesi üzerinde tam olarak görmeyi beklediğiniz şeydir. Şekil 2.3'teki her bir uzun ışık çizgisi bir "yapıcı girişim" bölgesidir; burada bir yarıktan gelen tepeler diğer yarıktan gelen tepelerle, çukurlar ise diğer yarıktan gelen çukurlarla karşılaşır, her bir uzun, karanlık çizgi de bir yarıktan gelen tepelerin diğer yarıktan gelen çukurlarla karşılaştığı "yıkıcı girişim" bölgesidir.

Hatırlarsanız, Young'ın deneyinden önce Newton ve Huygens ışığın parçacıklardan mı yoksa dalgalardan mı oluştuğu konusunda zıt fikirlere sahipti. Şekil 2.2'de eğer ışık, ışık kaynağından çıkan bir parçacık akışı olsaydı, bazı parçacıklar 1. yarıktan geçerken, aşağı yukarı buna eşit miktarda parçacık da 2. yarıktan geçerdi. 1. yarıktan geçenler dosdoğru ilerleyerek 1. yarığın direkt arkasındaki görüntüleme perdesi üzerinde birikirken, 2. yarıktan geçenler de 2. yarığın arkasında birikirdi; böylece her biri yarıklardan birinin direkt arkasında yoğunlaşan iki uzun, parlak ışık bandı görürdük. Şekil 2.3'te

gördüğümüz ise bu değildir. Kanıtlar yayılmış bir girişim örüntüsü gösterir. Bu da bilim insanlarını ışığın küçük parçacıklardan değil, yayılan dalgalardan oluştuğuna ikna etti.

Ve işte bu deney sayesinde ışığın bir dalga olduğunu biliyoruz.

Bilim dikkatli gözlemlere dayanır. Şekil 2.1'i ele alalım. *Dalgalar (tepeler ve çukurlar) sağa doğru hareket etmelerine rağmen, su yüzeyi basitçe aşağı yukarı titreşiyor.* Bunu bir küvette veya başka bir su teknesinde kontrol edin. İlk olarak tümüyle durgun bir suya tek bir su damlası damlatın. Meydana gelen dairesel dalgalanma iyi bir dalga örneğidir. Şimdi durgun suda küçük bir mantar veya başka bir nesne yüzdürün ve yakınına bir damla damlatın. Dalga altından geçerken mantar yukarı çıkıp inerek tek bir yerde kalır. Bunun da kanıtladığı gibi, su sadece aşağı yukarı titreştiği halde, dalga damlanın çarpma noktasından dışa doğru hareket eder. Suyun kendisi dışa doğru hareket etmez.

Öyleyse su dalgası nedir?

(*Biraz ara verip üzerinde düşünelim.*)

Makul bir açıklama şudur: *Su dalgası suda yol alan bir bozunumdur;* su yüzeyinin normalde düz olan durumunun değişmesidir. Bozunum (şekil yani bir dizi tepe ve çukur) su yüzeyi boyunca yol alır, fakat su yerinde kalarak sadece aşağı yukarı titreşir.

Bütün dalgalar, yani bir halattan aşağı gönderilen dalgalar, bir stadyumdaki "dalga", yaylı bir oyuncağa verilen basınç dalgaları ve ses dalgaları su dalgası gibi davranır. Her biri bir maddede yol alan bir bozunumdur, maddenin kendisi dalga ile birlikte yol almaz. Bu maddeye dalganın *vasıtası* denir. Vasıtanın hareketinin dalganın hareketinden oldukça farklı ol-

duğunu hatırlayalım. Dalga yol alır fakat vasıta yerinde kalır ve sadece titreşir.

Şunun üzerinde biraz düşünelim: Halat dalgasının vasıtası nedir? Spor dalgasının? Yay dalgalarının? Ses dalgalarının?

(*Biraz ara verip üzerinde düşünelim.*)

Bozunacak bir şey olmadan bozunum olamayacağı için bu dalgaların her birinin bir vasıtası olmalıdır. Halat dalgası için bu halattır. Spor dalgasında bu kalkıp oturarak "titreşen" taraftarların vücutlarıdır. Bir yay dalgasında bu yaylı oyuncağın sarımlarıdır; bunun diğerlerinden biraz farklı olduğuna dikkat edelim, çünkü sarımların titreşimleri, dalga hareketine dik olan aşağı-yukarı yerine, dalga hareketinin yönüyle aynı doğrultuda olan ileri-geridir. Ve ses dalgalarında da vasıta havadır. Ses hakkındaki bu olguyu bir bilim dersinden bilebilirsiniz, ancak gözlemlerden o kadar belli değildir. Bunun şık bir kanıtı vardır: Birçok bilim müzesinde, camla kapatılmış bir bölme içinde yüksek sesle çalan bir çan sergilenir. Daha sonra bölmenin içindeki hava azar azar boşaltılır. Hava seyreldikçe ses azalır ve nihayet tokmağın hâlâ çana güçlü bir biçimde vurduğunu gördüğünüz halde ses kaybolur.

Öyleyse ışık dalgalarının vasıtası nedir? Young'ın deneyinin ardından bunun hakkında çokça tartışma oldu. Vasıta hava olamaz; çünkü ışık havanın olmadığı uzay boşluğunda, örneğin güneşten dünyaya yol alır.

Yanıt bizi modern fiziğin çoğunun en önemli noktası olan, yeni bir fiziksel cisim türüne götürür: *Evren "alan" adı verilen, görülmeyen fakat tümüyle gerçek oluşumlarla kaplıdır*. 4. Bölüm tümüyle alanlara ayrılmıştır. Bilinen bir örnek de bütün mıknatısların etrafındaki uzayı kaplayan manyetik alandır. Bir mıknatısın alanı, başka bir mıknatısın (veya demir gibi kolayca mıknatıslanan herhangi bir maddenin) bu mıknatıstan bir kuvvet algıladığı herhangi bir yerde mevcuttur. Başka bir

örnek de taş ve diğer cisimlerin bırakıldıklarında düşmelerine yol açan dünyanın yerçekimi alanıdır. Yerçekimi (kütleçekimi) alanı, bırakılan bir taşın dünyaya doğru düştüğü, dünyadan uzak yerler dahil herhangi bir yerde mevcuttur.[23] Manyetik alanları veya kütleçekimi alanlarını göremezsiniz, ancak alana yerleştirilen cisimlerin üzerindeki etkileri nedeniyle var olduklarını bilirsiniz. Fizikçiler bir alanı uzayın bir özelliği olarak düşünürler. Örneğin gezegenimizin yüzeyinin hemen ötesindeki uzayın en az iki alan özelliği vardır: Dünyanın manyetik alanı (kanıtı manyetik pusulaların çalışmasıdır) ve dünyanın yerçekimi alanı (kanıtı düşen taşlardır).

4. Bölüm'de göreceğimiz gibi, manyetik alanlar en iyi, *elektromanyetik (EM) alan* adı verilen, daha kapsamlı bir alanın bir bileşeni olarak düşünülebilir. Tüm temel alanlar gibi bu EM alan da evreni kaplar. *Evrensel EM alan* ışık dalgalarının vasıtasıdır. Işık tastamam bir kuantum fenomenidir ve EM alan da kuantum fiziğinin ilkelerine kesin surette uyar. Dolayısıyla bu kitap boyunca ışık önemli bir örnek oluşturur.

Kuantum fiziğinin en temel ilkesi, *her biri bütün evreni kaplayan ve hepsi kuantize olan sadece birkaç farklı temel alan olduğudur.*[24] Bu 4. ve 5. bölümlerde açıklığa kavuşturacağımız önemli bir ifadedir. Kuantum fiziği için gerekli iki kilit kavram alanlar ve kuantumlardır. Kuantize alanlar iki kavramı birleştirir. Şimdilik, *kuantize bir alan* (yani kuantum alanı), alan enerjisinin görünmeyen demetlerinden yani *kuantumlarından* oluşur, dememiz yeterlidir.

Dolayısıyla Huygens haklıydı. Young'ın çift yarık deneyinin de kanıtladığı gibi, ışık bir dalgadır. 4. Bölüm'de sunulan kanıtlar ışığın EM alanda bir dalga olduğunu gösterir. Newton da kısmen haklıydı: EM alan kuantize olduğu için ışık *kuantum* adı verilen demetler halindedir. Ancak birazdan göreceğimiz gibi, kuantumların Newton'un düşündüğü gibi

küçük, izole, mermi benzeri "parçacıklarla" hiç ilgisi yoktur. Bazen parçacık gibi davransalar da kuantumlar hiçbir şekilde parçacık değildir.

Kuantumlar mı Küçük Parçacıklar mı?

Haydi, şimdi uzay-zamanda bir yolculuk yapalım ve Batı dünyasının büyük fikirlerinin birçoğunun temellerinin atıldığı antik Yunanistan'a gidelim. Ne fizik kelimesi ne de çalışma alanı henüz icat edilmemiş olmasına rağmen, Yunanlı Demokritos (MÖ 460-370) doğuştan fizikçiydi. Ayrıca doğuştan filozoftu ki, bu terim günümüzde de halen bilgelik âşığı anlamına gelir. Onun öyküsü çok genel bir şekilde kuantum fiziğinin başlangıcını temsil eder. Demokritos dünyanın bilinen ilk "düşünce deneyini" icat etti. Bu, prensipte basit fakat uygulamada zor olabilecek hayalî bir deneydi. Bir altın külçesini ikiye böldüğünüzü, sonra bu parçaları da ikiye böldüğünüzü ve ortaya çıkan her küçük parçayı ikiye bölmeye devam ettiğinizi düşünelim. Bu işleme sonsuza dek devam edebilir misiniz, yoksa nihayet artık daha fazla bölmenin mümkün olmadığı bir noktaya gelir misiniz? Madde sonsuza dek bölünebilir mi yoksa bölünemez parçalardan mı oluşur?

Demokritos'a göre birinci alternatif olanaksız görünüyordu. Eğer parçalara bölme sonsuza dek devam ederse, eninde sonunda algılanamayacak kadar küçük –başka bir deyişle, hiçlikten ayırt edilemeyen– parçalara ulaşırdık. Altın algılanabilir olmaktan çıkardı ki, bu saçma görünüyordu. Demokritos kesme işleminin eninde sonunda bölünemez cisimlerde son bulması gerektiğini düşünüyordu. Bunlara Yunanca "kesilemez" veya "parçasız" anlamına gelen *atomos* adını verdi.

Ancak bu meseleyi sezgisel felsefe yapma noktasında bırakmadı; deneyimlerine dayanan fiziksel kanıtlar sunarak çalışmasını sadece felsefi değil, aynı zamanda bilimsel de kıl-

dı. Kişisel felsefesi, meydana gelen her şeyin sebebinin madde veya maddenin hareketleri olduğuydu ki, bu *felsefi materyalizm* olarak bilinen bir ilkedir. Dolayısıyla Demokritos'un kanıtı maddi nedensellik şeklini aldı. Demokritos şunu önerdi: Bir somun ekmeğin fırında piştiğini düşünelim. Bir kişi kayda değer bir mesafede olsa ve ekmeği görmese bile kokusundan taze pişmiş ekmeği tespit edebilir. Demokritos'a göre böyle bir fenomenin ekmeğin içinde başlayan fiziksel bir nedeni olmalıdır. Ekmeğin atomoslarından bir kısmı fırınlama sürecinde ortaya çıkıp hava yoluyla insanların burunlarına ulaşmalıdır. Ekmek, ekmeğe özgü olan atomosları salmalıdır; örneğin menekşelerden de menekşelere özgün kokusunu veren başka atomoslar çıkmalı ve bu kural tüm kokulu nesneler için geçerli olmalıdır. "Bu atomoslar burunlarımıza girdiğinde," diyordu Demokritos, "uygun kokuyu algılamamıza neden olurlar." Modern bakış açımıza göre bile bu, kokular için yapılmış, kabul edilebilir bir açıklamaydı. Demokritos muhtemelen bilimsel teorilere bu tarzda kesin kanıt sağlayan tarihteki ilk düşünürdü.

Günümüzde Yunanca *atomos* kelimesinden biraz farklı olan *atom* kelimesini kullanırız. Sözcük anlamı Yunancada ona verilen isimin anlamıyla çelişen modern atom aslında bazı öğelerden –bir çekirdek ile etrafındaki elektronlardan– oluşur. Hidrojen, helyum, altın ve uranyum gibi, *kimyasal elementler* olarak bilinen yaklaşık 100 farklı atom türü vardır; sınıflarda ve ders kitaplarında görülen periyodik tablolarda listelenir ve genellikle hidrojen için H, helyum için He, altın için Au (altının Latincesi *aurum*'dur) ve uranyum için U gibi standart kısaltmalarla gösterilirler. Bu farklı elementleri çekirdeklerindeki proton sayılarıyla ayırt ederiz. Genellikle elektron sayısı proton sayısına eşittir. Örneğin bütün hidrojen atomlarının çekirdeklerinde 1, bütün helyum atomlarında 2, bütün altın atomlarında 79 ve bütün uranyum atomlarında

92 proton bulunur. Her elementin kimyasal özellikleri farklıdır, çünkü elektron sayıları farklıdır ve gerçekte bir elementin kimyasal özelliklerini belirleyen de bu elektronlardır. Koku kimyasal bir özelliktir, ancak tek bir atomdan tertip edilemeyecek kadar karmaşıktır. Kokuların çoğu, en küçük öğeleri yani *molekülleri* onlarca hidrojen, karbon ve oksijen atomundan oluşan, özgül "bileşiklerdir".[25] Dolayısıyla moleküller iki veya daha fazla atomun "bileşimidir". Özgül moleküller içerdikleri elementlerle ve her elementin atom sayısıyla gösterilir. Örneğin H_2O su molekülüdür, hidrojen elementinin iki atomu ile oksijen elementinin bir atomundan oluşur.

Demokritos bazı yönlerden haklıydı. Demokritos'un, evrenin daha küçük parçalara bölünemeyen küçük parçalardan oluştuğu fikri günümüzde kuantum fiziğine göre doğrudur. Ancak günümüzün nihai parçaları olan *temel kuantumlar* Demokritos'un atomosuna pek benzemez. Bunlar Demokritos'un ve daha sonra Isaac Newton'un da düşündüğü gibi, ne yok edilemez ne de değiştirilemez niteliktedir. Yine de bunlar Demokritos'un ısrarla üstünde durduğu bir anahtar niteliği muhafaza ederler: Bir temel kuantum ayrılabilir öğelerden oluşmaz ve daima tek bir birim gibi hareket eder.

Görünüşe göre elektronların, fotonların ve altı kuark çeşidi gibi diğer kuantumların evrenin temel bölünemez öğeleri olarak nitelenmeleri gerekir. Bildiğimiz kadarıyla bir elektronu, bir fotonu veya bir kuarkı bölemeyiz. Bununla birlikte, herhangi bir kuantumun yok edilebileceği ve enerjisinin bir veya daha fazla başka kuantum oluşturmak için kullanılabileceği unutulmamalıdır; ancak bu diğer kuantumlar orijinal kuantumun parçaları değildir. Örneğin bir foton yok olabilir ve yerine bir elektron ile bir *antielektron* gibi bir maddi parçacık çifti oluşabilir, ancak elektron ve antielektron yeni şeylerdir, orijinal fotonun parçaları değillerdir.

Her şey sadece birkaç temel kuantum çeşidinden oluşuyor gibi görünüyor. Örneğin bütün proton ve nötronlar üç kuarktan oluşan, bileşik cisimlerdir. Bütün atomlar kuark ve elektronlardan oluşan bileşimlerdir. 5. Bölüm'de bilinen her şeyin oluştuğu, bütün bilinen temel kuantumların listelendiği bir tablo yer alıyor. (Karanlık madde ve karanlık enerji henüz "bilinen şeyler" değildir.)

Demokritos'tan bu yana evrenin nihayetinde boş uzayda ayrı ayrı hareket eden, bölünemez parçalardan mı, yoksa bütün uzayı kaplayan bir veya daha fazla "alandan" mı oluştuğu hakkında süregelen bir tartışma vardır. Uzay neredeyse boş mu yoksa dolu mudur? Demokritos, şu ünlü sözlerinden de anlaşılacağı gibi, kesinlikle bir parçacık taraftarıydı:

> Genel kabule göre tatlı tatlıdır, acı acıdır, sıcak sıcaktır, soğuk soğuktur ve renk de renktir. Ancak gerçekte atomos ve boşluk (boş uzay) vardır. Yani duyu nesneleri gerçek farz edilir ve onları böyle kabul etmek alışıldık bir şeydir, ancak gerçekte öyle değillerdir. Sadece atomos ve boşluk gerçektir.[26]

Modern bakış açımıza göre iki görüşte de biraz doğruluk payı vardır ama alan görüşünde doğruluk payı biraz daha fazladır. 5. Bölüm her şeyin kuantumlardan oluştuğunun kanıtını sunuyor. Bunlar evreni kaplayan görünmez alanlardaki dalgalar olarak tutarlı bir şekilde tanımlanabilir. Bütünüyle parçacığa dayalı bir teori yönünden deneysel kanıtları tanımlamanın bilinen tutarlı bir yöntemi yok. Hem alana hem de parçacığa dayalı bir teori mantıksal olarak mümkün olabilir, ancak bu Occam'ın usturası ilkesine aykırıdır: Neden evren bu kadar farklı iki temel oluşum türünden meydana gelsin ki?

Kuantumlar Demokritos'un parçacıklarına pek benzemez. Evvela, Demokritos'un atomosu da, Newton'un farazi

parçacıkları da kalıcı ve değiştirilemezdi. Ancak kuantumlar pek kalıcı değildir ve değiştirilebilir. Bütün kuantumlar ânında diğer enerji formlarından yaratılıp ânında yok edilebilir. Başka bir nokta da, bütün kuantumların *kuantum halleri* adı verilen çeşitli konfigürasyonları edinebilmeleridir. (7. Bölüm)

Bir başka önemli nokta, Demokritos'un savının aksine, *uzayın boş olmamasıdır*. Evrenin uzak köşelerinde, atomların nadiren bulunduğu galaksi kümeleri arasındaki devasa bölgeler gibi yerlerde bile, kütleçekimi alanı, EM alan ve diğer temel alanların hepsi her milimetreküpü aynı anda kaplar. Tüm bu alanlar daima, her yerde mevcuttur.

Kafa karıştıracak kadar çok sayıda alan varmış gibi görünüyor; ancak nihai umut, tüm bu alanların, etrafımızda gördüğümüz her şeyi açıklayan bir doğa ve davranışla birlikte, gerçekte her yerde mevcut, tek bir birleşik alana eşit olmasıdır. Böyle birleşik bir alan kuşkusuz Einstein'ın umuduydu ve bugün "her şeyin birleşik kuantum alan teorisi" vizyonunda yaşamaktadır.[27]

Galaksi kümeleri arasındaki uzay gibi bölgeler çoğunlukla vakum artı birkaç fiili kuantum içerir. Ancak şaşırtıcı bir şekilde, *modern fizikte* vakum *kelimesi artık hiçlik anlamına gelmiyor*. Modern fizikte fiziksel bir vakum bütün kuantumlardan yoksun bir bölge anlamına gelir, ancak bu hiçlik demek değildir. Aslına bakarsanız, *her kuantum enerji içeren, "hiçlik" olmayan ve fiziksel olarak gerçek vakum alanları içindeki bir dalga veya bozunumdur*. Dolayısıyla vakum alanları olmadan kuantumlar var olamayacağı için bu alanlar diğer her şeyin kaynağıdır. Kuantum fiziğinin hiç kuantum olmayan bölgelerde bile gerçek vakum alanlarını gerektirdiğini göreceğiz (5. ve 6. bölümler). "Hiçbir şey" olanaksızdır!

Asla içinde hiçbir şey olmayan bir uzay bölgesi bulamayacağız. Uzayın bir bölgesinden, vakum alanları dahil olmak

üzere bütün alanları çıkarabilseydik, (kuantum fiziğine göre) bu bölgenin fiziksel evrenden silinmesi gerekirdi. Bunun nedeni, Heisenberg ilkesi olarak bilinen kuantum kavramına göre her kuantum alanın, en azından kuantum vakumu şeklinde her yerde mevcut olmasının gerekmesidir. Eğer herhangi bir temel alan bir bölgeden yok olursa, bu alanın değeri –kuvveti yani büyüklüğü– bu bölge boyunca sıfır olur ve Heisenberg'in ilkesinin aksine, bu değerin hiçbir kuantum rastgeleliği (belirsizliği) yoktur. Bu nedenle en azından *vakum dalgalanmaları* –sayıları sıfıra yakın rastgele dalgalanmalar– olarak bilinen minimal alan her yerde mevcut olmalıdır. Kuantum fiziği evrenin her tarafının kuantum alanlarıyla kaplı olmasını zorunlu kılar.

Alanlar ile parçacıklar ve kuantumların yapısı konularını 5. Bölüm'de derinlemesine inceleyeceğiz.

Kuantum Fikri: Doğa Sayısaldır

1894'te ünlü Amerikalı fizikçi Albert Michelson artık yapılabilecek daha fazla önemli keşif olmadığını söyledi. Çağdaşı bir fizikçi olan Lord Kelvin'den alıntı yaparak şöyle dedi: "Saygın bir fizikçi fizik biliminin gelecekteki hakikatlerinin ondalık sayıların altıncı hanesinde aranması gerektiğini ifade etti."[28] Birçok bilim insanı, Michelson ve Kelvin'in, belli ana ilkelerin –yani Newton yasaları, termodinamik ilkeleri (enerji, "ısı" ve sıcaklık) ve elektromanyetizma ilkelerinin– artık bilindiklerine ve değişmeyeceklerine dair inançlarını paylaşıyorlardı.

Ancak sadece 6 yıl sonra, Aralık 1900'de bu tür meseleler değişmeye başladı. Her ne kadar o sırada radikal ve hatta yeni olarak tanınmasa bile tamamen yeni bir fizik keşfedildi. Alman Fizik Derneği'nin bir toplantısında Max Planck ısıtılmış cisimlerin yaydığı ışımalarla ilgili analizini anlattı. Planck'ın

fikrinin değerini anlamak için biraz geçmişe bakmak gerekir.

Mikroskobik madde asla hareketsiz durmaz. Hareketsiz görünen katı maddeler içinde bile atomlar ve moleküller aralıksız olarak ve "rastgele" –organize olmayan, öngörülemeyen bir şekilde– salınırlar. Bu mikroskobik hareketler maddenin sıcaklığının bir yansımasıdır; aslında mikroskobik seviyede sıcaklıkla kastettiğimiz şey, "atom ve moleküllerin rastgele hareketidir". Bunun üzerinde düşündüğünüzde, sıcaklık ve moleküler hareket arasındaki bu bağlantı şaşırtıcı görünmekle birlikte, birçok deneyle doğrulanmıştır. Bu deneylerden birinde suda veya başka bir sıvıda asılı duran ufak polen veya toz parçacıkları gözlemlenir. Mikroskop altında polen parçacıklarının durmaksızın oraya buraya sıçradıkları görülebilir; bunun nedeni su moleküllerinin mikroskopla görülemeyecek kadar küçük hareketlerinin neden olduğu çarpmalardır. Bilim insanları suyun sıcaklığını artırdıkça, polen parçacıklarının mikroskop altında görülebilen sıçramaları da temeldeki moleküllerin varsayılan rastgele hareketlerinden nicel olarak tahmin edilebilecek şekilde artar.[29] Sıcaklıktan kaynaklanan bu rastgele moleküler harekete ısıl hareket denir.

4. Bölüm'de göreceğimiz üzere, titreşen elektriklenmiş cisimlerin birçok yönde EM enerji yaymaları (elektromanyetik ışıma) temel bir elektromanyetizma ilkesidir. Moleküller elektrik yüklü protonlar ve elektronlar içerdikleri ve bütün maddelerde sürekli ileri geri ısıl hareket içinde bulundukları için, bütün maddelerin sürekli olarak EM enerji yaydıkları ve bu ısıl ışımanın genellikle sıcaklıkla birlikte arttığı sonucuna varınız.

Örneğin elektrikli ocağın içindeki direnç telleri ısı artırıldıkça giderek daha fazla parlar. Ayrıca renkleri de koyu kırmızıdan parlak kırmızıya ve nihayet, yeterince yüksek derecelerde ısıtılırsa akkora dönüşür. Bu beyaz ışık görünen tüm

renkleri, ışığın görünür dalga boylarının tüm spektrumunu içerir (konuyla ilgili daha fazla bilgi 4. Bölüm'de yer alıyor). Yıldızlar, ateş ve akkor telli lambalar aynı nedenden parlar. Aslına bakarsanız, bu kitap ve vücudunuz gibi daha soğuk nesneler de aynı şekilde "parlar", ancak gözün tespit edemediği, *kızılötesi* adı verilen, bir çeşit daha düşük enerjili EM ışımayla. Bütün normal maddeler bu tarz ısıl ışıma yayar. Bu genel ve temel bir fizik fenomenidir, dolayısıyla detaylarının temel fizik ilkeleriyle nicel olarak açıklanabilmesi beklenir.

19. yüzyılda birçok fizikçi böyle bir açıklama bulmaya çalıştı. Termodinamiğin ve elektromanyetizmanın bilinen ilkelerini kullanarak bir cismin belirli bir sıcaklıkta her bir dalga boyunda yaydığı enerji miktarını doğru olarak tahmin etmeyi umdular. Ancak bütün açıklamalar yetersiz kaldı. 19. yüzyıldaki termodinamik ve elektromanyetizma ilkelerine dayanan bir açıklama girişimi, daha kısa dalga boylarında yayılan enerji miktarının muazzam ölçüde arttığı tahmininde bulundu. 4. Bölüm'de göreceğimiz gibi, dalga boyu kısa olan ışımanın enerjisi daha yüksektir, ancak tahmin edilen enerji o kadar yüksekti ki dalga boyu kısa olan, yüksek enerjili ısıl ışımanın, bir ateşe veya akkor telli lambaya baktığımız her seferinde bizi kör etmesi gerekirdi.[30] Bu olmadığına göre bu teori yanlış olmalıdır.

Şimdi Max Planck'a gelelim. Planck da diğer bilim insanları gibi, parlayan bir cisimden yayılan ışımanın atomlarının titreşimlerinden kaynaklandığını varsaydı.[31] Bu varsayımdan çıkan belirli bir denklemi çözmek için uğraşan Planck, bir atomun yaydığı enerji miktarının sürekli bir enerji aralığından elde edilen, gelişigüzel bir değere sahip olduğunu kabul etmek yerine, belirli, özgül olası değerlerle sınırlı olduğunu varsaydığında matematiğin daha kolay olduğunu keşfetti. Başka bir deyişle, Planck bir atomun yaydığı enerji miktarının, "sürekli bir değer kümesi" ("0 ile 1 arasındaki herhangi

bir sayı" gibi) yerine, ancak "ayrık bir değer kümesi" (1, 2, 3 gibi...) aralığında değişebileceğini belirledi. Bunu matematiksel bir taktik olarak denedi, planı denklemi çözmek ve sonra sürekli durum için çözümü bulmak amacıyla izin verilen değerler arasındaki artışları sıfıra düşürmekti. Planı kısmen işe yaradı. Enerji artışlarını kullanarak deneysel sonuçlara yaklaşan bir çözüm elde etti fakat artışları azalttığında çözümde gene saçma bir şekilde kısa dalga boylarında büyük enerjiler öngörülüyordu. Planck çok uğraşmasına rağmen bu enerji artışlarından kurtulamadı. Doğru deney sonuçlarını ancak artışlar belirli bir büyüklükte olduğunda elde edebildi.

Sonuçta elde ettiği formül parlayan bir nesnenin belirli bir sıcaklıkta, her dalga boyunda yaydığı enerji miktarını doğru olarak tahmin etti. Planck'ın artışlarının çok önemli –aslında devrim niteliğinde– olduğu ortaya çıktı. Günümüzde bir atomun yaydığı enerjinin *kuantize –belirli bir değer kümesiyle sınırlı–* olduğunu söyleriz. Bu her şeyi değiştirdi.

Kuantize enerjiler kavramını açıklığa kavuşturmak için bir analoji verebiliriz. Analoji Planck'ın asıl bildirdiğinin ötesine geçer ve günümüzde anladığımız şekliyle kuantumlamanın (kuantize olmanın) tam betimlemesini sergiler.

Salıncakta sallandığınızı varsayalım. Salıncağı sallamak için bacaklarınızı bir ileri bir geri hareket ettirmeye devam ederseniz her salınımda giderek daha yükseğe çıkarsınız. Bacaklarınızı hareket ettirmeyi bırakırsanız maksimum yüksekliklerden giderek daha alçaklara doğru iner, derece derece ve sürekli olarak "yavaşlarsınız". Daha yükseğe salındıkça her bir ileri geri salınımın enerjisi artar; örneğin merkez noktasından geri geldiğinizde daha hızlı hareket edersiniz. Daha alçağa salındığınızda enerjiniz daha azdır. Enerjiniz, sıfır ila, ötesinde sallanmanın tehlikeli hale geldiği bir üst sınır arasında herhangi bir miktarda olabilir.

Ancak diyelim sallanma enerjiniz *kuantize* –sadece birkaç belirli değerle sınırlı– olsun. Böyle beş değer olduğunu ve bunların sizin en düşük noktanın yukarısında maksimum (son nokta) 2 metre (kısaltması m), 1,5 m, 1 m, 0,5 m ve 0 m'ye (hareketsizlik durumu) ulaşmanıza olanak verdiklerini varsayalım. Bu durumda hareket nasıl sonlanır?

(*Lütfen üzerinde biraz düşünün...*)

Bu biraz sarsıntılı olurdu. Hayalî kuantize salıncağınızın ani, *bir anda meydana gelen* hareketlerle enerjisini düşürmesi gerekirdi. Siz maksimum yükseklik olan 2 m'de hiç enerji kaybetmeden birkaç kez salınır, sonra ânında 1,5 m yükseklikteki daha küçük salınımlara geçer, o noktada birkaç salınım daha yapar, sonra yine ânında 1 m'ye geçer ve bu şekilde devam ederdiniz. Giderek daha düşük enerji değerlerine doğru böyle birkaç "kuantum sıçrayışından" sonra, kendinizi en düşük noktada hareketsiz halde bulurdunuz. İzin verilen enerji değerleri arasındaki sıçrayışlar anlık olmak zorundadır, çünkü varsayılan kuantumlama kuralımız salıncağın enerjisinin sadece izin verilen değerlerle sınırlı olduğunu söyler. Eğer bir enerji değerinden diğerine geçişiniz herhangi bir sürede (örneğin 0,001 saniye) gerçekleşseydi, geçiş sırasındaki enerjiniz izin verilen iki değer arasında olurdu, ama varsayılan kuantumlama kuralımız buna izin vermez.

Enerjinin asla yaratılmadığını veya yok edilmediğini duymuş olabilirsiniz (3. Bölüm). Dolayısıyla salıncak yüksekliğini ânında 2 m'den 1,5 m'ye indirdiğinde, buna karşılık gelen enerji kaybı başka bir yerde enerji kazancı olarak ortaya çıkmalıdır. Başka bir deyişle, salıncak anlık bir enerji patlaması yaymalıdır. Böylece kedi anlık sıçrayışlarda öldükçe, kuantize salıncak anlık patlamalar halinde enerji salar. Fizikçiler titreşen, çok küçük fakat makroskobik (çıplak gözle görülebilen) "tramplende" kuantum sıçramaları gözlemlemiş olmala-

rına rağmen (8. Bölüm), bu büyük ölçekli kuantumlama örneği çoğunlukla kurgudur. Kuantum sıçramaları mikroskobik dünyada yaygındır. Enerji patlamalarına *kuantumlar* denir. Salıncağın enerjisinin ve patlama enerjilerinin *kuantize* oldukları söylenir.

Kuantum fiziği bildiğimiz kadarıyla çocuk bahçesindeki salıncaklar dahil her şey için geçerlidir. Ancak gerçek bir salıncaktaki kuantumlar benim tasvir ettiğimden (enerji olarak) çok daha küçüktür. Bunlar o kadar küçüktür ki, salıncağınızın enerjisini küçük parçalar halinde azalttığını asla fark etmezsiniz. Gerçek yaşamdaki bir salıncağın hareketi yavaş yavaş sonlanır ve kuantum fiziği de pratikte bir fark oluşturmaz, çünkü bir kuantumun enerjisi herhangi bir makroskobik cismin enerjisine göre çok daha azdır.

Öte yandan bir atom açısından bu küçük enerji demetleri bizzat atomun enerjisiyle kıyaslanabilir ve büyük fark yaratırlar. Planck'ın kuantize enerjiler varsayımı, ısıtılmış bir cisimdeki atomların sürekli değil, aralıklı olarak ufak enerji patlamaları yaydığı anlamına geliyordu.

Bu tuhaf bir kavramdır. Enerjiler neden bu şekilde kısıtlanıyordu ki? Planck'ın hiçbir fikri yoktu. Bizim de hâlâ bir fikrimiz yok.[32] Evren böyledir; yani bu, ilave açıklama olmaksızın varsaymamız gereken temel bir fizik ilkesidir. Kendisi de bu varsayımdan şüphe eden Planck doğru yanıtı bulmak için matematikte ufak bir hile yaptığını düşünüyordu. Sonraki beş yıl boyunca bu detayla çok az ilgilenildi. Enerjinin sürekli mi yoksa ufak patlamalar akışı halinde mi olduğu kimin umurunda ki? Ancak nasıl tek bir küçük hareket bir iskambil kulesini devirebiliyorsa, siz de küçük fakat temel bir varsayımı biraz değiştirerek fizikte devrim yapabilirsiniz. Planck'ın ışıyan küçük enerji patlamalarına günümüzde *foton* denir. Planck'ın hipotezi fiziği o kadar derinden değiştirdi ki,

günümüzde fizikçiler *klasik* kelimesini "kuantum fiziğinden önce" anlamında kullanırlar.

Kuantum fiziğinin temel fikri basittir. Enerji derece derece değil, sadece birleşik demetler –kuantumlar– halinde yaratılır, aktarılır ve yok edilir. Bu tarz değişimler anlık küçük enerji değişimleri şeklinde olmalıdır. Bilişim teknolojisi dilinde sadece belirli değerler alabilen bir miktar *sayısaldır* çünkü sürekli olarak değişebilir yani *analog* miktara kıyasla –0, 1, 2 ... 9'dan oluşan 10 *tamsayıyı* ve bunların bileşimlerini kullanarak– farklı olası değerler sayılabilir.

Kuantumlamanın, enerjinin birbirlerinden boş uzayla ayrılmış, küçük, izole demetler halinde uzayda dağıldığına işaret ettiğine inanmak yaygın bir yanlış kanıdır. Bu doğru değildir. Enerji uzayı düzgünce ve sürekli bir şekilde kaplar, ancak enerji uzayın bir bölgesine eklendiğinde, aktarıldığında veya çıkarıldığında veya bir bölgedeki enerjinin biçimi yani "hali" değiştirildiğinde, bir veya daha fazla tam enerji kuantumu eklenmeli, aktarılmalı, değiştirilmeli veya çıkarılmalıdır ve bu ânında meydana gelmelidir. Enerji analog değil, sayısaldır.

Kuantumların Kırılganlığı ve Ölçüm

Mikro dünyanın kolayca bozulması mantıklı gelir. Bu dünya çok küçük kütleleri olan, çok küçük şeylerden oluşur; o yüzden çok küçük bir dürtme onları kökten değiştirebilir. Bununla ilgili bir fikir edinebilmek için bir demir bloğu bir plastik köpük bloğuyla karşılaştıralım. Çekiçle hafifçe vurmanız demiri pek etkilemez ama köpüğü havaya uçurur. Bir köpük parçası bulup deneyin. Burada deneyimlediğiniz şey, iki cismin nicelik bakımından *kütle* olarak ölçülen ataletleri arasındaki farktır. Bir atom veya başka bir kuantum hassastır, doğru olarak gözlemlemek zordur, çünkü salt gözlem bile onu havaya uçurabilir. Örneğin bir atomu üzerine ışık tuta-

rak gözlemleyebiliriz, ancak ışık fotonlardan oluşur ve her bir fotonun atomla etkileşimi atomu değiştirebilir. Deney bütün bilimlerin merkezinde yer aldığı için, her gözleme tepki olarak oraya buraya sıçrayan cisimleri bilimsel olarak araştırmanın zor olması muhtemeldir. Kuantum dünyasına müdahale eden insanlar porselen dükkânındaki boğalara benzer: Yaptığımız her şey çanak çömleğe zarar verir.

Ölçüm, gözlem ve *tespit* bu kitapta sıkça geçen kelimeler olmalarına rağmen yanıltıcı olabilirler. Bu kelimeler kuantum fiziğinin evren hakkında değil de, basitçe laboratuvar ölçümleri hakkında olduğu gibi yanlış bir izlenim verebilirler. İngilizcedeki standart kullanımında "ölçüm" insanın bir nesneyle ilgili veri toplama sürecidir. Eğer bu kullanımı esas alırsak, o takdirde bir "kuantum ölçümü" insanların bir *kuantum* nesneyle ilgili veri toplama sürecini ifade eder. Tarihsel açıdan terim kuantum fiziğinde yıllarca sadece bu anlamda kullanıldı, ancak bunun çok dar bir tanım olduğu ortaya çıkmıştır. Bu noktada tarihe ayrıntılı olarak girmeden şunu söyleyebiliriz ki, bir *insan* süreci olarak bu "ölçüm" tanımının, insanların evrenin kuantum ilkeleriyle temel bir alakaları olduğu gibi yanlış bir kanıya yol açtığı görülür. En iyisi ölçüm kelimesinden vazgeçip başka bir terim bulmak olabilir fakat bu kelime günümüzde o kadar yaygın biçimde kullanılır ki, ortadan kaldırmak olanaksızdır.

Dolayısıyla en iyi çözüm terimin anlamını genişletmektir. Bir *kuantum ölçümüyle* kastettiğimiz şey, değişime neden olan veya gözlemleyen bir insan olup olmadığına bakılmaksızın, *bir kuantum fenomeninin makroskobik bir değişime yol açtığı herhangi bir süreçtir*. Ölçüm terimi burada uygun olabilir, çünkü böyle bir "ölçümü" *gözlemleyen* herhangi bir insan, makroskobik değişimi gözlemleyerek buna sebep olan kuantum fenomeni hakkında bir şey öğrenebilir.

İşte üç tane ölçüm örneği: Uzaydan gelen bir proton Mars'taki bir kum tanesine çarpıp hareket ettirir, uzak bir süpernovadan gelen yüksek enerjili bir foton Antarktika'daki bir buz tanesini eritir ve bir foton bir Mach-Zehnder interferometresinden geçtiğinde (Şekil 1.1) detektörlerden biri ses çıkarır. Üç durumun üçünde de bir kuantum fenomeni (uzaydan gelen bir proton, uzaydan gelen bir foton, interferometreden geçen bir foton) makroskobik bir değişime (bir kum tanesi hareket eder, bir buz tanesi erir ve bir detektör ses çıkarır) sebep olur. Bir insanın bunları gözlemleyip gözlememesi önemli değildir.

1990'daki zamansız ölümünden sadece birkaç ay önce kaleme aldığı "Ölçüme Karşı" başlıklı bir makalesinde kuantum fizikçisi John Bell ölçüm kelimesinin yasaklanmasını gerektiğini, çünkü bu kelimenin kuantum fiziğinin özel bir şekilde laboratuvarlar ve insanlarla bağlantılı olduğu gibi yanlış bir anlam çağrıştırdığını belirtti. Bell kuantum fiziğinin kütleçekimi yasalarıyla nasıl ilgisi yoksa, insanlarla da bir ilgisi olmadığının farkındaydı. Bu terimi bu kitapta yasaklamasam da, ölçüm terimini ancak burada belirtilen, insanla ilgisi olmayan anlamında kullanıyorum. Umarım Bell bunu onaylardı.

Ölçüm, özellikle de onunla ilgili, "Schrödinger'in kedisi" olarak bilinen problem genellikle paradoksal kabul edilir. Gelgelelim 10. ve 11. bölümlerde ölçümün paradoksal olmadığını, sadece algılanmasının güç olduğunu göreceğiz.

Bilimsel nesnellik kavramımız bilim insanlarının ölçtükleri nesnelerin kalıcılığına bağlıdır. Bilimin "öznel" yani "gözlemciye bağlı" ifadelerinden farklı olarak "nesnel" yani "tüm gözlemciler için aynı" olduğu düşünülür, çünkü çok sayıda bilim insanı belirli bir fenomeni gözlemleyebilir ve gözlemleri özdeş olmasa bile en azından tutarlı olur. Eğer Alice ve Bob büyük, hareketsiz bir taşın kütlesini ölçerlerse, içlerinden biri

hata yapmadığı müddetçe tutarlı sonuçlar elde ederler. Taşın kütlesini biri doğru olarak yaklaşık 2 kg bulurken, diğeri de doğru olarak yaklaşık 5 kg bulmaz. Alice taşta değişiklik yapsa bile Bob'a değişikliği söyleyebilir ve o da bunu göz önüne alabilir.

Ancak kuantumlar hassastır ve bilinmeyen şekillerde kolayca değiştirilirler. Eğer Alice ve daha sonra Bob belirli bir kuantum nesnesini (üzerindeki kuantum etkilerinin göz ardı edilemeyeceği bir nesne) incelerlerse, Alice nasıl olduğunu bilmeden ve hatta bunu yaptığını bile bilmeden nesneyi önemli ölçüde değiştirebilir. Daha sonra Bob'un gözleminin Alice'in gözlemiyle tutarlı olup olmadığını ve hatta aynı nesneyi gözlemleyip gözlemlemediğini bile doğrulaması zor olur. Dolayısıyla ölçümlerin kuantum nesnelerin doğasını belirlemeleri güçtür. Aslına bakarsanız, bilim insanlarının kuantum ölçüm sürecinin nasıl işlediği konusunda bile fikir birliğine varmaları zor olmuştur.

Ancak kuantum ölçümünün bir yönü bilimsel açıdan nesnel bir mutabakata neden olur. Bir kuantum nesne ne zaman makroskobik dünyada bir etki yapsa, bu makroskobik etki herkes tarafından gözlemlenebilir ve üzerinde mutabakata varılabilir. Örneğin bir detektörün duyulabilen sesi veya bir ekran üzerinde görülebilen bir parlama kuantum dünyasının kırılganlığından bağımsız olarak nesnel bir bilimsel olgudur. Bu nedenle mikroskobik dünyayı kavramadaki hareket noktamız kuantumların makroskobik dünyada yaptıkları etkiler ve bu etkileri ispatlayan deneyler olmalıdır. Bu tarz deneyler anlamsız soyutlamaların aksine, kuantum fiziği tartışmalarını fiili olgulara dayandırır. Bu kitapta bu tarz deneylere sıkı sıkıya bağlı kalmaya çalışıyorum.

Kuantumlar boyuta veya kütleye kıyasla daha önemli bir yönden kırılgandır. Hayli bileşiktirler, dolayısıyla bir ko-

numdaki küçük bir etkileşim (küçük bir enerji değiş tokuşu) yayılmış kuantumun tümünü aynı anda ve kökten değiştirebilir. Bir kuantum uzayda yayılmasına rağmen parçalardan oluşmayan tek bir şeydir.[33] Bir kuantumu sadece tek bir yerde değiştiremezsiniz. Kuantuma ne olursa, bu kuantumun bütününe de olur. Bu züccaciye dükkânına giren filin dokunduğu her eşyayı mutlaka ânında kırması gibidir. *Bu tek bir kuantumun birliği kuantum tuhaflığının nihai kaynağıdır.*

Kuantum fiziğinin yeşerdiği tohum Planck'ın enerji kuantumlaması fikriydi. 1930 itibariyle Max Planck, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Niels Bohr, Louis de Broglie ve Paul Dirac gibi bilim insanları bu tohumu sıkı fakat muammalı bir teori halinde geliştirmişlerdi. Bu teori halen kesin tahminlerde bulunmaya ve her deneysel testi geçmeye devam ediyor, ancak gizemli olmaya da devam ediyor ve mantıksal tutarlılık yönünden ve sezgilere aykırı çıkarımları nedeniyle de sıklıkla sorgulanıyor. Kuantum fiziğinin kıdemlileri Newton sonrası âlemin öncüleri olarak bilinmeyen bir diyardaki yabancılardı. Üçüncü bölümde bu öncülerin bilimsel zeminini oluşturan ve kuantumu anlamada hâlâ çok önemli bir arka plan olan Newton fiziğini ele alacağız.

3

Parçacıklar ve Klasik Mekanik

Günümüzde bildiğimiz şekliyle fizik, 17. ve 18. yüzyıllarda Galileo ve Newton'la başladı. Onlar Newton mekaniğini, termodinamiği, elektromanyetizmayı ve ilgili konuları kapsayan *klasik fiziği* yani kuantum öncesi fiziği başlattılar. Bu fizik Demokritos'un çok daha eski olan, maddenin boş uzay boyunca hareket eden zilyonlarca küçük, ayrı, katı, hiç değişmeyen parçacıklardan oluştuğu fikrini kabul eder, ancak 19. yüzyıl itibariyle boş uzay *elektromanyetik alan* adı verilen, yayılmış bir oluşumla dolar. Klasik fiziğin modası hiç geçmez, çünkü tipik makroskobik durumlarda yaklaşık olarak doğrudur. Örneğin köprü ve bina gibi büyük mühendislik yapılarını inşa etmede yaygın olarak kullanılır. Bu ve bundan sonraki bölümü klasik fiziğe ayırdım, çünkü bu arka plan kuantumun daha kolay kavranmasını sağlar.

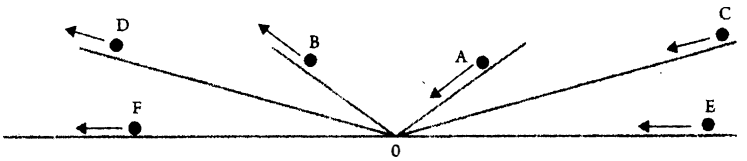
Bu bölümde Newton'un madde, hareket, kuvvet ve kütleçekimi ilkelerini, Newton'dan epey sonra ortaya çıkan enerji ve termodinamik ilkelerini ve kütle ile enerji arasındaki ünlü ilişki dahil, Einstein'ın özel görelilik teorisinin yönlerini ele alacağız. Einstein'ın özel ve genel görelilik teorileri modern fiziğin merkezini oluşturmakla birlikte kuantum bu teorilerde hiç görünmez.

Newton Fiziği

Galileo Galilei (1564-1642) bağımsız ve devrimci bir düşünürdü. Galileo'nun, Aristoteles'in (özellikle Katolik kilisesi tarafından) saygı duyulan antik Yunan fiziğine dair alaycı eleştirileri ve dünya merkezli görüşe karşı güneş merkezli Kopernik astronomisini desteklemesi papayla büyük sorun yaşamasına sebep oldu. Bilim sadece kanıt ve mantığı kabul ettiği için sık sık geleneksel eğilimle ters düşer. Bilim sonuçlara ulaşmak için otoriteyi yeterli neden olarak kabul etmez. Öyleyse dikkat edin: Bilim inançlarınız için tehlikeli olabilir. Ve Galileo'nun farkına vardığı gibi, bu da sağlığınız için tehlikeli olabilir, özellikle yoğun mantık dışı inançların geçerli olduğu bir zamanda ve yerde yaşıyorsanız.

Galileo modern deneysel bilimi icat etti. Genel olarak gözlem veya deneyim olarak anlaşılan deney bilimi devrimsel kılan şeydir. Galileo yeni ilke araştırmalarında sistematik olarak deney yapan ilk bilim insanıydı. "Dene ve gör." Bu basit bir kuraldır ve bilimin özüdür.

Galileo bir dizi deney yaptı. Bu deneylerde bir top düz yüzeylerde veya düzgün, muntazam eğimli yüzeylerden aşağı yuvarlanıyordu. Bu deneyler sayesinde Galileo sürtünmenin ve hava direncinin önemini fark etti. Şu soruyu sordu: Eğer hiç sürtünme ve hava direnci olmasaydı düz bir yüzeyde yuvarlanan bir topa ne olurdu? Galileo her ne kadar böyle mükemmel koşulları elde edemese de, yanıtı sağlayan bir deney keşfetti. Küre biçiminde bir topu düzgün, muntazam bir eğimli yüzeyden aşağı ve sonra eşit derecede eğimli ikinci bir yüzeyden yukarı yuvarladı (resim 3.1). Topun aşağı ne kadar yuvarlanırsa yukarı doğru da yaklaşık olarak aynı mesafede yuvarlandığını ve eğer sürtünme ve hava direnci olmasaydı bu iki mesafenin tamı tamına eşit olacağını fark etti. Dolayısıyla sürtünme ve hava direnci mevcut olmadığında yokuş aşağı ve yokuş yukarı hareketler tam olarak simetrikti. Bu si-



Şekil 3.1 Galileo'nun eğimli bir yüzey üzerinde, bir topla yaptığı deney. Hiç sürtünme ve hava direncinin olmadığı ve top yön değiştirdiğinde hız kaybı yaşanmadığı varsayımıyla, A eğimli yüzeyinin tepesinden bırakılan bir top, aşağı yuvarlandığı aynı hızla, aynı uzunluğa ve eğime sahip B yüzeyini çıkacaktır. C eğimli yüzeyinin tepesinden bırakılan bir top C'den aşağı yuvarlandığı aynı hız ve mesafede eşit eğimli D yüzeyini çıkacaktır. Giderek daha uzun eğimli yüzeyleri dikkate aldıkça, E ve F'de gösterilen duruma yaklaşırız, burada "eğimli yüzey" artık eğimli değildir ve top bir kez başladığında değişmeyen bir hızda sonsuza dek hareket etmelidir.

metri sayesinde Galileo Şekil 3.1'in altındaki yazıda da açıklandığı gibi, hiç eğimsiz, düz bir yüzeydeki hareketini tahmin etti. Bir top hava direnci veya sürtünmenin olmadığı düz bir hatta hareket etmeye başladığında, hızlanmadan veya yavaşlamadan hareket etmeye devam etmesi gerekirdi. Top düz bir çizgide, sonsuza dek değişmeyen bir hızda hareket ederdi![1]

Şekil 3.1'de de gösterildiği gibi, C eğimli yüzeyinin tepesinden bırakılan bir top D eğimli yüzeyine C'den yuvarlandığı hızda ve mesafede çıktı. Giderek daha uzun eğimli yüzeyleri göz önüne aldıkça[2] E ve F'de gösterilen duruma yaklaşırız; burada "eğimli yüzey" artık eğimli değildir ve topun bir kez başladıktan sonra değişmeyen bir hızda, sonsuza dek hareket etmesi gerekir.

Bir nesnenin kendisini durduracak bir şey olmadığı müddetçe hareket etmeye devam edeceği görüşü zamanın diğer entelektüellerinin de paylaştıkları bir görüştü. Bu Aristoteles fiziğine oldukça zıttı. Aristoteles fiziğine göre yatay olarak hareket eden ağır nesnelerin doğal olarak yavaşlayıp durmaları gerekir. Galileo'nun deneyleri meseleye açıklık getirse de, Rene Descartes ve Thomas Hobbes

gibi düşünürler de günümüzde *atalet yasası* veya daha sıkıcı bir biçimde (ayrıca Newton keşfetmemesine rağmen) Newton'un birinci yasası olarak bilinen bu ilkeyi formülleştirdiler.

Bilimsel sürece dair bir arasöz: *Yasa* kötü bir kelime seçimidir. Sinir bozucu bir alışkanlık olan bilimsel ilkelere "yasa" deme alışkanlığı 16. ve 17. yüzyıllarda ortaya çıktı ve 19. yüzyıl boyunca devam etti. Bu kelime fazla katıdır. Bilim fikirleri *ilke* veya *teoridir*, eğer oldukça belirsizse *hipotezdir*. *Yasa* değiştirilemez bir fikri çağrıştırır gibidir. Bilimsel fikirler kesinlikle değiştirilemez değildir. Ancak deneyim ve akılcı düşünce ile doğrulandıkları ölçüde doğrudurlar ve daima yeni deneylerle çürütülme riski taşırlar. Ancak hiç kimse "Newton ilkeleri" şeklinde ifade etmediği için çoğunluğa uyacak ve bu bölümde *yasa* kelimesine bağlı kalacağım.

Atalet yasası derin bir kavrayıştı. Galileo'nun zamanında bu kavramı tasavvur etmenin zorluğunu günümüzde takdir etmek güçtür. Eğitimli bir insan şöyle tepki verirdi: "Ne? Düz bir çizgide durmadan hareket mi ediyor? Kendi başına? Bu olanaksız! Hareketine devam etmesini sağlayan nedir?"

Ayrıca insanlar kütleçekiminin olmamasını da düşünemezlerdi. Düşen cisimlerin bütün dış etkilerden muaf oldukları ve düşmelerinin nedeninin içsel bir doğal eğilim, dünyanın merkezini arama "arzusu" olduğu düşünülürdü. Bu Aristo fiziğiydi ve insanlara doğru geliyordu. Yerçekimini dünyanın her cisim üzerinde uyguladığı bir dış etki olarak anlamak için bir Newton geriyordu. Newton'dan sonra insanlar yerçekimini içsel bir eğilim yerine dışsal bir etki –kişinin dünyadan yeterince uzağa gittiğinde kaçabileceği bir etki– olarak görmeye başladılar. Dolayısıyla Newton'a göre yeterince uzak bir cisim dünyaya doğru düşmez, değişmeyen bir hızda, düz bir çizgide hareket etmeye devam ederdi.

Atalet yasası Newton fiziğinin ve 17. ve 18. yüzyıllarda-

ki ortaçağ sonrası aydınlanmanın bir kilit noktasıdır. Bu yasa 16. yüzyıldaki güneş merkezli gezegenler hareketi teorisinin mucidi Kopernik'in ölümünden epey sonra ortaya çıksa da, onun dünyanın hareketsiz bir şekilde her şeyin merkezinde bulunmak yerine güneşin etrafındaki bir yörüngede hareket ettiği fikrine çok önemli destek sağladı. Aristoteles olsa buna şu soruyla karşı çıkardı: "Dünyanın dönmeye devam etmesini sağlayan nedir?" Yeni Newtoncular buna şu şekilde yanıt verirdi: "Dünya dönmeye devam eder, çünkü bu onun doğal eğilimidir." Başka bir deyişle, atalet yasası nedeniyle...

20. yüzyıl bilim tarihçisi Herbert Butterfield'ın yorumu ise şöyledir:

> Son 1.500 yılda insan aklının karşı karşıya gelip de yendiği bütün entelektüel engeller arasında bence nitelik yönünden en şaşırtıcı ve sonuçları kapsamında en müthiş olanı hareket problemiyle ilgili olan ve okula giden her çocuğun adının atalet yasası olduğunu öğrendiği yasadır.[3]

Bu yukarıdaki öyküde alınması gereken bir ders vardır. Galileo atalet yasasını ileri sürdüğünde bu inanılmaz görünüyordu ve bir yüzyıl önce Kopernik tam olarak idrak etmeden güneş merkezli astronomisinde bunu ileri sürdüğünde daha da inanılmaz görünüyordu. Bu sezgilere oldukça aykırıdır. Şunu bir düşünün: Nasıl olur da devasa gezegenimiz kendisini itecek bir şey olmadan hareket etmeye devam edebilir? Kuantum fiziği nasıl tuhaf fakat doğruysa, bu da tuhaf fakat doğrudur. Kuantum sezgilere o kadar aykırı görünür ki, bazı bilim insanları aslında kuantum fiziğinin sadece yararlı bir matematiksel kurgu olduğuna inanmayı tercih ederler. Ancak

devrimci biyolog J. B. S. Haldane şöyle demiştir: "Ben evrenin sadece farz ettiğimizden değil, *farz edebileceğimizden* de acayip olduğundan şüpheleniyorum."[4] Atalet yasasından alınacak ders tuhaf şeylerin doğru çıkabileceğidir. İleride göreceğimiz gibi, sezgilere aykırı tüm kuantum fenomenleri mantıksal olarak tutarlıdır ve deneysel kanıtlarla iyi bir şekilde desteklenir. Görünürdeki tuhaflıkları fiziksel gerçekliklerinden şüphe etmek için bir neden değildir.

Isaac Newton (1642-1727, Galileo'nun öldüğü sene doğdu) atalet yasasını aldı ve geliştirdi. Dış etkiler olmadığında cisimlerin düz bir çizgide, değişmeyen bir hızda hareket ettikleri sonucuna vardığınızda, bir cismin hareket hızında ve yönünde değişiklikler meydana gelmesinden onun üzerinde dış etkiler olduğu anlaşılır. Fizikçiler bu tarz değişimlere *ivme* adını verir. Bu normalde sadece hızdaki artışları ifade eden kelimenin yaygın kullanımının genişletilmesidir. Fizikçiler yavaşlamayı ve dönmeyi de (hareketin yönünün değişmesi) ivme olarak dahil ederler, çünkü bunlara da dış etkiler veya onların tabiriyle dış *kuvvetler* neden olur. Newton herhangi bir cismin üzerindeki dış kuvvetlerle o cismin ivmesi arasında bağlantı kuran, matematiksel olarak kesin bir ikinci yasa ile, iki cismin birbirleri üzerinde uyguladıkları kuvvetlerin daima eşit büyüklükte ve zıt yönde olduğunu bildiren üçüncü bir yasayı formülleştirdi. Newton yasalarının sayısız şahane çıkarımlarını sunmayı, bilim dışı dallarda okuyan üniversite öğrencileri için matematiksel olmayan ders kitabım dahil,[5] diğer kitaplara bırakıyorum.

Newton'un keşfettiği en ünlü yasa olan *kütleçekimi yasasının* cebirsel formülüne göre, kütlesi olan iki cisim birbirlerini kütleçekimi kuvvetiyle çekmelidir ve bu kütleçekimi kuvvetinin gücü cisimlerin kütlesi büyüdükçe artar, cisimler birbirlerinden uzaklaştıkça azalır. Bu tarihte çığır açan bir buluştu, çünkü bir kütleçekimi kuvveti *olduğunu* sadece kabul

etmenin yanında, bu kütleçekimi kavramını sadece dünyada meydana gelen bir şeyden evrendeki her yerde meydana gelen bir şeye dönüştürdü. Uzaktaki yıldızların hepsi birbirleri üzerinde kütleçekimi kuvveti uygular. Elmalar dünyaya düşer çünkü dünyanın yerçekimi onları aşağı doğru çeker; bu, düşmeyi incelemenin yeni bir şeklidir. Kütleçekimi gezegenleri, güneş sistemini, yıldızları ve galaksileri bir arada tutar. Gelgit ay ve güneşin dünya üzerinde uyguladığı kütleçekimi kuvveti nedeniyle meydana gelir. Kütleçekimi yasası gökbilimsel cisimlerin uzayda bir bakıma düştüğü anlamına gelir. Ay üzerinde etkili olan tek kuvvet kütleçekimi olduğu için ay düşmektedir, ancak aşağı doğru değil. Ayın çok uzun zaman önce, dünya ve ay oluştuğunda başlayan yörünge hareketi onun aşağı doğru değil, dünya *etrafında* düşmesine yol açar. Aynı şekilde dünya ve diğer gezegenler de güneşin etrafında düşerken onun kütleçekimi kuvvetiyle eliptik yörüngelerinde kalırlar. Fransız şair ve filozof Paul Valery'nin de belirttiği gibi, "Herkes ayın düşmediğini görürken, ayın düştüğünü görmek için Newton olmak gerekir."[6]

Birdenbire her şey yerli yerine oturdu. Usta bir matematikçi olan Newton kütleçekimi ve hareket yasalarının mantıksal sonuçları olarak gezegenlerin güneş etrafında eliptik yörüngelerde hareket etmeleri gerektiğini gösterdi. Benzer bir akıl yürütme bütün gezegenlerin ve ayların hareketlerinin yanı sıra o sıralar bilinen hareketlerin çoğunu da açıklıyordu. Newton yasaları sadece dünya üzerinde değil, farklı kuralların geçerli olduğunun düşünüldüğü gök kubbede de geçerliydi. Bu birçok düşünüre yeni fikirler verdi.

Bu öncüler ortaçağ sonrası bilim çağımızı başlattı. Newton fiziği bütün evrende akılcı bir tutarlılık olduğunu gösterdi ve 17. ve 18. yüzyıldaki aydınlanma çağına ilham verdi. Bu, bilimsel düşünceye, geleneksel görüşten şüphe etmeye, batıl

inancı reddetmeye ve hoşgörüsüzlüğe karşı çıkmaya değer veren ve sıklıkla Katolik kilisesine meydan okuyan felsefi bir gelişmeydi.

Newton fiziği 250 yıl hüküm sürdü. İlk problemleri 19. yüzyılın sonlarına dek ortaya çıkmadı; görmüş olduğumuz gibi, bunlar ısıtılmış cisimlerden yayılan EM ışımayla ilgili güçlüklerdi ve Planck tarafından 1900'de çözüldü. Fizikçiler ayrıca hareketle ilgili problemlerle de karşılaştılar ki, bunlar da nihayet 1905'te Einstein'ın özel görelilik teorisiyle çözüldü. 1900'dan 1930'a kadar, Einstein'ın görelilik teorisiyle birlikte kuantum fiziği evrenin işleyişine dair en temel bilgilerimiz olarak büyük ölçüde klasik fiziğin yerine geçti. Ancak klasik fizik hiçbir şekilde gözden çıkarılmadı. (Bizim için) "normal" durumlarda –atomlardan çok daha büyük boyutlar, ışık hızından çok daha yavaş hızlar, bir kara deliğin yakınındaki kuvvetlerden çok daha küçük kütleçekimi kuvvetleri ve bir galaksiden çok daha küçük mesafelerde– yararlı bir yaklaşım olarak varlığını sürdürüyor. Aslına bakarsanız, atalet yasası, enerjinin korunumu ve termodinamiğin ikinci yasası (daha sonra tanımlanacak) gibi bazı genel klasik ilkeler evrensel olarak oldukça geçerlidir.

Saat Gibi Bir Evren

Demokritos'un atomos ve boşluk hakkındaki açıklamasına benzer bir görüşe sahip olan Newton şöyle diyordu:

> Bana şu makul geliyor: Tanrı başlangıçta maddeyi katı, tek parça halinde, sert, nüfuz edilemez ve hareketli parçacıklar halinde yarattı ... ve bu katı haldeki ilk parçacıklar bunlardan oluşan gözenekli cisimlerle kıyaslanamayacak kadar sert; o kadar sert ki asla aşınamaz ya da parçalanamaz.[7]

Newton'a göre "parçacık" birbirlerinden boş uzayla ayrılan küçük cisimler demekti.

Newton fiziğinin makine benzeri bir niteliği vardır. Bir klasik fizikçiye göre fiziksel bir *sistem* (bu kelime otomobil, bilardo topu kümesi, elektron, molekül, dünya veya güneş sistemi gibi evrenin belirli bir bölümü anlamına gelir) sonlu sayıda parçacıktan oluşur ve her bir parçacık üç boyutlu uzayda belirli fakat muhtemelen değişmekte olan bir konumda bulunur. Her bir parçacık üzerinde belki aynı sistemdeki başka parçacıklar tarafından veya sistemin dışından uygulanan bazı belirli kuvvetler etkili olur. Bu takdirde oyun Newton fiziğinin ilkelerini kullanarak sistemin parçacıklarının hareketlerini ve buradan hareketle de onun davranışlarını analiz ve tahmin etmektir. Newton yasaları her bir parçacık için geçerlidir, bu da başka parçacıkların ve ayrıca "çevrenin" –yani sistemin dışındaki evrenin– uyguladığı kuvvetleri her bir parçacığın ivmesine bağlayan bir denklem ağına götürür. Bu denklemleri çözmek parçacıkların daha önceki bir zamandaki konumlarının (ve görünen o ki süratlerinin) bilgisine dayanarak daha sonraki bir zamandaki konumlarını tahmin etmeyi sağlar. Bu analizde kesin nedenler (kuvvetler) kesin sonuçlar (hareketler) meydana getirmek için tam olarak belirli cisimler (parçacıklar) üzerinde etki eder. Her şey iyi yağlanmış bir makine veya mükemmel çalışan bir saat gibi kesin ve tahmin edilebilirdir.

İki cisimli kütleçekimi problemi basit fakat önemli bir örnektir. Uzaydaki kapsamları göz ardı edilebilecek kadar küçük olan, iki cisimli bir sistem hayal edebiliriz. İki cisim arasında etkili olduğu varsayılan tek kuvvet kütleçekimidir. Bir başlangıç zamanında iki cisim belirli konumlarda, belirli yönlerde, belirli hızlarda hareket ediyordur. Bu güneş-dünya sisteminin modelidir; burada diğer gezegenlerin ve ay-

ların kütleçekimi etkileriyle güneşin ve dünyanın uzaydaki kapsamları (çünkü aralarındaki mesafeye kıyasla bu cisimler küçüktür) ve güneş ışıması gibi kütleçekimi dışındaki etkiler göz ardı edilir. Bugün üniversitede fizik okuyan her öğrencinin hesaplayabileceği gibi, Newton genel çözümü buldu (Newton yüksek matematiği icat ettiği için bunun çözümü daha kolaydır).[8] Cisimlerden biri ilk başta diğerinin kütleçekimi kuvvetinden zamanla kaçabilecek kadar hızlı hareket etmediği müddetçe iki cisim de eliptik şekilli yörüngelerde (yollarda) hareket eder. Güneş dünyadan çok daha büyük olduğu için, onun elipsinin dünyanınkinden çok daha küçük olması gerektiği ortaya çıkar. O zamanlar dünyanın güneş etrafındaki hareketi hakkındaki bilinenlere uygun olarak, dünya güneşin etrafında yaklaşık olarak elips şeklinde bir yörüngede dönerken güneş hareketsiz durur.

Bir saat benzer şekilde öngörülebilir bir biçimde çalışır ve aslında kütleçekimi kuvveti, ağırlıkla çalışan, sarkaçla ayarlanan duvar saatini hem çalıştıran hem de ayarlayan etkidir. Öngörülebilirlik saatin özüdür. Bir duvar saatini akrep ve yelkovanları ayarlayıp ağırlıkları yukarı çekerek çalıştırırsınız ve saat ağırlıklar inene kadar kendi kendine çalışır. Eğitimli insanların çoğu 250 yıl boyunca evrenin Newton fiziğine göre işlediğine inandı. Evren saatten daha karmaşık olsa da, klasik fiziğe riayet eden küçük parçacıklardan oluşan bir evren saat gibi kendi kendine çalışırdı. Böyle bir evrende benzer nedenler benzer sonuçlar üretir.

Bir duvar saati gibi, mekanik evren de kendi geleceğini hazırlar. Sizin veya benim yapabileceğim hiçbir şey onu az da olsa değiştiremez, çünkü vücutlarımız evrenin parçası olan parçacıklardan oluşur ve her parçacığın bütün geleceği doğa yasaları tarafından uzun zaman önce belirlenmiştir. Fransız matematikçi ve astronom Pierre-Simon Laplace 1814'te bunu şu şekilde açıkladı:

> Evrenin şu anki halini geçmişinin sonucu ve geleceğinin sebebi olarak görebiliriz. Belirli bir anda doğayı harekete geçiren bütün kuvvetleri ve doğanın oluştuğu bütün maddelerin bütün konumlarını bilen bir zihin, eğer aynı zamanda bu verileri analiz edebilecek kadar muazzamsa, evrenin en büyük cisimlerinin ve en küçük atomun hareketlerini tek bir formülde ele geçirirdi; çünkü böyle bir zihin için hiçbir şey belirsiz olmazdı ve gelecek tıpkı geçmiş gibi gözlerinin önünde mevcut olurdu.[9]

Newton fiziğinin öngörülebilirliği özgür irade problemi gibi felsefi zorluklar sunar. Ne yapacağımıza kendimizin karar verdiğini düşünmeyi tercih ederiz fakat her bireyin beyni dahil her şey klasik fiziğe uyan parçacıklardan oluşuyorsa, burnumuzu kaşımaya veya bir senfoni bestelemeye karar verecek özgürlüğe sahip değiliz demektir. Newton fiziğine dayanan evren bizim yerimize karar verir. Ve eğer Fyodor Dostoyevski'nin *Yeraltından Notlar* adlı eserindeki Yeraltı Adamı gibi kafamızı taş bir duvara vurarak kendimizi göstermeye karar verirsek, bu sözümona kendini göstermeye karar veren de gerçekte evrendir.

René Descartes ve diğerleri özgür irade problemine karşılıklı etkileşim halindeki iki gerçekliğin olduğu, düalistik bir felsefeyle karşılık verdiler: Klasik fizik tarafından tanımlanan nesnel bir temel gerçeklik ile düşünce ve hislerimizin ikincil derecedeki öznel gerçekliği. Dolayısıyla determinizm asıl gerçeklik, özgür irade de yalnızca ikincil bir gerçeklikti.

Günümüzde hem klasik fiziği hem de onun felsefi çıkarımlarını sorgulamamızı gerektiren nedenler vardır. Kuantum fiziği büyük bir nedendir. Klasik fiziğin sınırlı bir aralıkta ancak yaklaşık olarak doğru olduğu bilinir ve özgür iradeye

ilişkin sonuçlara olanak vermeyecek kadar sınırlıdır. Kuantum fiziği benzer nedenlerin benzer sonuçlara neden olduğu ve tartışmalı bir tür özgür iradeye yer verdiği fikriyle çelişen temel rastgeleliğe işaret eder (6. Bölüm). Ayrıca tipik olarak "dolanık" olan, uzayı kaplayan kuantumlara işaret eder ki, bunların davranışları makine benzeri ayrı parçacıklardan oluşan bir evrenle çelişir (9. Bölüm).

Klasik evrenin aksine, kuantum evreni hiçbir şekilde mekanik değildir. Klasik dünya görüşünün üç temel özelliğinden ilki atomculuktur: Newton'un belirttiği gibi, "asla aşınmayan veya parçalanmayan, katı, tek parça halinde, sert, nüfuz edilemeyen parçacıklar" temel gerçekliği oluşturur. İkincisi öngörülebilirliktir: Bir kez başladığında, her şey tam olarak gelişmiş olduğu gibi gelişmek zorundaydı. Üçüncüsü parçalar halinde analiz edilebilirliktir: Evreni onu oluşturan öğelerin hareketlerini kavrayarak anlayabiliriz. Kuantum fiziği bu mekanik ilkelerin her birini tartışmaya açar. Öncelikle, kuantum evreni şekillendirilemez kalıcı parçacıklardan değil, salt gözlemlenmeleri dahi onları kökünden değiştirebilecek, geçici ve oldukça şekillendirilebilir kuantumlardan oluşur. İkincisi, benzer nedenler artık benzer sonuçlara yol açmaz. Şimdiki durum hakkında ne kadar çok şey bilirsek bilelim, radyoaktif bozunma veya kimyasal reaksiyonlar gibi gelecekteki olaylar prensipte bile tahmin edilemez. Üçüncüsü, analitik süreç bir olguyu değiştirmeden bileşenlerine ayırmanın olası olduğunu varsayar, ancak kuantum yerbilmezliği bu görüşe karşı çıkar: Birçok kuantum sistemi dolanıktır; öyle ki, ne kadar uzak olurlarsa olsunlar onları bağımsız nesneler olarak düşünmek olası değildir.

Klasik mekanik fiziğin aksamasına rağmen, bu kitapta aydınlanma çağının daha genel ilkelerinin kuantum çağında da varlıklarını sürdürdüklerine sizi ikna etmeyi umut ediyorum.

Yeni kuralların tamamen mekanik olmamalarına ve evrenin hiç de bir saat gibi olmamasına rağmen, kuantum evreni yine de kesin, akılcı, tutarlı kurallara göre işler.

Bir kuantum dünya görüşü var mı? İnsanlar dünya görüşlerini çoğunlukla düşünmeden, kültürel havanın bir parçası olarak edinirler. Mekanik Newtoncu dünya görüşü kuşkusuz bugün bile etkisini sürdürüyor, hatta (aslında özellikle) Isaac Newton'u hiç duymamış olanlar arasında ve hatta bu dünya görüşünün temel ilkeleri günümüzde şüphe götürür olsa bile. Klasik fiziğin saat mekanizması metaforu gibi kuantum gerçekliği temsil edecek yeni bir büyük metafor henüz ortaya çıkmamıştır.

Dört Temel Kuvvet

Etrafınıza baktığınızda, çeşitli nesneler üzerinde etkili olan birçok kuvvetten –itme ve çekme– bazılarını fark edebilirsiniz: Marie bir fincanı kaldırır, bir yaprak hafif rüzgârda titrer, bir elma yere düşer, bir uçak havaya kalkar, bir biftek bir yaylı kantara konur. Şaşırtıcı bir şekilde, bu tarz bütün genel kuvvetlerin izi sadece iki kuvvete kadar sürülebilir: kütleçekimi ve elektromanyetizma.

Kantara baskı yapan biftek tipik bir "temas kuvvetidir"; ancak mikroskobik seviyede temas tam olarak nedir? Atomların dış halkalarında elektronlar bulunur. Elektronlar birbirleri üzerinde itici elektrik kuvvetleri uygular ki, bu kuvvetler elektronlar arasındaki mesafe azaldıkça artar. İki atom birbirlerine yaklaştıkça elektron halkaları birbirlerini itmeye başlar. Biftek terazinin metal yüzeyini aşağı doğru bastırır, ta ki terazinin yüzey atomları ile bifteğin yüzey atomları arasındaki bu itme kuvveti bifteğin ağırlığını (dünyanın bifteği aşağı doğru çeken yerçekimi kuvveti) taşıyacak (karşılayacak) kadar güçlenene dek. Bu noktada bastırma durur, iki yüzeydeki elekt-

ron halkaları bozulur, biftek terazinin üzerinde hareketsiz hale gelir ve biftek üzerindeki toplam yani net kuvvet sıfırdır, çünkü terazinin bifteğin üzerine uyguladığı yukarı doğru temas kuvveti bifteğin üzerindeki aşağı doğru yerçekimi kuvvetini dengeler. Bu şekilde bütün temas kuvvetlerinin izi atomlar arasında etkili olan EM kuvvetlere dek sürülebilir.

Marie'nin parmakları fincanın üzerine temas kuvvetleri uygular. Hava molekülleri titreyen yaprağa çarptıklarında temas kuvvetleri uygular. Uçağın kanadının şekli nedeniyle, hava moleküllerinin hareket eden uçağın kanadının üstüne kıyasla altına daha güçlü çarpması uçağın üzerindeki yerçekimi kuvvetini dengeleyen kaldırmayı sağlar. Elmaların düşmesi ise farklıdır ve işte bu yüzden bu mesele Newton'un bu kadar çok ilgisini çekiyordu. Düşen bir elma üzerinde hiçbir temas kuvveti etkili değildir, dolayısıyla aşağı doğru çeken yerçekimi kuvvetini dengeleyecek bir şey yoktur ve işte bu yüzden elma düşer.

Bütün alelade kuvvetler ya EM ya da kütleçekimi kuvvetlerine indirgenebilir. 19. yüzyıldaki fizikçilerin daha temel kuvvetlere indirgenebilir olmayan diğer *temel kuvvetler* hakkında bilgileri yoktu. Einstein'ın 1916'da devrim niteliğindeki genel görelilik teorisini yayımlamasından sonra o ve diğer bilim insanları bu teorinin elektromanyetizmayla birleştirilmesini araştırdılar. Genel görelilik teorisi temelde bir kütleçekimi teorisi olduğu için, böyle bir birleştirme o dönemde bilinen bütün kuvvetleri tek bir evrensel kuvvete indirgerdi.

Kuantum fiziği 1916'da karmakarışık bir durumdaydı ve Einstein tümüyle kuantum dışı bir çerçevede çalışıyordu. Einstein 1955'teki ölümüne dek birleşik alan teorisini bulmaya çalıştıysa da bunu başaramadı. Onun temel kuvvetleri birleştirme rüyası günümüzde hâlâ canlıdır, ancak günümüz araştırmaları klasik değil, tümüyle kuantum çerçeve içinde

yer alır. Kuvvetlerin kuantum birleşmesinin önünde devasa bir engel vardır: Kabul edilebilir bir kuantum kütleçekimi teorisi yoktur. Böyle bir teori bulmak birçok parlak dimağa ilham veren muazzam bir meydan okumadır. Amaç elektromanyetizmayı ve diğer bütün kuvvetleri bünyesinde barındıran, genelleştirilmiş bir kütleçekimi kuvvetidir. Bu programların en tanınmışı olan sicim teorisi Brian Greene'in *Evrenin Zarafeti* adlı eserinde çok iyi bir şekilde tanımlanmıştır.[10]

Şimdi bilimin kütleçekimine veya elektromanyetizmaya indirgenemeyen iki kuvveti keşfetmesinin öyküsüne geçelim. Bu öykü 1896'da Fransız fizikçi Henri Becquerel'in bir çekmeceye hafta sonu kalacak şekilde belli bir miktar uranyum bileşiğini bırakmasıyla başladı. Aynı çekmecede tesadüfen kullanılmamış bir fotoğraf plakası da yer alıyordu. Becquerel ertesi hafta laboratuvarına döndüğünde, filmin karanlık çekmecede olmasına rağmen ışığa maruz kaldığını görünce şaşırdı. Fotoğraf filminin yanına uranyumun yerleştirilmesiyle de aynı sonucun tekrarlanabildiğini gördü. Görünen o ki, uranyum şimdi *radyoaktivite* olarak bildiğimiz bir süreçte görünmez ışınlar yaymıştı. Becquerel'in uranyuma çeşitli kimyasal işlemler uygulamasına rağmen sonucun değişmemesi, radyoaktivitenin kimyayla ve her bir atomun etrafındaki elektron halkalarıyla az bir ilgisi olduğuna işaret ediyordu. Bu bilimin çekirdekle ilk temasıydı.

Günümüzde kütleçekimi ve elektromanyetizma dışında iki temel kuvvet daha tanırız. *Güçlü kuvvet* ve *zayıf kuvvet* olarak adlandırılan bu iki kuvvetin ikisi de yalnızca kısa, çekirdek altı mesafelerde etkili olur ve ikisi de çekirdek içinde önemli roller oynar. *Güçlü kuvvet nükleonları* (çekirdekteki proton ve nötronları) birbirine bağlar. Çekirdeğin proton ve nötronlar-

dan oluşması böyle bir kuvvet gerektirir. Ne de olsa protonlar birbirlerini elektriksel olarak iter ve nötronlar elektrik yükü taşımaz, dolayısıyla tek başına etkili olan EM kuvvet birden fazla protonu olan bir çekirdeği ânında parçalardı. Bir çeşit yapıştırıcı olmalıdır. Kütleçekimi bu tarz bir bağlayıcı kuvvettir, fakat çekirdekteki protonlar arasındaki etkisi elektrik kuvvetinden trilyonlarca kat zayıftır. Eğer elektromanyetizma ve kütleçekimi doğanın yegâne temel kuvvetleri olsalardı evren sıkıcı bir yer olurdu. Sadece hidrojen atomları mevcut olurdu. Dondurma filan olmazdı.

Güçlü kuvvet nükleonları oluşturan temel kuantumlar olan kuarklar arasındaki bir etkileşimdir. Bu kuvvet her bir nükleonun üç kuarkını birbirine bağlar fakat bir nükleonun sadece içinde etki etmez. Bir kısmı nükleondan dışarı sızan güçlü kuvvet komşu nükleonları birbirine bağlayarak gereken nükleer yapıştırıcıyı sağlar. Güçlü kuvvet nükleonları sadece en yakın komşularıyla bağlayacak uzaklığa erişir. Bu da daha büyük çekirdeklerin sadece gevşek bir şekilde bir arada tutuldukları anlamına gelir, çünkü EM kuvvet oldukça uzun erimlidir ve bir protonun çok ötesine ulaşarak aynı çekirdek içindeki diğer tüm protonları ittiği halde güçlü kuvvet sadece yakın komşuları bağlar. Dolayısıyla çekirdeklerin boyutu büyüdükçe uzun erimli itmenin kısa erimli çekmeyi aştığı ve çekirdeğin parçalara ayrıldığı bir nokta olmalıdır. İşte bu yüzden çekirdekler bir ev büyüklüğüne ulaşamaz.[11]

En büyük kararlı çekirdek 82 protonu olan kurşuna aittir. *Atom numarası* (proton sayısı) 82'den büyük olan her çekirdek kararsız yani *radyoaktiftir*; zamanla kendiliğinden parçalara ayrılır yani *bozunur*.[12] Atom numarası 82 veya daha az olan birçok çekirdek de proton ve nötron sayısı arasındaki dengeye bağlı olarak kararsızdır. Nötronlar EM kuvvetle karşılıklı olarak itilmeden güçlü kuvvetle karşılıklı olarak bağlanır ve

bu yüzden saf nükleer yapıştırıcı gibi davranırlar. İşte bu nedenle nötron yıldızları olduğu halde proton yıldızları yoktur.

Becquerel'in laboratuvarına dönersek, bu esnada çekmecede çekirdeğinde 92 proton bulunan uranyum kararsızdı. Bir uranyum çekirdeği güçlü kuvvetle birbirlerine bağlanmış iki proton ve iki nötrondan oluşan bir alfa kuantumu (çoğunlukla *alfa parçacığı* denir fakat ben "kuantumla" devam ediyorum) yayarak kendiliğinden bozunur. Bir alfa kuantumu bir çekirdekten ayrılırken geride kalan protonlardan muazzam bir elektriksel itme alır. Bu da alfa kuantumunu, çarptığı molekülleri –Becquerel'in çekmecesindeki fotoğraf plakasını kaplayan moleküller gibi– kökten değiştirmeye yetecek kadar büyük bir enerjiyle çekirdekten savurur.

Alfa bozunumu radyoaktivitenin en önemli iki formundan biridir. Görmüş olduğumuz üzere, bu kısa erimli güçlü nükleer kuvvetler ile uzun erimli EM kuvvetler arasındaki karşılıklı etkileşim yönünden anlaşılabilir. Radyoaktivitenin diğer bir önemli formu olan *beta bozunumunun* anlaşılması daha güçtür. Bu atomaltı ikinci temel kuvvet olan *zayıf kuvvete* kanıt sağlar. Sıradan maddede bu kuvvet ağırlıklı olarak tekil nükleonlar içinde etki eder.

Zayıf kuvvet serbest nötronların –çekirdek dışındaki nötronlar– kararsız olmalarına sebep olur. Bu şu şekilde meydana gelir. Her bir nötron iki kuark çeşidinden oluşur: Bir *yukarı kuark* ile iki *aşağı kuark*. Serbest bir nötronda aşağı kuarklardan birinin kendiliğinden bir yukarı kuarka dönüşme olasılığı vardır; bu durumda nötron protona (iki yukarı ve bir aşağı kuarktan oluşur) dönüşürken bu süreçte bir elektron oluşur. Bu dönüşüme mikroskobik seviyede etkili olan bir kuvvet neden olur, fakat bu ne EM kuvvet ne de güçlü kuvvettir. Fizikçiler buna *zayıf kuvvet* der. Elektronun yüksek enerjiyle yaratılması onun nötrondan ışık hızının %5'ine eşit bir hızla

ayrılmasına yol açar. Serbest nötronların bu şekilde kendiliklerinden protonlara dönüşmeleri yüzünden çok az serbest nötron vardır. Serbest protonlar günümüze dek bir şeylere dönüştüklerine dair hiçbir belirti göstermeden evren boyunca rahatça dolaştıkları halde, serbest nötronlar doğaları gereği kararsızdır. Tipik bir serbest nötron yaklaşık 15 dakikada kendiliğinden bir protona dönüşür, ancak kuantum belirsizlikleri bu zamanı bir nötrondan diğerine oldukça değişken kılar. Aslında diğer elektronlar gibi olmasına rağmen, bu yeni oluşan elektrona, kuarklar arasındaki yüksek enerjili etkileşime dayanan kökenini belirtmek amacıyla *beta kuantumu* denir.

Zayıf kuvvet güçlü kuvvetten çok daha zayıftır ve aynı zamanda EM kuvvetten de zayıftır. Ancak tekil nükleonlar arasındaki kütleçekimi kuvvetinden önemli ölçüde güçlüdür. Aslında kütleçekiminin diğer üç kuvvetle kıyaslandığında çok zayıf olması şu soruyu sormamızı gerektirir: Kütleçekimi neden evrende bu kadar önemlidir? Yanıt güçlü ve zayıf kuvvetlerin aksine, kütleçekiminin büyük, yani makroskobik mesafelerde etki etmesidir. EM kuvvet de uzun erimlidir, ancak EM kuvvetin aksine, *kütleçekimi daima çeker*. Kütle daima diğer kütleleri çekerken, elektriklenmiş nesneler birbirlerini çekebilir ya da itebilir. Dolayısıyla kütleyi sınırsız büyüterek nesneyi parçalamadan kütleçekimi kuvvetini giderek artırabildiğiniz halde, üç veya daha fazla elektriklenmiş nesneyi bir araya getirirseniz bazıları birbirlerini itecek ve bir şeyler parçalanacaktır. Bu nedenle kütleçekimi evreni ve onun içindeki yıldızlar ve galaksiler gibi büyük şeyleri biçimlendirirken, EM, güçlü ve zayıf kuvvetler çok daha küçük mesafeler üzerinde etki ederek molekülleri, atomları, çekirdekleri ve diğer nispeten küçük şeyleri şekillendirir.

Kararlı çekirdeklerde nükleonlar arasındaki etkileşim zayıf kuvveti hafifletir ve nötronların bozunmasını önler. Bu iyi

bir şeydir, çünkü aksi takdirde tek kararlı çekirdek hidrojen olurdu ve bir kez daha söyleyeyim, dondurma filan olmazdı. Ancak aşırı nötron içeren bazı çekirdeklerde beta bozunması yeğlenen bir şeydir. Çekirdekteki nötronlardan biri bir beta kuantumu yayarak kendiliğinden bir protona dönüşür, daha sonra bu beta kuantumu çekirdekten uçar; radyoaktivitenin ikinci bir formu.

Bugüne kadar bilinen bütün kuvvetler dörde indirgenebilir: kütleçekimi, elektromanyetizma, güçlü ve zayıf kuvvetler. 5. Bölüm'de açıklanacağı gibi, bir birleşme meydana gelmiştir; elektrik ve manyetizmanın EM kuvvetin farklı yönleri olarak yorumlanmaları gibi (4. Bölüm), EM ve zayıf kuvvetler de artık tek bir kuvvetin farklı yönleri olarak yorumlanıyor.

Bu irdeleme evrenin %95'ine değinmez: Karanlık madde ile karanlık enerji. Burada hiçbir şey belli değildir. Karanlık madde ile karanlık enerjinin varlığına dair çok sayıda kanıt olmasına rağmen, ne olduklarına dair çok az kanıt vardır. Kuantize alanlar ve bilinen dört kuvvet çerçevesinde açıklanabilirler veya açıklanamazlar. Kuantum fiziğinden öğrendiğimiz bir şey de doğanın büyük bir hayal gücüne sahip olduğudur.

Böylece, makroskobik dünyamızda doğrudan deneyimlediğimiz kütleçekimi ve EM kuvvetlerin yanı sıra, 1896'da Becquerel'in laboratuvarında başlayan iki temel kuvvet olan güçlü ve zayıf atomaltı kuvvetlerin öyküsünü sonlandırıyoruz. Bugüne kadar keşfedilen bütün kuvvetlerin –tüm itme ve çekmelerin– sadece bu dördüne bağlanabilmeleri önemli görünüyor.

Enerji Sonsuza Dek Sürer

"Alice çok enerjik" veya "roket büyük bir enerjiyle patladı" cümlelerinin ne anlama geldiğine dair hepimizin bir fikri vardır. Ancak *enerji* ile kastettiğimiz tam olarak nedir? Bu muh-

temelen fizikteki en önemli kavramdır. Newton'un çalışmalarından 150 yıl sonra, nihayet 19. yüzyıl ortalarında anlamı açıklığa kavuşturulana kadar fizikçiler enerji hakkında çokça düşündüler. Günümüzde bilinen önemi ancak 20. yüzyıldaki görelilik teorilerinde ve kuantum fiziğinde ortaya çıktı.

Birçok fizik ders kitabı belirsiz ve karmaşık nedenlerden ötürü bu çok önemli kelimeyi asla açıkça tanımlamaz,[13] ancak günümüzde *enerjinin* anlamını oldukça açık bir biçimde biliyoruz ve bu anlam basittir. *Enerji iş yapabilme becerisidir.* Peki, öyleyse *iş* nedir? Fizikte *bir kuvvet* (*itme veya çekme*) *bir cisme etki ettiğinde cisim ne zaman bir mesafe kaydetse iş yapılır.* Bir taşı kaldırdığınızda iş yaparsınız. Bir havalimanında tekerlekli bir bavulu yürüttüğünüzde iş yaparsınız. Ancak sabit bir duvarı ittiğinizde, kaslarınız ne kadar yorulursa yorulsun iş yapmazsınız, çünkü duvar hareket etmez. Bir tabak düşürdüğünüzde, tabağın düşüşü sırasında iş yapmazsınız, çünkü ona dokunmuyor ve dolayısıyla üzerinde bir kuvvet uygulamıyorsunuzdur; gelgelelim kütleçekimi kuvveti düşen tabak üzerinde iş yapar. Bu son örnekten, işin ille de insanlarla bağlantılı olmadığına dikkat edelim: Herhangi bir cisim yere düşünce Dünya iş yapmış olur. Vagonları çekme işini lokomotif yapar.

Enerji işten daha soyuttur çünkü bu bir beceridir: İlle de meydana gelen bir şeyi değil, meydana gelebilecek bir şeyi ifade eder. Örneğin hareket eden bir beysbol topunun enerjisi vardır, çünkü bir yakalayıcının eldivenine şiddetle çarpabilir (çarpmayabilir de) ve eldiveni geri doğru iterek iş yapar. Bütün hareket eden cisimler hareketin bir sonucu olarak *kinetik* (devinimsel) *enerji* adı verilen bu enerjiye sahiptir. Başka önemli enerji çeşitleri de vardır. Yerden yukarı kaldırılan bir taşın, hareketsiz durmasına rağmen (yerde olduğu durumun aksine), enerjisi vardır, çünkü düşüp bir çiviye çarparak onu

yere çakabilir ki bunun olması için bir iş yapılması gerekir. Bu *kütleçekimi enerjisidir*; kütleçekimi kuvvetinden doğan enerji. Diğer başlıca enerji formları, *elastik enerji* (deforme olmuş bir cismin eski haline dönerek iş yapma becerisi), sıcaklıktan (yani ısıl hareketten) kaynaklanan ısı enerjisi, EM kuvvetten doğan *EM enerji*, bir ışın demetinin veya başka bir EM ışımanın taşıdığı ışıma enerjisi, bir sistemin moleküler yapısından kaynaklanan *kimyasal enerji* ve bir sistemin çekirdek yapısından ortaya çıkan *nükleer enerji*.

Zaman zaman enerjiyi sayısal yönden ele alacağım. Bunun için hem enerjinin hem de işin metrik birimlerde *jul* (*joule*) cinsinden ölçüldüğünü bilmeniz gerekir. Bir jul çok fazla miktarda bir enerji değildir; örneğin (yaklaşık 110 gramlık) bir paket tereyağını 1 m kaldırdığınızda, yaklaşık 1 jullük iş yaparsınız ve tereyağının kütleçekimi enerjisini 1 jul artırırsınız.

Başka bir gerekli sayısal detay da "10'un kuvvetleridir". Örneğin 10^4, 10'un dördüncü kuvveti, $10 \times 10 \times 10 \times 10$ yani 10.000 anlamına gelir. 1.0'dan başlar ve ondalık işaretini dört hane ilerletirsiniz. Benzer şekilde 10^{-4}, 1/10.000 yani 0,0001 anlamına gelir: 1.0'dan başlar, ondalık işaretini sola doğru dört hane ilerletirsiniz. Başka bir örnek verecek olursak, ışığın hızı saniyede 3×10^8 m, yani saniyede $3 \times 100.000.000$ m, yani saniyede 300.000.000 metredir. Dolayısıyla 3×10^8'de ondalık işareti 3.0'dan sekiz hane ilerletilir.

Öyleyse enerji gerçekte ne anlama gelir? Enerji iş yapma becerisidir ve iş yapmak şeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulamak anlamına gelir. Dolayısıyla *enerji* şeyleri hareket ettirme becerisi veya daha genel olarak ifade edecek olursak, şeyleri fiziksel olarak değiştirme becerisidir.

Isı enerjisine daha yakından bakmamız gerekir. Isı enerjisi bilgisi 19. yüzyılda enerji ilkelerini hiç değilse kavramanın kilit noktasıydı.[14] Aslına bakarsanız, genel enerji ilkeleri çalış-

malarına tam olarak bu nedenden ötürü *termodinamik* denir.

Bir demlik sıcak suyun bir demlik soğuk suya göre daha fazla iş yapma becerisi, daha fazla enerjisi vardır. Kanıtı şudur: Eğer sıcak su kaynıyorsa kapağını takırdatabilir ve takırdatmak için de iş yapılmalıdır (işi yapan, kapağa kuvvet uygulayan buhardır). Soğuk su bunu yapamaz. Eğer demlik kaynayacak kadar sıcak değilse, bundan iş elde etmenin bir yolu da daha düşük bir sıcaklıkta kaynayan, alkol gibi başka bir sıvı bulmak ve sıcak suyu kullanıp bu sıvıyı ısıtarak demlik kapağını takırdatmasını sağlamaktır. Kimi zaman yanlış bir terim olan ısı[15] adı verilen ısı enerjisi sıcak nesnelerin iş yapma becerisi olarak tanımlanır.[16]

Bilim insanlarının sıcaklığın bir enerji şekli olduğunu anlamaları biraz zaman almıştır. Sıcaklığın, kendisinden daha çok içeren nesnelerin daha sıcak olmalarına ve daha az içeren nesnelerin daha soğuk olmalarına neden olan, maddi bir varlık olduğu düşünülürdü. Bu mantıklı görünür, ancak atomlar ve moleküller yönünden düşünecek olursanız, sıcaklığı gözünüzde canlandırmanın daha iyi bir yolu –yeni bir madde gerektirmediği için daha basit bir yöntemi– vardır. Bu doğru sıcaklık anlayışı yalnızca görülmeyen, mikroskobik seviyede ortaya çıkar; bu nedenle bilim insanlarının bunu çözmeleri bu kadar uzun zaman almıştır.

Sıcaklığın mikroskobik doğası hakkında deney yaparak bilgi sahibi olabilirsiniz. Şunu bir deneyin: Bir balonu kısmen şişirdikten sonra ağzını sıkıca bağlayın. Yavaşça kaynayan suyla dolu, büyük, kapalı bir demlikte 30 saniye yüzdürün ve hızla (soğumadan), sıkıştırmadan kitap destekleri arasına yerleştirin. Kitap desteklerini hareket ettirmeden balonu çıkarın, bir dondurucuda 30 saniye soğutun ve aynı desteklerin arasına yine hızla yerleştirin. Önemli ölçüde büzülmüş olmalı. Neden?

Lütfen bunun üzerinde düşünün...

Balonu şişirdiğinizde onu yaklaşık 10^{22} –on milyar çarpı bir trilyon– tane hava molekülüyle doldurdunuz. İçerideki moleküller çeşitli yönlerde hareket ederek ara sıra balonun çeperine çarpar ve çeperi dışa doğru iter (buna *basınç* denir). Siz balona hava üfledikten sonra, (balonun santimetrekare yüzey alanı başına) iç kısma vuran moleküllerin sayısı dış kısma vuran moleküllerin sayısından daha fazla olacaktır; dolayısıyla nihai sonuç balonun çeperi üzerindeki dışa doğru basınçtır. Şişirdiğinizde balonun genişlemesinin nedeni budur. Peki, soğuma sırasında gözlemlenen büzülmeyi nasıl açıklarız? Siz balonu bağlayıp kapattıktan sonra balonun içindeki moleküllerin sayısı sabitti. Büzülmenin nedeni iç çeper üzerindeki basıncın azalması olmalıdır ki, bu da içerideki sabit sayıda molekülün çepere artık o kadar güçlü biçimde çarpmadıklarını gösterir. Bu moleküllerin daha yavaş hareket etmeleri doğal bir sonuçtur. Görünen o ki, soğutma moleküllerin daha yavaş, ısıtma ise daha hızlı hareket etmelerine neden olur.

Bu hipotez sayısız deneyle doğrulanmıştır ve bir hipotez değil de bir teori olarak sayılmayı kesinlikle hak eder; kimi zaman ısı enerjisinin kinetik (devinimsel) *teorisi* olarak adlandırılan bir teori: *Sıcaklık bir maddenin moleküllerinin rastgele yani organize olmayan hareketidir*. Bu yalnızca molekülleri birbirlerinden büyük ölçüde ayrı duran gazlar için değil, molekülleri daha yakın olduğu halde birbirlerinin yanından kayabilmeleri için yeteri kadar alan bulunan sıvılar ve molekülleri çok sıkı bir şekilde bir arada bulunduğu için sadece sabit noktalar etrafında titreşebilen katılar için de geçerlidir. Sıcaklığın düzensiz molekül hareketinden başka bir şey olmadığı şeklindeki bu önemli fikir ısı enerjisinin mekanik yorumu olarak adlandırılır, çünkü 19. yüzyıldaki fizikçiler Newton'un mekanik ilkelerinin moleküler harekete bütün yönleriyle uygulanabilir olduğunu

varsayıyorlardı (fakat kuantum fiziği bize yanıldıklarını söyler). Kuantum fiziğinin ışığında bile sıcaklığın düzensiz moleküler hareket olduğu anlayışı yine de oldukça doğrudur. Bunun hakkında düşündüğünüzde bu hayret verici bir şeydir. Cildiniz ısındığında cildinizin molekülleri ayrı ayrı daha sıcak değildir, sadece daha hızlı hareket ediyorlardır.

Bu kitabı elinizden yere doğru bırakın. Kitap düştükçe hızlanıyor mu?

Lütfen bunun üzerinde biraz düşünün...

Kitabın düşmesini dikkatle gözlemleyin. Kitap apaçık hızlanır, çünkü hareketsiz halden başlar. Ancak (a) her evrede hızlanır mı (b) yoksa bırakıldıktan hemen sonra hızlanıp ardından geri kalan mesafeyi değişmeyen bir hızda mı tamamlar?

Düşünmeye devam edin...

Soruyu yanıtlamak için şunu deneyin: Kitabı katı bir yüzeyden birkaç santimetre yukarda tutun ve bırakın. Şimdi aynı şeyi giderek artan yüksekliklerden deneyin. Kulaklarınız size ne söylüyor? Yükseklik arttıkça kitap daha yüksek sesle çarpar; bu yüzden daha yüksekten düştükçe daha fazla hızlanması, dolayısıyla her evrede hızının artması gerekir.

Doğanın muhteşem düzenleyici ilkelerinden birini eylem halinde görüyorsunuz.

Kitap düştükçe yükseklik kaybettiği için sürekli kütleçekimi enerjisi kaybeder. Ancak kinetik enerjisinin sürekli olarak arttığını da görebilirsiniz. Newton'un hareket yasalarının yardımıyla ve hava direncinin olmaması gibi bazı basitleştirici varsayımlar sayesinde, fizikçiler düşüşün herhangi bir noktasında kazanılan kinetik enerji miktarının, kaybedilen kütleçekimi enerjisi miktarına eşit olduğunu sayısal olarak kanıtlayabilirler.

Daha da dikkat çekici olansa, hava direncini ve başka şeyleri dahil ettiğinizde bile, deneylerin bütün sistemin toplam enerjisinin süreç boyunca değişmediğini göstermesidir. Gerçek deneyde hava direnci önemlidir. Havanın düşen kitapla büyük ölçekli harekete (*rüzgâr* denir) geçmesi ve aynı zamanda ısınması ısı enerjisinin de dahil olması gerektiği anlamına gelir. Bununla birlikte deneyden çıkan sonuç toplam enerjinin –sistemin (hava dahil) tüm iş yapabilme becerisi– düşme boyunca değişmediğidir. Kuantum fiziğini veya Einstein'ın görelilik teorisinin etkilerini içeren durumlarda bile deneyler toplam enerji miktarının değişmediğini gösterir. Buradan hareketle *enerjinin korunduğunu* söyleyebiliriz.

Bildiğimiz kadarıyla bu tamamıyla genel bir ilkedir. *Herhangi bir süreçteki bütün öğelerin toplam enerjisi değişmeden kalır.* Sözün özü, *evrendeki enerji miktarı asla değişmez.*[17] Buna *enerjinin korunumu* ilkesi denir.

Soru: Bu durumda düşen kitabınız zemine çarptığında enerjiye ne olur?

Tek bir mantıklı seçenek vardır: Isı enerjisine dönüşür.

Öyleyse çekiçle tahtaya çivi çaktığınızda çivi ısınmalıdır. Deneyin. Çivinin sıcaklığını hissedebilirsiniz.

Enerji ve Kütlenin Eşdeğerliği

1905 Einstein için olağanüstü bir yıldı.[18] Başka birkaç çalışmasıyla birlikte özel görelilik teorisinin temel ilkelerini yayımladı. Bunlardan biri (ancak ihtilaflı kabul edilen görelilik çalışması değil) nihayet Nobel Ödülü'nü kazanacaktı. Başka bir çalışması da şaşırtıcı bir enerji ilkesini öngörüyordu.[19] Bu ilkeyi güdüleyen kuantum fiziği değildi ve klasik bir evrende yaşasaydık dahi doğru olurdu; buna rağmen ilkenin kuantum fiziğini kavramada çok önemli olduğu ortaya çıktı.

1915'te Einstein zaman ve uzay hakkında 1905 tarihli çalışmasında ileri sürdüğü fikirlerinin daha geliştirilmiş bir hali

olan genel görelilik teorisini açıkladı. Genel teori kütleçekimini uzay ve zamanın özelliklerinin bir sonucu olarak açıklar. Her ne kadar birçok fizikçi Einstein'ın genel görelilik teorisini kuantum fiziğiyle birleştiren bir teori bulmak için canla başla uğraşıyorlarsa da, genel görelilik teorisi bu kitapta ele alınan kuantum ilkelerinin kapsamına girmez.

Einstein'ın dehası kısmen kolayca analiz edilebilen fakat gerçek bir laboratuvarda yapılması pratik olmayabilecek, basit fakat temel düşünce deneylerini kafasında canlandırabilmesinde yatıyordu. Einstein yeni enerji ilkesini geliştirmek için zıt yönlerde iki özdeş, kısa ışık atımı yayan ve hareketsiz halde duran bir nesne hayal etti. Tek bir atım yerine iki atım hayal etmesinin amacı, analizi basitleştirmek açısından, nesnenin tek bir atımda olacağı gibi geri tepmeden hareketsiz kalmasıydı. Einstein daha sonra özel görelilik teorisinin denklemlerini kullanarak ışık atımlarının yayılımının *mutlaka nesnenin kütlesini azaltacağını gösterdi.* Bu hayret verici bir şeydir: Bir nesne iki ışık atımı yayar, bunların bir kütleleri yoktur ama ışıyan enerjileri vardır ve bu da nesnenin kütlesini azaltır! O halde nesnenin kütlesi tümüyle tükenip de ışık atımları yaymaya devam ederken hareketsiz kaldığı ve böylece yok olduğu hayal edilebilir!

Nesne tümüyle tükenmeden önce ne kadar enerji ışık olarak yayılır? Einstein'ın özel görelilik teorisine dayanan tahmini mc^2 juldü. Burada m nesnenin hiç ışık yaymadan önceki kütlesini, c ışık hızını ve c^2 ışık hızının karesini (ışık hızı çarpı ışık hızı) gösterir. Nesnenin kütlesini sıfıra indirecek şekilde mc^2 jullük enerji yayılması gerektiği ve enerji korunduğu için, yayma süreci başlamadan önce bu miktarda enerji nesne içinde bulunuyor olmalıdır. Başka bir deyişle, m *kilogramlık bir kütlesi olan, hareketsiz duran herhangi bir nesnenin* $E = mc^2$ *jule eşit bir enerjisi olmalıdır.* Einstein bunun aksinin de doğru ol-

duğunu öne sürdü: *Hareketsiz duran, E jullük bir enerjisi olan bir nesnenin* m = E/c²*'ye eşit bir kütlesi olmalıdır* (mantıksal olarak E = mc²'ye eşdeğer bir denklem). Başka bir deyişle, *hareketsiz nesnelerde enerji ve kütle tümüyle eşdeğerdir: Enerjisi olan bir nesnenin kütlesi vardır, kütlesi olan bir nesnenin de enerjisi vardır ve ikisi arasındaki ilişki* E = mc²*'dir*. Bu Einstein'ın *kütle ve enerji eşdeğerliği* ilkesidir.

Einstein bu ilkenin özel görelilik teorisinin en önemli öngörüsü olduğu kanaatindeydi. Bu iki nedenden dolayı şaşırtıcıdır. İlk olarak, Einstein'ın savı *enerji korunduğu halde kütlenin korunmadığına* işaret eder. Işığın yayılımı onu yayan nesnenin kütlesini azaltırken, kütleye sahip olmayan ışığı yaratarak evrenin toplam kütlesini azaltır. Daha önceleri kütlesiyle ölçülen maddenin her fiziksel süreçte korunduğu düşünülüyordu. Dolayısıyla madde geçicidir fakat enerji sonsuza dek sürer. Bu anlamda dünya maddi değil, enerjik bir dünyadır.

İkinci olarak, Einstein'ın denklemi sıradan makroskobik nesnelerdeki enerji miktarının muazzam olduğunu öngörür. 1 kilogramlık her nesne c^2 jullük enerji içerir. C saniyede 3×10^8 m olduğu için, c^2 metrik birim olarak 9×10^{16}'dır. Dolayısıyla 1 kilogram, 9×10^{16} jullük enerji içerir ki, bu 1.000 megavatlık devasa bir santralin 3 yıllık çalışması sonucu ortaya çıkan toplam enerjisine eşittir.

Bununla birlikte modern fizik gözlemlerle doğrulanmış, $E = mc^2$ gibi şaşırtıcı ilkelerle doludur. 20. yüzyılın başlarında bilim insanları Einstein'ın argümanının hatalı ve elde ettiği sonucun yanlış olduğunu ileri sürseler de, $E = mc^2$ zamanın sınamasına ve daha da önemlisi deneye yenik düşmemiştir. Ünlü bir örnek verecek olursak, nükleer reaksiyonlarda (çekirdek yapısında meydana gelen radyoaktif bozunma gibi değişiklikler) enerjide meydana gelen değişimler o kadar büyüktür ki, sonuçta kütlede oluşan değişimler kolayca ölçüle-

bilir. Deney sonucu tam olarak Einstein'ın öngördüğü gibidir; enerji yayan nükleer bir reaksiyondaki (bir nükleer reaktörün çalışması gibi) ilgili bütün maddelerin kütleleri tam olarak $m = E/c^2$ kadar azalır, burada E reaksiyon sırasında çekirdeğin yaydığı enerjiyi gösterir. Aynısı kimyasal reaksiyonlarda ve diğer enerji dönüşümlerinde de meydana gelir, fakat kütle değişimleri genellikle kolayca ölçülemeyecek kadar küçüktür.

Elektron-pozitron yok oluşu çarpıcı bir durumdur. *Antielektron* da denen *pozitronlar* elektronlarla aynı kütleye, fakat zıt EM özelliklere sahip kuantumlardır. Dolayısıyla elektrik yükleri elektronların negatif yüklerinin aksine pozitiftir ve pozitrona elektronun *antiparçacığı* denir. Kuantum alan teorisinin (kuantum fiziğinin yüksek enerjili versiyonu) öngörüsüne göre ve yüksek enerjili deneylerin de doğruladıkları gibi, parçacık-antiparçacık çiftleri sadece yakın durarak birbirlerini tümüyle yok edebilirler. Ancak enerjinin korunması gerektiği için parçacık-antiparçacık yok oluşu sırasında bir çeşit enerji yaratılmalıdır. Tipik olarak elektron-pozitron yok oluşu iki foton yaratır, bunların toplam enerjisinin daima deneysel olarak mc^2 olduğu (ek olarak, çiftin sahip olabileceği herhangi bir kinetik enerji) görülür, burada m, Einstein'ın öngördüğü gibi çiftin toplam kütlesini temsil eder.[20] Madde kalıcı değildir ve tümüyle yok edilebilir, fakat enerji sonsuza dek kalır.

Madde de yaratılabilir. Doğru koşullar altında[21] tek bir foton kendiliğinden yok olabilir ve fotonun enerjisi mc^2'den büyük olduğu müddetçe yerine bir elektron-pozitron çifti geçebilir; burada m çiftin toplam kütlesidir. Sadece madde değil, ışıma da geçicidir.

Entropinin Şanlı ve Trajik Öyküsü: Aynı Eve Dönemezsiniz

Bir yumurtayı kırabilir, fakat parçalarını birleştirerek eski haline getiremezsiniz. Silahtan çıkan bir kurşun duvarın içi-

ne girdiğinde kurşunun neredeyse bütün kinetik enerjisi ısı enerjisine dönüşür, ancak bu ısı enerjisini kurşunu silaha geri göndermek için kullanamazsınız. Böyle birçok *tersinmez süreç* vardır, bunlar A halinden (silahın ağzından çıkan kurşun) B haline (daha sıcak bir duvarda hareketsiz duran, daha sıcak bir kurşun) kolayca ilerleyebilir, fakat B halinden A haline geçiş ancak dış enerji kaynaklarının yardımıyla mümkündür. Buna başka bir örnek, yere düşmekte olan bir cisim veya "yavaşlayan" bir çocuk salıncağıdır.

Peki, bu neden böyle? Bunun üzerinde düşünmemize yardımcı olacak bir düşünce deneyi var.

"Etkisiz" atomlardan –kimyasal olarak tepkimeye giremeyen helyum gibi atomlar– oluşan, gazla dolu iki kutu düşünün; kutulardan biri sıcak, diğeri de soğuk olsun. Kutuları H (sıcak) ve C (soğuk) olarak isimlendirelim. Sıcaklık düzensiz bir mikroskobik hareket olduğu için H'nin atomları ortalama olarak C'nin atomlarından daha hızlı hareket eder. Şimdi bu iki kutuyu birleştirdiğimizi düşünelim; aralarında sadece ince bir metal duvar olsun ve bu duvar ısı enerjisinin geçişine izin versin ama gaz moleküllerinin geçişine izin vermesin. Muhtemelen zaten bildiğiniz gibi, daha sonra ısı enerjisi metalden geçerek H'den C'ye ulaşır. Buna genellikle ısınma yasası denir: Fırsatını bulursa ısı enerjisi kendiliğinden sıcaktan soğuğa akarak H'yi soğutur ve C'yi ısıtır. Isı enerjisi aksi şekilde soğuktan sıcağa akmaz.

Dolayısıyla sıcaktan soğuğa enerji akışı tersinmez bir süreçtir. Soralım, bu neden böyledir? Buna mikroskobik ölçekte bakalım. H'nin hızlı hareket eden atomları metal duvara güçlü bir biçimde çarparak duvarı sarsar ve bu titreşimleri C'nin atomlarına iletirken C'nin atomları duvara zayıf bir biçimde çarpar. Dolayısıyla ortalama olarak H'den C'ye, C'den H'ye olduğundan daha fazla mikroskobik kinetik enerji akar ve H

soğurken C ısınır. Bu durum kutular aynı sıcaklığa ulaşana dek devam eder, aynı sıcaklığa ulaştıklarında net ısı enerjisi akışı durur; çünkü artık iki yönde de akan miktarlar eşittir. Böylece H ve C sabit bir orta sıcaklıkta "dengeye" gelir.

Bu tipik bir tersinmez süreçtir. Bunun tersinir olması mümkün mü? Yani ısı enerjisini C'den H'ye iletip iki kutuyu da önceki sıcak ve soğuk hallerine geri getirebilir miyiz? Doğrusunu söylemek gerekirse, yanıt şaşırtıcı bir evettir. Bu şu şekilde olur: Denge halinde her iki taraftaki atomlar, bazıları daha hızlı ve bazıları daha yavaş olmak üzere çeşitli hızlarda hareket ederler. Bu sırada diyelim, mikrosaniyede (saniyenin milyonda biri) H'nin duvarında oluşan çarpmaların çoğunu H'nin daha yavaş molekülleri ve C'nin duvarındaki çarpmaların çoğunu da C'nin daha hızlı molekülleri gerçekleştiriyor olabilir. Bu sayede bu mikrosaniye boyunca net ısı enerjisi C'den H'ye aktarılabilir. Eğer bu durum yeterli sayıda mikrosaniye boyunca devam etseydi, H ve C zamanla ilk sıcaklıklarına geri dönerlerdi!

Ancak bunun gerçekleşmeme olasılığı çok yüksektir. Eğer gaz normal atmosferik basınçta ve sıcaklıktaysa, her mikrosaniyede, her bir kutunun metal duvarının her santimetrekaresine aşağı yukarı milyar kere milyar (10^{18}) tane atom çarpar. Her bir kutunun kenarları 1'er cm uzunluğunda bir küp olduğunu varsayarsak, H ve C arasındaki metal yüzeyin alanı 1 santimetrekare olur. Yine iki kutunun dengeye ulaştığını (aynı sıcaklık) varsayalım. Mümkün görünmeyen 1 mikrosaniyelik tersinir süreçten sonra H, C'den biraz daha sıcaktır. C'den H'ye bir mikrosaniye daha ısı enerjisi akışını sağlamak için, C kutusu içindeki 10^{18} çarpmanın net etkisi H kutusu içindeki 10^{18} çarpmanın net etkisinden büyük olmalıdır. Ancak C'nin daha yavaş olan atomları H'nin daha hızlı atomlarına göre normalde duvara daha hafif çarpar. Bu nedenle,

her bir tarafta da 10^{18} yerine diyelim 10 çarpma olsaydı bile, C'den H'ye bir enerji akışı pek mümkün olmazdı. Bu olasılık çarpma sayısı arttıkça giderek daha da azalır; bunun nedeni de adil bir yazı tura atmada ardı ardına 20 kez tura gelmesi olasılığının ardı ardına 10 kez tura gelme olasılığından çok daha az olmasıyla aynıdır (aslına bakarsanız, 1.024 kat daha azdır[22]). Dolayısıyla tesadüfen C'den H'ye az bir ısı enerjisi akışı olacaksa, bir sonraki mikrosaniyede bunun çoğunun C'ye geri akma olasılığı çok çok fazladır.

Gördüğünüz gibi, tersinmez denen süreçler prensipte tersinirdir, fakat bu sürecin tersi olacak gibi değildir. Bu kırılmış yumurtalar için de doğrudur. Bunu dramatize etmek için bir Hollywood filmini geriye sardığımızı düşünelim. Geriye sarılan bir filmde her şey (yukarı doğru akan şelaleler, silahın ağzından geri giren kurşunlar, gençleşen insanlar vb.) fiziksel olarak mümkün olsa da, bunun olasılığı son derece düşüktür. Örneğin şelalenin dibindeki su birikintisinde rastgele hareket eden su moleküllerinden yeteri kadarının (ısı enerjilerinin bir sonucu olarak) aynı anda hızla yukarı doğru hareket etmesi durumunda şelale yukarı doğru akabilirdi.

Özetleyecek olursak, belirli bir sürecin tersinmez olduğunu söylediğimizde gerçekte kastettiğimiz tersine sürecin neredeyse imkânsız olduğudur. Bu anlamda termodinamiğin ilkeleri "istatikseldir". Tersinmezliğin açıklaması tamamen olasılıklarla ilgilidir.

Isı enerjisiyle bir ilgisi olmamasına rağmen, tersinmezlik ile olasılıklar arasındaki bağlantıyı kanıtlayan daha basit bir düşünce deneyi vardır. Kısmen düzenlenmiş 52'lik bir iskambil destesi düşünelim, bütün maçalar destenin üstünde düzenlenmiş ve geri kalanı da karışık olsun. Bütün desteyi birkaç kez karıştırın. Bu karıştırmanın sonucunda karışımın eskisinden daha düzenli olması mümkünse de, son duru-

mun ilk durumdan daha düzensiz olma olasılığı son derece yüksektir. Bu deneyde tersinmezliğin nedenini görmemiz kolaydır. Kısmen düzenlenmiş bir desteyi daha fazla bozmanın yolları desteyi daha fazla düzenlemenin yollarından çok daha fazladır. Benzer bir ilke oturma odanız için de geçerlidir; belki keşfetmişsinizdir, oturma odanızı dağıtmak düzenlemekten daha kolaydır. Bu düzensizlik ilkesi bütün tersinmez durumların ardında yatar.

Atom ve moleküllerden oluşan fiziksel sistemlerde moleküler seviyedeki –mikroskobik– düzen çok önemli bir etmendir. Etkisiz gaz içeren kutulara dönecek olursak, başlangıçtaki durum (bir sıcak, bir de soğuk kutu) daha hızlı moleküllerin çoğunun H'de ve daha yavaş moleküllerin çoğunun C'de olması bakımından kısmen düzenlidir. Kutular temas edecek şekilde yerleştirildiklerinde diğer durumlara geçebilirler ve bu durumların daha az düzenli olma olasılıkları çok fazladır. H'deki hızlı moleküller ile C'deki yavaş moleküller arasındaki ayrım o kadar sıkı olmaz, çünkü bu düzensiz durum sayısı daha fazladır ve ısıl moleküler hareket rastgeledir. Detaylı analiz şunu gösterir: Kart destesi gibi daha düzensiz durumların her biri, bunlardan çok daha fazla sayıda olması anlamında daha olasıdır. Dolayısıyla sistemin daha az düzenli durumlara doğru ilerlemesi olasılığı son derece yüksektir. İşte bu yüzden fırsat verildiğinde ısı enerjisi sıcaktan soğuğa akar.

Genel ilke şöyledir: *Moleküler seviyede kısmen düzenli olan ve tekrar düzenlenme fırsatı verilen bir sistemin daha az düzenli bir duruma ilerleme olasılığı çok yüksektir.* Buna *termodinamiğin ikinci yasası denir.*[23]

Bilim insanları mikroskobik düzen veya onun zıddı olan mikroskobik düzensizlik kavramını ölçmeyi başardılar. Bu

sayısal ölçüme *entropi* denir. Bu kelimeyi burada tam olarak tanımlamamız gerekmiyor. Entropinin tipik makroskobik sistemlerin makroskobik olarak ölçülebilir bir özelliği olduğunu ve sistemin moleküler seviyedeki düzensizliğinin bir ölçümü olduğunu söylememiz yeterlidir. Bu kavramın yardımıyla ikinci yasayı sayısal olarak ifade edebiliriz: *Makroskobik bir fiziksel süreçteki bütün öğelerin toplam entropisinin artması veya aynı kalması olasıdır; toplam entropideki düşüşler yalnızca rastgele meydana gelir ve ne sürdürülebilir ne de kontrol edilebilirler.* Önceki cümleyi dikkatle kurdum: Bütün öğelerin dahil olması gerektiğini ve entropi düşüşlerinin olası fakat beklenmedik ve öngörülemez, dolayısıyla kontrol edilemez olduklarını belirttim.

Yaprağın büyümesi önemli ve ilginç bir örnektir. Fotosentez yapan bir yaprak basit karbondioksit (CO_2) ve su (H_2O) moleküllerini bünyesine alarak glikoz ($C_6H_{12}O_6$) gibi şekerler yapar. Glikoz molekülü, içine giren, rastgele hareket eden CO_2 ve H_2O moleküllerinden daha düzenli, daha yapısaldır; böylece fotosentez süreci daha az düzenliden (yüksek entropi) daha düzenliye (düşük entropi) ilerleyerek görünüşte ikinci yasayı ihlal eder. Bu ikilemin yanıtı oldukça barizdir: Yaprak, CO_2 ve H_2O bu süreçteki yegâne katılımcılar değildir. Onlar güneşten yardım alırlar. Işıma bunu yayan cismin sıcaklığına sahiptir. Güneşin 6.000 derecelik yüzeyinden çıkan ışımanın sıcaklığı 6.000 derecedir, ancak tenimizde biz bu sıcaklığı hissetmeyiz, çünkü güneş yeterince uzak olduğu için cildimize ulaştığında enerjisi büyük ölçüde dağılarak ışımanın enerji yoğunluğunu (santimetreküp başına enerjisini) düşürür ve dolayısıyla cildinizi ânında yakacak kadar enerji olmaz. Bu enerji bir yaprağa ulaştığında yüksek sıcaklıklı güneş ışığı absorbe edilir ve daha düşük sıcaklıklı ışıma olarak tekrar yayılır. Bu süreç sırasında ışıma etrafındakilerle dengeye ge-

lir ve tıpkı iki gaz kutusu gibi, bu ortak bir sıcaklıkta dengeye gelme katılımcıların (ışıma artı etraftakiler) entropisinde büyük bir artış olduğunu gösterir. Bu entropi artışı yaprağın moleküllerinin azalan entropisine güç sağlar. İkinci yasayla uyumlu olarak, evrenin toplam entropisi fotosentezdeki entropi azalmasına rağmen artar. Güneş ışığı dünyaya yalnızca enerji değil, düzen de sağlar.

Bildiğimiz kadarıyla ikinci yasa evren için de geçerlidir ve bu evrenin giderek daha düzensizleştiği anlamına gelir. 3 mutlak derecedeki (-270°C ya da 3 *kelvin* de denir) galaksiler arası uzayla kıyaslandığında, yıldızlar ve galaksiler nispeten küçük hacimler halinde toplanmışlardır ve yüksek derecede düzen (sıcak maddenin soğuk maddeden ayrılması) ve dolayısıyla bir bütün olarak evren için düşük bir entropi anlamına gelen muazzam sıcaklıklara sahiptirler. Bu düzen biyolojik gelişimi ve biyolojik evrimi yönlendirerek güneşin dünyayı yapılandırmasına olanak sağlar. Gelecekte milyarlarca yıl boyunca evren dengeye geldikçe, yıldızlar, gezegenler ve yaşam gibi düzenli yapılar için fırsatlar sağlanır. Dengesizliğin neden olduğu enerji akışı ve değişimler sayesinde yaşam, özgürlük ve mutluluk peşinde koşmak mümkündür.

Evrenimiz 14 milyar yıldır entropisini artırıyor ve ilk başta şimdiye kadarki en düşük entropiye sahip, düzenli bir durumdan başlamış olmalıdır. Aslına bakarsanız, evrenin büyük patlamayla oluşumu aşağı yukarı bir metrenin trilyonda birinin trilyonda birinin trilyonda birine karşılık gelen, yaklaşık 10^{-35} m genişliğindeki bir hacim içinde başlayan, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük, yüksek enerjili bir kuantum fiziği olayıymış gibi görünür. Atomlar 10^{-10} m ve çekirdekler 10^{-15} m çapındadır, dolayısıyla bu hacim küçüktür –muhtemelen fiziksel olarak mümkün olabilecek kadar küçük– çünkü bizzat uzay bu seviyede kuantize olabilir. Oluşumu sırasında ev-

ren belki de herhangi bir şey için mümkün olabileceği kadar düzenliydi.[25] Uzayın o zamanki ani ve sürekli genişlemesinin muazzam bir entropi artışını göstermesi entropi üreten başka yeniden düzenlemeler için yaratıcı olasılıklar sunar.

Büyük patlamanın başlangıçtaki düşük entropili durumu termodinamiğin ikinci yasasının var olmasının; geleceği değil, geçmişi hatırlamanızın; evrenin ısı titreşimlerinden daha heyecanlı bir şeye sahip olmayan, sonsuz bir ısıl denge halinde olmamasının; yıldızların, yaşamın ve dondurmanın mümkün olmasının nedenidir. Bu aynı zamanda eve dönememenizin ve zamanla her şeyin sona ermesi gerekmesinin de nedenidir. Büyük patlama ve onun neden olduğu entropi yasası evrenin muhteşem olasılıkları kadar kaçınılmaz trajedilerini de yönlendirir.

4

Alanlar ve Klasik Elektromanyetizma

Mıknatıslarla hepimiz oynamışızdır. Bir ataşı bir mıknatısın bir kutbunun yanına attığınızda ataş hemen kutba çekilir. Kutbun etrafındaki "boş" uzayda kesinlikle görünmez bir şey vardır. Sezginiz doğrudur: Orada bir şey yani manyetik bir alan *vardır*. Demir bir zırh kuşandığınızı ve iki kocaman manyetik kutup arasında dolaştığınızı hayal edin. En yakın kutba savrulurdunuz. Kesinlikle orada, yakınındaki her noktada bir şey vardır.

Bir uzay bölgesi boyunca her noktada mevcut olan fiziksel bir oluşuma *alan* denir. Bir havuzdaki su bir su alanıdır; dumanla dolu bir oda bir duman alanıdır. Bir buğday tarlası bir buğday alanıdır. Birçok alan ölçülebilir: Bir su havuzunun normalde her noktada belirli bir yoğunluğu (santimetreküp başına kütle), sıcaklığı ve hızı vardır. Alanlar parçacıkların zıddıdır. İdeal bir parçacık uzayda sadece tek bir noktayı kaplar, ancak *parçacık* terimi sadece sınırlı bir uzay alanını kaplayan oluşumlar için de geçerlidir. Bu kitapta ele alınan alanların çoğu, her ne kadar genellikle ağırlıklı olarak sınırlı (belki de mikroskobik) bir alan içinde yoğunlaşmış halde olsalar da, bütün uzay boyunca yayılırlar.

1830 civarında başlayarak, Michael Faraday ve James Clerk Maxwell fiziksel dünya görüşümüzde parçacıklardan

alanlara kadar tarihî bir değişim yarattılar. Onların çalışmalarının bir sonucu olarak manyetik alan artık evreni kaplayan daha genel bir EM alanın bir parçası ve tüm elektrik ve manyetik fenomenlerde kilit aktör olarak görülüyor.

Gerçekliğe ilişkin alan görüşünün inançlı bir savunucusu olan Albert Einstein bunun eski parçacık görüşünün yerine geçmesini öneriyordu:

> Maxwell'den önce fiziksel gerçekliğin maddi parçacıklardan oluştuğu düşünülüyordu. Maxwell'in zamanından bu yana, fiziksel gerçekliğin sürekli alanlarla yansıtıldığı ve mekanik bir yoruma elverişli olmadığı düşünülüyor. Gerçeklik kavramındaki bu değişim Newton'un zamanından bu yana fiziğin yaşamış olduğu en derinlikli ve en verimli şeydir.[1]

Beklendiği üzere Einstein'ın genel görelilik teorisinin esasını alanlar oluşturur. Einstein yaşamının büyük kısmı boyunca, evrenin, evreni kaplayan sadece iki *klasik alandan* (kuantum etkileri sergilemeyen alanlar) oluştuğunu varsaydı: kütleçekimi alanı ve EM alan.

İleride göreceğimiz gibi, kuantum fiziği de evrenin tümüyle alanlardan oluştuğunu varsayar (5. Bölüm). Bu *kuantum alanları* klasik alanlardan başlıca iki şekilde farklılık gösterir. Birincisi, bunlar kuantizedir; *kuantum* adı verilen oldukça birleşik, uzayda yayılan alan enerjisi demetlerinden oluşurlar. Her bir kuantum evrensel bir alanda bir bozunumdur, tıpkı bir göletin düzgün yüzeyini bozan bir dalga gibi. Bu alan-demetlenme özelliği kuşkusuz kuantum alanlarına parçacık benzeri bir görünüm sağlar, çünkü demetler bir şekilde parçacıklara benzer. Örneğin uzaysal bir hacmi kaplayan noktalar sayılamadığı halde demetler sayılabilir. Kuantum alanlarının bu sayılabilir, sayısal yönü klasik alanlarda bulunmaz.

İkinci olarak, çeşitli kuantum alanı türleri sadece bilinen dört kuvvetten (dördüncü kuvvet olan kütleçekiminin bir kuantum teorisi hâlâ devam eden bir çalışmadır) üçü için "kuvvet alanlarını" içermekle kalmaz, *madde alanları* adı verilen, oldukça beklenmedik başka bir kategoriyi de içerirler. Madde alanlarıyla birlikte elektron, proton, atom ve molekül gibi maddi cisimler de alan çerçevesi içine dahil edilirler. Başka bir deyişle, *elektron, proton, atom, molekül ve diğer maddi cisimler tümüyle alanlardan oluşur*, manyetik alana ve diğer kuvvet alanlarına benzer alanlardan. Bu bölüm, 5. Bölüm'deki kuantum alanlarına bir başlangıç olarak kuantum dışı bir alana odaklanıyor: Klasik EM alan.

Alan Kavramı

Alanlar fiziğin en mantıklı kavramlarından biridir ve muhtemelen boş uzay boyunca sürüklenen küçük parçacıklardan sezgisel olarak daha inandırıcıdır. Hatta evrenin ortaçağ sonrası parçacığa dayanan mekanik görüşünün kurucusu olan Newton bile sezgisel olarak gerçekliğe ilişkin alan görüşünün çekimine kapılmıştı. Newton'un kendi teorisi, kütleçekimi kuvvetinin ay ve dünya gibi cisimler arasında, aralarındaki uzayda meydana gelebilecek fiziksel süreçlerin aracılığı olmaksızın, doğrudan ve aniden etki ettiğini varsaymasına rağmen, Newton şahsen kütleçekiminin altında yatan mekanizmanın uzayı kaplayan, maddi olmayan vasıtada bulunduğunu seziyordu. Aslına bakarsanız, "Newton uzayı kaplayan bir vasıtaya dair kanıt bulmak amacıyla takıntılı bir biçimde çalışıyordu."[2] Papaz Richard Bentley'e yazdığı mektuplardan birinde Newton şöyle diyordu:

> Canlı olmayan kaba maddenin, maddi olmayan bir şeyin aracılığı olmadan ve karşılıklı temas olmadan,

> başka maddeler üzerinde işlev görmesi ve etki etmesi akıl almaz bir şey. ... Bir cismin başka bir şeyin aracılığı olmadan, bir vakum vasıtasıyla, belli bir mesafeden eylem ve kuvvetlerini başka bir cisme aktarılabileceği şekilde hareket etmesi bence o kadar büyük bir saçmalık ki, felsefi meselelerde yetkin düşünme becerileri olan biri böyle bir yanılgıya hiçbir zaman düşmez.[3]

Ancak Newton yayımlanmış yazı ve derslerinde bir şey için elinde kanıt olmadan tahminde bulunmaya istekli değildi, sebatla şunu savundu: "Ben hipotezler uydurmam."[4] Newton profesyonel olarak alanlar hakkında hiç konuşmadığı veya yazmadığı ve otoritesi çok fazla olduğu için, klasik fiziğin ilk başta sadece-parçacık teorisi olarak gelişmesi şaşırtıcı değildir. 18. ve 19. yüzyıllarda bilim insanları genellikle evrenin boş uzay boyunca hareket eden, aracı alanlar olmadan direkt temas veya belirli bir mesafeden direkt eylem aracılığıyla etkileşen, yok edilemez parçacık halindeki atomlardan oluştuğunu varsayıyorlardı ki, Newton fiziği buna işaret eder gibiydi.

Dolayısıyla 1900'den 1930'a dek, Faraday, Maxwell ve Einstein'ın alanlar üzerindeki daha önceki ve güncel çalışmalarına rağmen, kuantum kurucularının yeni fenomenleri Newton'un sadece-parçacık fiziği çerçevesi içine yerleştirmeye çalışmaları şaşırtıcı değildir.[5] Bununla birlikte 5. Bölüm bir *parçacık çerçevesinin kuantum fenomenlerini açıklayamayacağını* gösterir. Bu kitabın bir amacı da bir alan çerçevesinin kuantum fenomenlerini açıklayabileceğini göstermektir.[6]

Michael Faraday (1791-1867) modern alan kavramını tasavvur ettiği için modern fiziğin kurucusu olduğu söylenebilir. Faraday oldukça yoksul bir İngiliz ailenin çocuğu olarak

dünyaya geldi ve sadece en temel eğitimi aldı fakat 14 yaşından itibaren bir kitapçının yanında 7 sene boyunca yaptığı çıraklık sırasında hevesle okuyarak bilgi edindi. Bağımsız ve hevesli bir öğrenci olan Faraday özellikle çağdaş bilim eğitimi kitaplarında ve ders kitaplarında önerilen çalışma ilkelerinden yararlandı. 20 yaşındayken seçkin kimyacı Humphry Davy'nin derslerine katıldı ve ardından Davy'ye bu dersler sırasında aldığı notlara dayanan 300 sayfalık bir kitap gönderdi. Davy'nin gururu okşanmış ve etkilenmişti ve sonuç olarak Faraday'ı asistan olarak işe aldı. Faraday kısa sürede başarılı bir kimyager ve hatta daha da başarılı bir fizikçi olduğunu kanıtladı. Deneyleri sonucunda "Faraday elektromanyetik indüksiyon yasasını" keşfetti. Bu yasa –dönme hareketi verildiğinde elektrik akımı sağlayan– elektrik jeneratörünün temelini oluşturur. Ayrıca yine bu yasa sayesinde mıknatıslar ile elektrik akımları arasındaki kuvvetlerin daha kapsamlı bir bilgisi elde edildi ki, bu da –elektrik akımı verildiğinde dönme hareketi sağlayan, yani elektrik jeneratörünün yaptığı şeyin tersini yapan– elektrik motorunun temelini oluşturur. Bilime olan hizmetlerinden ötürü kendisine şövalyelik teklif edildi fakat o bunu dinî nedenlerden dolayı geri çevirdi. Servet biriktirmenin ve dünyevi ödül peşinde koşmanın Tanrı'nın sözüne karşı gelmek olduğuna inanan Faraday, "sonuna kadar sıradan Bay Faraday" olarak kalmayı tercih ettiğini söyledi. İngiliz hükümeti 1853'ten 1856'ya kadar devam eden Kırım Savaşı'nda kullanılmak üzere kimyasal silahların üretimi için tavsiyesini istediğinde Faraday etik nedenlerden dolayı yardım etmeyi reddetti.

Faraday mıknatısların "mutlak uzay" adını verdiği alanda uzanarak demir nesneleri çekme ve başka mıknatısları itme veya çekme becerilerinden etkilenmişti; tıpkı benim gibi ve şimdiye kadar etkilenmediyseniz sizin de etkilenmeniz ge-

rektiği gibi. Eğer mıknatıslarla hiç oynamadıysanız deneyin. Faraday'ın "mutlak uzaydan" kastettiği *vakum* olarak da bilinen, içinde madde olmayan uzaydı. Faraday bir mıknatıs yakınlarda olduğunda mutlak uzayın değiştiğini düşünüyordu. Bu değişim, bu "manyetik alan" uzayın kendisinin bir özelliğiydi. Manyetik alan uzaya ilave edilen ek bir öğe değil, uzayın kendisinin bir "durumu", yani "haliydi". Bir mıknatısın varlığı yanındaki uzayın doğasını değiştiriyordu.

Faraday alanları Einstein gibi ve günümüzde bizim düşündüğümüz gibi düşünen ilk bilim insanıydı. *Alanlar bizzat uzayın özellikleridir.* Uzayın özellikleri vardır. Örneğin uzayın manyetik alan özelliği olabilir. Faraday manyetik kuvvetlerin ve ayrıca elektrik kuvvetlerinin (ikisinin ilişkili olduğunu biliyordu) asla belirli bir mesafeden doğrudan eylemle değil, etkileşen cisimler arasındaki uzayı kaplayan alanlar vasıtasıyla etki ettiklerini ileri sürdü. Bu alanları doğrudan göremesek de, fiziksel olarak gerçek olduklarını ve sadece bilim insanlarının teoriler uydurmak ve hesaplar yapmak için icat ettikleri bir şey olmadığını göreceğiz.[7]

Faraday'dan 40 yıl sonra doğan James Clerk Maxwell (1831-1879) matematiğe Faraday'dan daha yatkındı ama onun kadar vizyoner değildi. Maxwell, Faraday'ın EM kuvvet hatları (alanları geometrik olarak tasvir etmenin bir yolu) adını verdiği hatları kullanmasının, Faraday'ın formel matematik becerileri yalnızca en basit cebiri içerdiği ve trigonometriye kadar uzanmadığı halde, "gerçekte çok üst düzey bir matematikçi olduğunu" gösterdiğini yazdı.[8] Maxwell EM alanının uzay ve zamanda nasıl değiştiğini gösteren, *diferansiyel denklemler* olarak bilinen doğru matematiksel ilişkileri buldu. Maxwell'in denklemleri elektrik ve manyetik alanların bilinen bütün EM etkilerini doğuracak şekilde nasıl davrandıklarını tanımlar. Bu denklemler elektrik ve manyetik alanları,

uzayın bir özelliği olarak kendi bağımsız varlığı olan tek bir EM alanının iki yönü olarak birbirine bağlar.[9]

EM Alan

Metalik olmayan bir masanın üstünde, iki parça streç film veya naylon poşetten kesilme iki şeride bir pelür kâğıt sürtün. Naylon şeridi ve pelürü köşelerinden tutup birbirlerine değdirmeden yaklaştırın. Birbirlerini çekmeleri gerekir. İki naylon şeridi birbirine değdirmeden yaklaştırın. Birbirlerini itmeleri gerekir. Büyük olasılıkla benzer fenomenleri elektrikli kurutucudan giysilerinizi çıkartırken de görmüşsünüzdür. Bunlar doğanın dört temel kuvvetinden birini kanıtlar: Elektromanyetizma.

Bu tarz elektriklenmiş nesnelerin *elektrik yüküne* veya basitçe *yüke* sahip olduğu söylenir. Bunun gibi deneyler iki tür elektrik yükü olduğunu ve aynı türden iki cisim birbirlerini iterken farklı türden iki cismin birbirini çektiğini gösterir. Görünüşe göre sürtme parçaların yüklenmesine neden olur, plastik ve pelür farklı türde yükler edinir.

Bütün bunlar atom hakkında bildiklerimizle çok iyi örtüşür. Bir atomun standart tasvirine göre, atom çekirdekte bulunan sürekli yüklü protonlar ile yüksüz nötronlardan ve çekirdeğin nispeten uzağında yörüngede dönen, sürekli yüklü elektronlardan oluşur. Bütün protonlar *pozitif* adı verilen bir şekilde, bütün elektronlar da *negatif* adı verilen başka bir şekilde yüklüdür. Elektronlar çekirdekten uzak bir yörüngede döndükleri için atomlarından kolaylıkla çıkarılabileceklerini varsaymak mantıklı olur. Dolayısıyla bir naylon parçasına pelür sürtmek bir cisimden elektronları çıkarıp diğerine aktarıyor olmalıdır. Naylonun ve pelürün kimyasal özellikleri elektronların hangi yönde hareket edeceklerini belirler. İki maddenin kimyası (elektronların atomlarına olan bağlanma

dereceleri) pelürden naylona elektron transferini destekler, böylece naylon negatif, pelür de pozitif yüklü hale gelir. Bu iki madde de "yalıtkan" maddelerdir, yani elektronlar kolayca içlerinden veya yüzeylerinden akamaz, böylece ikisi de içerdikleri fazla pozitif veya negatif yükü alıkoyma eğilimindedir. Öte yandan metaller elektronların kolayca akışını sağlayan "iletken" maddelerdir. EM kuvvetin belirli bir mesafeden etkili olduğuna dikkat edin: İki şerit parçası birbirlerine değmedikleri halde çekilir veya itilirler.

Evinizdeki ampullerin içinde akana benzer elektrik akımı bir teldeki elektron akışından başka bir şey değildir. Bütün elektrik akımları yüklü cisimlerin hareketleri, akışlarıdır; bunlar genellikle elektrondur, fakat proton veya elektrik yüklü atom veya molekül de (*iyon*) olabilir. Deneylerin elektrik akımlarının mıknatıslar üzerinde kuvvet uyguladıklarını göstermesi elektrik ve manyetizma arasında bir bağlantı olduğunu kanıtlar. Bu tarz deneyler *bütün manyetik kuvvetlerin, elektron ve proton gibi yüklü cisimlerin hareketlerine bağlanabileceklerini* gösterir.[10] Mikroskobik seviyede mıknatıs yoktur, sadece elektrik yüklü cisimler vardır. İki yüklü cisim birbirleri üzerinde elektrik kuvvetleri uygular ve hareket eden iki yüklü cisim de birbirleri üzerinde manyetik kuvvetler uygular.

Bu durumda, hiç yüklü cisim içermiyor gibi görünen kalıcı mıknatısları nasıl açıklayabiliriz? Kalıcı bir mıknatısın etkilerine sebep olan şey ise mıknatısın atom çekirdeklerinin yörüngesinde bulunan elektronlardan bir kısmının kendi merkezlerindeki ve yörüngedeki dönme hareketleridir. Tüm bu mikroskobik elektrik akımları mıknatıslar, ataşlar ve şövalye zırhlarında gözlemlenen makroskobik etkileri yaratacak şekilde koordine olmuş (dizilmiş) elektrik akımlarıdır. Deneyler *bütün elektrik ve manyetik kuvvetlerin ortak bir kaynağı –elektrik yükü– olduğunu* gösterir.

Maxwell'in teorisi elektrik ve manyetizmayı tek bir EM kuvvette birleştirdi. Maxwell'in denklemleri birleşik elektrik ve manyetik alanların ve elektrik yüklü cisimlerin dinamik (bu kelime "zamanla" veya "zaman geçtikçe" [cereyan eden] anlamına gelir) davranışlarını tanımlar. Maxwell'in teorisinde bir *EM alan* yüklü her cismi kuşatır. Bu alan, yüklü başka herhangi bir cismin (eğer mevcutsa) elektrik ve manyetik kuvvetleri algıladığı her yerde mevcuttur. Aralarında bir mesafe olan yüklü cisimler arasındaki uzayı kaplayarak birbirleri üzerinde kuvvet uygulamalarına neden olur. Bu alan her bir yüklü cismin etrafındaki uzayın bir durumudur. Elektrik yükleri etraflarındaki uzayı değiştirerek uzayın, bu uzay içine yerleştirilen başka herhangi bir yüklü cisim üzerinde kuvvet uygulamasına neden olur. "Daha güçlü" bir EM alan bu alanın yakınına yerleştirilen elektrik yükleri üzerinde daha güçlü bir kuvvet uygular. Doğal olarak, büyük miktardaki elektrik yükleri etraflarındaki uzayda daha güçlü EM alanlar oluşturur ve yüklü bir cismin oluşturduğu EM alan cisme yakın olan noktalarda daha güçlü ve cisimden uzak noktalarda daha zayıftır.

EM alanları doğrudan görmesek de etkilerini görürüz. Onları doğrudan görmediğimiz için fiziksel olarak gerçek olmadıkları, yalnızca yararlı matematiksel soyutlamalar oldukları sonucuna varmak yaygın bir kavram hatasıdır. Göreceğimiz üzere bu sonuç yanlıştır. EM alan fiziksel olarak gerçek bir uzay durumudur.

Güçlü Krallık Öyküleri: EM Dalgalar

Işığın bir dalga fenomeni olduğunu gösteren kanıtlar çok yakınımızdadır; aslına bakarsanız kanıtlar elimiz kadar yakınımızdadır. Şunu deneyin: Başparmağınız ile işaretparmağınızın uçlarını, aralarında bir milimetre ve bir gözünüzden birkaç santimetre uzakta olacak şekilde tutarak önünüzde ince,

uzun bir yarık oluşturun. Bir gözünüzü kapatıp bu yarıktan bakarak, arka plandaki aydınlık, beyaz bir duvara odaklanın. Parmaklarınız bulanık görünmelidir. Yarığın iki yanındaki bulanıklıkların örtüştüğü yerde, Şekil 2.3'tekine benzer, parmaklarınıza paralel olan parlak ve karanlık dar çizgiler görmeniz gerekir.

Deney yapmak için ara verin...

Bunlar Şekil 2.3'te görülene benzer yapıcı ve yıkıcı girişim çizgileridir; ancak bunları oluşturan iki ince yarık kaynağından gelen ışık arasındaki girişim değil, parmaklarınızın oluşturduğu daha geniş tek bir yarığın –ışığın dalga boyundan çok daha geniş– farklı kısımlarından kaynaklanan girişimdir. Bu milimetre genişliğindeki tek bir yarık, gözünüzün retinasının gözlem ekranı gibi işlev gördüğü, hepsi birbiriyle girişim yapan yüzlerce ince yarık kaynağı gibi hareket ederek ışığın bir dalga olduğunun açık kanıtını sunar.

Fakat ışık neyin içinde dalgadır? Dalgalanmayı yapan nedir? Thomas Young'ın 1801'de yaptığı çift yarık deneyinden yıllar sonra bile hâlâ bunun yanıtı bilinmiyordu. Daha sonra 1864'te Maxwell denklemlerinin şu anlama geldiğini gösterdi: EM alanlar elektrik ve manyetik etkiler arasındaki hızlı bir etkileşimle boş uzayda yayılabilir ve bu yayılmanın hızı yaklaşık olarak saniyede 3×10^8 metreye (saniyede 300.000 kilometreye) eşittir ki, bu da dünya etrafında saniyede yaklaşık 7 tur yapmaya eşdeğerdir. Bu rakam 1676'dan bu yana ışığın hızı olarak bilinir, o tarihte Olaf Roemer Jüpiter'in uydularından birinin gözlemlerine dayanarak ışığın hızının saniyede yaklaşık 3×10^8 olduğu argümanını ileri sürdü.[11] Maxwell şöyle yazdı: "[ışığın hızının deneysel ölçümüyle] sonuçların uyuşması şunu gösteriyor gibi ... ışık elektromanyetik yasalara göre alan boyunca yayılan, elektromanyetik bir bozunumdur."[12] Dalgalanmayı yapan EM alandı.

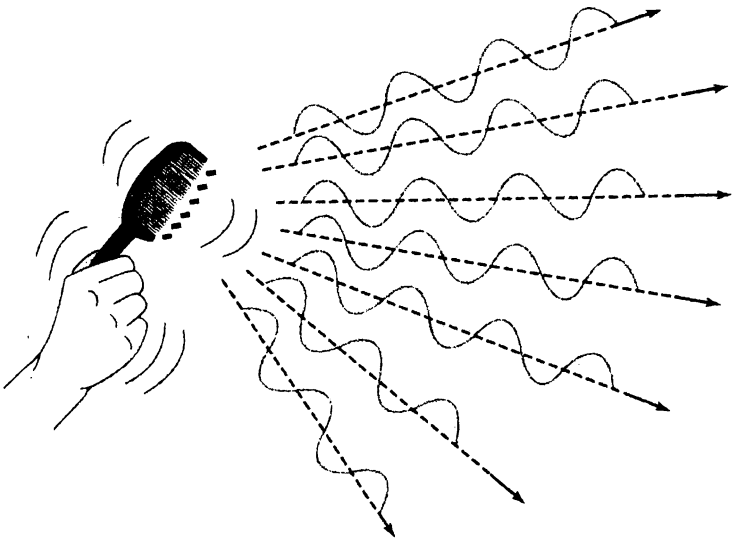
Bu daha önce görülmemiş bir şeydi. Faraday ve Maxwell'in çalışmalarından önce, dalga hareketinin Newton mekaniğiyle açıklandığı Newton fiziği bütün dalgaların maddi bir vasıtanın bozunumları olduğu görüşüne yol açmıştı. Bu tarz mekanik dalgaların bilinen örnekleri vardır: Su dalgaları sudaki mekanik bozunumlardır (su moleküllerinin bozunumları) ve ses dalgaları da havadaki mekanik bozunumlardır (hava moleküllerinin bozunumları). Su ve hava fiziki maddelerdir. Görünüşe göre Newton fiziği ışığın da henüz bilinmeyen maddi bir vasıta içinde bir dalga olması gerektiğine işaret ediyordu, ancak bunun yanlış olduğu ortaya çıktı. Doğrusu ışık dalgaları için *maddi* bir vasıta yoktur. Vasıta evrensel EM alandır ki, bu mutlak uzayın temel bir özelliğidir (Faraday'ın belirtmiş olduğu gibi) ve maddeden oluşmaz.[13] Maxwell'in ışığın bir EM dalga olduğu öngörüsü, *boş uzayın özellikleri olduğunun, mutlak uzayın gerçekte fiziksel aktiviteden yoksun olmadığının* özgül, sayısal kanıtıydı. Einstein 1900'den 1916'ya kadar özel ve genel görelilik teorilerini geliştirirken bu görüşten giderek daha çok yararlandı. Bu görüş en az 1973'ten bu yana kuantum fiziğinin esasını oluşturmuştur. Geriye dönüp baktığımızda, alanlar kuantum olan her şeyin merkezinde bulunur, fakat bu 1973'e dek tam olarak anlaşılmadı.[14]

1887'de Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü'nden Alman fizikçi Heinrich Hertz, Maxwell'in EM dalgalar teorisini deneyle doğruladı. Teori şunu öngörüyordu: Elektron veya proton gibi elektrik yüklü cisimler ileri geri titreşirlerse EM dalgaları tüm yönlerde yayarlar ve dalga titreşimleri dalga hareketinin yönüne dik olur. Örneğin böyle dalgaları, plastik bir tarağı pelür kâğıda sürterek ve sonra tarağı sallayarak siz de oluşturabilirsiniz (Şekil 4.1). Ancak bu dalgaları tespit edemezsiniz, çünkü saniyede sadece birkaç kez sallayabilirsiniz ve sonuçta oluşan EM dalgalar ölçülemeyecek kadar az enerji

taşırlar. Hertz elektrikli bir cihaz yaptı. Bu cihaz elektrik yükünün birbirlerinden küçük bir hava boşluğuyla ayrılmış iki küçük metal top üzerinde toplanmasını sağlıyordu. Toplar arasındaki yoğun EM alan havanın kıvılcım saçmasına (elektriksel olarak iletken hale gelmesine) yol açarak elektronların saniyede 500 milyon (5×10^8) kez boşlukta titreşmelerine neden oluyordu. Bu dans eden elektronlar dışarıya bir *EM dalga* gönderiyordu: Işık hızında dışa doğru hareket eden, saniyede 5×10^8 kez titreşen EM alanlar.

Dalga hareketini sayısal olarak tanımlamak için iki yeni kelimeye ihtiyacımız var. Her saniye gönderilen tam ileri geri titreşimlerin sayısına dalganın *frekansı* denir ve saniyedeki titreşim sayısıyla, yani Hz olarak kısaltılmış *hertz*'le ölçülür. Dalga şeklinin uzaydaki komple bir tekrarının uzunluğu *dalga boyudur*. Örneğin yüklü bir tarağı saniyede üç kez sallarsanız, her saniye üç tam dalga boyu gönderirsiniz ve bu dalganın frekansı 3 Hz olur. Bu dalganın dalga boyunun 100.000 km olduğu görülür. Açıkça görüldüğü gibi, Şekil 4.1 ölçekli değildir.

Frekansı 5×10^8 Hz olan Hertz dalgaları elektronların *12 m uzağa yerleştirilmiş* basit bir metal halka içindeki bir hava boşluğunda aynı frekansta ileri geri titreşmelerine yetecek kadar enerji taşıyordu. Bu Maxwell'in emsalsiz EM dalgalar öngörüsünü doğruladı. Lütfen şu deneyi kafanızda canlandırın: Hertz'in aygıtı elektronları iki metal top arasında ileri geri titreştirir ve esasen boş uzayda (odadaki havanın iletim üzerinde çok az etkisi vardır) *12 m uzakta* bulunan diğer elektronlar da titreşir! Bu mucizevi görünür. Göndericideki elektronları alıcıdaki elektronlara bağlayan nedir? Yanıt şudur: Evreni kaplayan EM alan. Bu çok sayıda kitle iletişim aracının kesintisiz elektronik sinyal yaydığı çağımızda önemsiz görünebilir, ancak Hertz'in zamanında müthiş bir şeydi. Benzer şekilde,



Şekil 4.1 Yüklü bir cismi salladığınızda bu cisim evrensel EM alan vasıtasıyla dışa doğru bir EM dalga gönderir. Şekil ölçekli çizilmemiştir. Elinizi saniyede yalnızca birkaç kez sallayarak dalga boyu yaklaşık 100.000 km –ay ile dünya arasındaki mesafenin dörtte biri!– uzunluğunda EM dalgalar oluşturabilirsiniz.

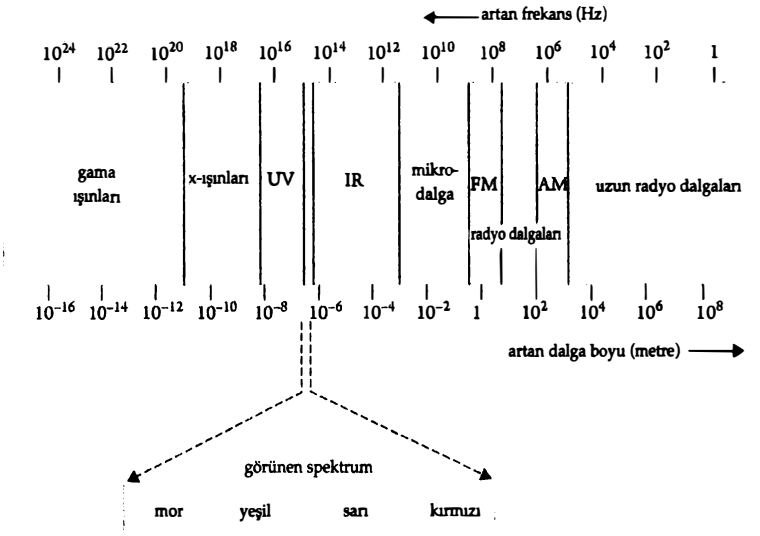
kuantum fiziği de bir gün normal olarak görülecek müthiş, inanılmaz fenomenler sunuyor.

Hertz'in EM dalgaları alan metal halkada da dalga boyunu ölçebilen bir cihaz vardı ve dalga boyu 0,6 metre olarak ölçüldü. Bu bilgi ve bilinen frekans sayesinde Hertz dalgaların hızını hesapladı. Bunun tam da Maxwell'in öngörmüş olduğu gibi ışık hızı olduğu ortaya çıktı.[15] Bu Maxwell'in teorisini doğrulayan ve modern iletişim teknolojisinin habercisi olan, tarihteki en önemli deneylerden biriydi.

Bütün EM dalgalar gibi Hertz dalgaları da ışık hızında yol alır: Saniyede 3×10^8 m. Ancak yaklaşık 600 nanometrelik gö-

rünür ışığın dalga boyu 0,6 metrelik Hertz dalgalarından çok daha kısadır. Bir nanometre (nm) 1 m'nin milyarda biridir (10^{-9}), dolayısıyla Hertz dalgalarının boyu ışığın dalga boyundan milyon kat uzundur. Tahmin edebileceğiniz gibi, Hertz dalgaları *radyo dalgalarıdır*; bunlar radyo, televizyon, radar ve diğer elektronik araç gereçler tarafından tespit edilir. Tıpkı Hertz deneyinin bir gönderici ve alıcı gerektirmesi gibi, her EM dalga uzayda, elektron ve diğer yüklü cisimlerin titreşmelerine neden olan bir göndericiden, buna tepki olarak titreşen başka elektronlar içeren bir alıcıya doğru yol alır. Işık dalgalarının çoğu için gönderici, atomlar içinde hareket eden elektronlardır. 400 ila 700 nm'lik dalga boyları arasında yayılan görünür spektrum mordan kırmızıya kadar gökkuşağının farklı renklerine karşılık gelir.

Bütün EM dalgalar ışık hızında, yani saniyede 3×10^8 m yol aldığı için, *dalga boyları daha kısa olan dalgaların frekansları daha yüksek (büyük), dalga boyları daha uzun olan dalgaların frekansları daha alçak (küçük) olmalıdır*. Örneğin saniyede 2 kez sallanan (2 Hz) bir taraktan (Şekil 4.1) çıkan dalgaları, daha düşük bir frekans olan 1 Hz'de sallanan başka bir taraktan çıkan dalgalarla kıyaslarsak, ikinci tarağın gönderdiği dalgaların dalga boyu daha uzun, aslına bakarsanız öncekinin iki katı olmalıdır. Enerjiyle ilgili bu tür ikinci bir yararlı ilişki daha vardır: Başka şeyler eşit olduğu sürece, *kısa EM dalga boyları (yüksek frekans) daha fazla enerji iletir; uzun EM dalga boyları (düşük frekans) daha az enerji iletir*. Bu mantıklıdır, çünkü daha yüksek frekansta daha fazla sallanma –daha fazla hareket– vardır; dolayısıyla daha çok enerji iletilir. Örneğin frekansı 2 Hz (saniyede gelen 2 dalga) olan bir EM dalga frekansı 1 Hz olan bir dalgaya kıyasla saniyede iki kat fazla enerji iletir; tabii, iki dalganın da titreşim genişlikleri eşit olduğu müddetçe.



Şekil 4.2 Elektromanyetik spektrum

Şekil 4.2, Hertz'in "güçlü bir krallık" ve "büyük elektrik âlemi" olarak tanımladığı tüm EM spektrumu gösteriyor.[16] Bu krallığı sağdan sola inceleyelim.

En uzun (yani dalga boyu en uzun) EM dalga olan radyo dalgaları anten ve elektrik devreleri gibi insan yapımı elektronik araç gereçlerle gönderilip alınabilir. Verici antende elektronlar kısa mesafelerde titreşerek bir EM dalga oluşturur; alıcı antende ise gelen bir EM dalgaya karşılık elektronların titreşmesi sağlanır. Radyo dalgaları ayrıca doğada aynı anda yıldızlardan, galaksilerden ve büyük patlamadan yayılır. Radyo dalgaları yaklaşık 100 Hz'lik çok düşük frekanslardaki, dünya boyutundaki dalga boylarından, 10^3 Hz (kilohertz) 100 km'lik; 10^6 Hz (megahertz) 100 m'lik ve 10^9 Hz (gigahertz) 10 cm'lik dalga boylarına kadar değişir. Bunun yukarısında, dalga boyları santimetrelerden milimetrelere kadar değişen, 10^9 ila 10^{11} Hz arasındaki daha yüksek frekanslarda, mikro-

dalga fırınları ve doğal süreçlerin yaydığı *mikrodalga aralığı* bulunur. Şekildeki kızılötesine (IR) atladığımızda, *görünür spektrum* (hatırlarsanız spektrum "aralık" anlamına geliyordu) kırmızı (700 nm, 4×10^{14} Hz) ile mor (400 nm, 8×10^{14} Hz) arasında dağılım gösterir. Bu frekansların özelliği insan gözündeki ışımaya duyarlı hücrelerin tepki verdikleri frekanslar olmalarıdır. Bu görünür ışığın çoğu atomlarda hareket eden elektronlardan kaynaklanır.

Görünür spektrum, uzun dalga tarafındaki *kızılötesi* (IR: enerji ve frekansta "kızılın altı") ile kısa dalga tarafındaki *morötesi* (UV: "morun yukarısı") arasında kalan çok küçük bir bölgedir. IR'nin dalga boyları 1 milimetre ila 1/1000 milimetre –bebek pudrasının bir zerresinin büyüklüğü– arasında değişir. Doğal bir ısıl hareket içinde rastgele hareket eden moleküllerin normalde IR yaymaları, bütün cisimlerin, moleküllerinin bastırılamaz ısı enerjileri nedeniyle IR yaydıklarına işaret eder. Güneş veya yanan bir kütük gibi daha sıcak cisimler daha fazla IR, dünya veya bir buz küpü gibi daha soğuk cisimler daha az IR (birim yüzey alanı başına) yayar. Eğer elinizi bir ateşin yanına koyarsanız, hissettiğiniz sıcaklık, ateş içindeki moleküllerin yaydığı ve tepki olarak elinizdeki titreşen (ısınan) moleküllerin aldığı IR'nin bir sonucudur.

UV normalde atomlar içindeki daha yüksek enerjili elektronlar tarafından yayılır. Güneş açıkça görünür ışık yayar, aslında güneşin spektrumu görünür dalga boylarında doruğa ulaşır (yani birim dalga boyu aralığı başına en çok enerjiyi taşır). Dolayısıyla güneşin komşu spektrum bölgeleri olan IR ve UV'de de bol miktarda ışıması şaşırtıcı değildir. IR bizi ısıtır ve elbette gözlerimiz görünür ışınları tespit eder. UV'nin birçok biyolojik molekülü uyarmaya (içlerinde titreşimlere yol açan) uygun frekansı vardır. Frekansı daha yüksek olan UV'nin biyolojik hücreleri tahrip ederek muhtemelen kansere

yol açmaya yetecek enerjisi vardır. Çıkarımlardan biri de, gelen UV'nin çoğunu soğuran, dünyadaki yüksek rakımlı ozon (O_3) tabakası oluşana dek kara hayvanlarının evrim geçirememiş olduklarıdır. Ve şimdiye dek tahmin etmiş olabileceğiniz gibi, UV aynı zamanda güneş yanıklarına da yol açar. İşte bu yüzden görünür güneş ışığının toprağa ulaşmadığı bir günde bile güneşten yanabilirsiniz.

Normalde *x* ışınlarını üretenler yüksek enerjili elektron veya protonlardır. Bunlar bir metal hedefe çarparak metal atomunun içteki "elektron kabuğundan" bir elektronu yörüngesinden çıkarırlar. Böyle her bir atomun içinde, daha sonra dıştaki bir elektron içe doğru "düşüp" içteki eksilen elektronun yerine geçerek, dalga boyu tipik olarak bir atom büyüklüğünde olan, yüksek enerjili bir x ışını fotonu yayar.

Gama ışınları yüksek enerjili nükleer süreçlerden kaynaklanır ve dalga boyları yaklaşık bir atom çekirdeği büyüklüğündedir. X ışınlarının ve gama ışınlarının frekansları çok yüksektir. Bu miktar x ışınları için yaklaşık bir milyar kere milyar (10^{18}) Hz ve gama ışınları için de bir trilyon kere trilyon (10^{24}) Hz'dir. Ayrıca bütün çekirdeklerde ve bazı atomlarda meydana gelen yüksek enerjili süreçleri beraberinde getiren yüksek enerjiye sahiptirler. X ışınlarının ve gama ışınlarının biyolojik molekülleri iyonize etmeye yetecek (elektronlarını çıkaracak) kadar enerjileri vardır. Bu hayvanlar için tehlikeli olabilse de, olumlu bir tarafı vardır: X ışınları biyolojik maddeye derinlemesine nüfuz ederek içimizi ameliyata gerek olmadan inceleyebilmemizi sağlar ve gama ışınları da hastalıklı hücreleri öldürerek bazı kanserleri tedavi edebilir.

Alanlar Gerçektir

Bütün EM dalgalar ışığa benzer. Işığın ayırt edici tek özelliği insan retinasının evrime dayalı nedenlerden ötürü onu

tespit edebilmesidir.[17] Çoğumuz ışığı fiziksel bakımdan gerçek bir şey olarak görürüz. Eğer gerçekse buradan şu sonuç çıkar: Bir şeyin ancak insanlar onu elektronik aletlerin yardımı olmadan, doğrudan algılayabiliyorsa gerçek olduğu gibi dar görüşlü, tekbenci bir iddiada bulunulmadığı müddetçe, bütün EM dalgalar fiziksel olarak gerçektir.

Görünür spektrum nispeten çok küçüktür (Şekil 4.2). Sizi daha ne kadar fazlasının kuşattığını düşünün. Tıpkı EM dalgalar (ve çok daha fazlası)[18] gibi, uzaydan ve alma aralığınız içindeki her radyo ve TV istasyonundan gelen radyo dalgalarıyla (bunu radyo veya TV'nizi açarak kanıtlayabilirsiniz), büyük patlamadan çıkan mikrodalgalarla ve güneşten gelen IR ve UV ile daima kuşatılmış haldesiniz.[19] Üstelik güneşten, ampullerden, görünür yansımalardan vs. çıkan bütün görünür frekanslar dört bir yanınızdan hızla geçiyor. Siz ise retinanızda bunların yalnızca çok ufak bir kısmını yakalıyorsunuz. Demokritos ve Newton'a ait olan, uzayın yalnızca aralarında muazzam boşluk parçaları olan, çok küçük parçacıklardan oluştuğu kavramı çok yanlıştır. Buna karşılık, kendimizi salt EM âlemiyle sınırlasak bile, uzayın her milimetreküpü çok sayıda örtüşen fiziksel fenomenle doludur; burası hakikaten güçlü bir krallıktır.

Heinrich Hertz'in deneyi ve uzaydaki bütün benzer EM iletimler alanların gerçekliğine dair güçlü, doğrudan kanıtlardır. Hertz'in kanıtladığı gibi, eğer *buradaki* elektronları titreştirirseniz, öngörülebilir bir zaman aralığından sonra, tepki olarak *oradaki* elektronlar da titreşir. Ne zaman bir radyo istasyonunu ayarlasanız bu sihir (elbette bu kelimeyi sadece mecazi anlamda kullanıyorum) meydana gelir. Bu tarz zilyonlarca kanıt EM alanın fiziksel olarak gerçek olduğunu her gün ispatlar.

Kanıtlanmış bir ilke olan enerjinin korunumu ilkesinde EM dalgaların fiziksel olarak gerçek olduğunun ilave kanıtı

vardır. Bu ilke *EM dalgaların enerji taşıdığına* işaret eder. Bunun nedeni şudur: Diyelim Hertz'in radyo vericisi Mars'a bir EM dalga göndersin ve dalga da mesafeyi ışık hızında 12 dakikada katetsin. Enerjinin vericiden alıcıya gitmesi gerekir, çünkü alıcının elektronlarının titreşmesinin sağlanması için iş yapılması gerekir ve iş de enerji gerektirir. Bu 12 dakikalık sürede bu enerji nerededir? Vericide değildir (mesajı gönderdikten sonra kapatılabilir) ve henüz alıcıda da değildir. Ve enerji asla kaybolmaz. Öyleyse verici ve alıcı arasındaki uzayda, EM alanda olmalıdır. QED (Latince "*quod erat demonstrandum*" yani "kanıtlanması gerekirdi" ifadesinin kısaltması) akıllıca argümanınızla başkalarını etkilemek için yararlı bir terimdir.

Filozoflar gerçeğin ne olduğu konusunda fikir birliği içinde olmayabilirler, fakat çoğu fizikçi için enerjiden daha gerçek bir şey yoktur. Kütleçekimi alanının ve diğer fiziksel alanların gerçekliğine dair benzer bir enerji esaslı argüman ileri sürülebilir. Bu Maxwell ve Einstein'ın EM alanın gerçekliğine dair argümanlarıydı.[20]

Öznel idealizm adı verilen bir ilkeyi 18. yüzyılda, İngiliz kökenli İrlandalı filozof Piskopos George Berkeley öne sürdü. Maddenin varlığını inkâr eden bu ilke, taş ve masa gibi cisimlerin sadece insan zihnindeki fikirler olduklarını ve "algılanmadan" var olamayacaklarını ileri sürer. Bu bana yanlış yönlendirilmiş bir fantezi gibi geliyor, belki size de öyle geliyor olabilir. Ne var ki bu ilke, bu kitapta ele alınan kuantum fenomenlerinin bazılarının fiziksel olarak gerçek olduklarını reddeden bazı fizikçiler tarafından en temel fiziksel seviyede diriltilmiştir. Bu birçok soruya yol açan bir görüştür: Algı olarak nitelenen nedir? Bir bebek taş ve masaları algılayabilir ve dolayısıyla onları varlığa getirebilir mi? IQ'su çok düşük bir insan bunu yapabilir mi? Bir şempanze? Bir pire? Kimse onları algılamazken taşların ve masaların kaybolduklarına mı

inanmamız gerekiyor? Ya onları sadece bir kamera algılıyorsa? Demek istediğimi anladınız: Öznel idealizmde bazı problemler var. Çok yönlü bir entelektüel ve yazar olan İngiliz Samuel Johnson ile Piskopos Berkeley arasında bir keresinde ünlü bir konuşma geçer. Johnson'un biyografisini yazan James Boswell de Johnson'a eşlik ediyordur ve Johnson'un Berkeley'le görüşmesinden hemen sonra onunla konuşur. Boswell şöyle yazar:

> Kiliseden çıktıktan sonra, Berkeley'in, maddenin var olmadığını ve evrendeki her şeyin salt düşünsel olduğunu kanıtlamak için ileri sürdüğü ustalıklı yanıltmacası hakkında bir süre ayaküstü konuştuk. Şunu fark ettim, Berkeley'in doktrininin doğru olmadığına kanaat getirmemize rağmen bunu çürütmek imkânsızdı. Johnson'un ayağıyla büyük bir taşa olanca gücüyle vurup geri sıçrayarak, "Ben de *işte böyle* çürütürüm" diye şevkle yanıt vermesini asla unutmayacağım.[21]

Johnson'un ayağının geri sıçramasına bakılacak olursa, taş oldukça büyük bir madde kütlesinden oluşuyor olmalıydı. Johnson gibi çoğumuz da böyle katı ve heybetli cisimleri gerçekliğin somut kanıtı, idealist fanteziyi çürütmeye yetecek kadar gerçek olarak görürüz. Öyleyse alanların kütlesi olup olmadığını ve taşların alanlardan oluşup oluşmadıklarını araştıralım.

Alanlar ve $E = mc^2$

Einstein'ın kütle ve enerji eşdeğerliği ilkesini hatırlayalım: Hareketsiz cisimlerde, kütlesi olan bir cismin enerjisi $E = mc^2$ ve enerjisi olan bir cismin kütlesi ise $m = E/c^2$'dir. EM alanların

enerjiye sahip olduklarını gördük. Bu, dışa doğru ışık hızında ışımak yerine hareketsiz duran alanlar için bile doğrudur. Hareketsiz bir elektrik alanının elektrik yüklü cisimler üzerinde kuvvet uygulama ve dolayısıyla üzerlerinde iş yapma becerisi vardır; böyle bir iş yapma becerisi ise enerji dediğimizde tam olarak kastettiğimiz şeydir. Böylece kütle-enerji eşdeğerliği *hareketsiz EM alanların* kütlesi olduğuna, bu da Johnson'un taşı gibi, ivmeye karşı koyduklarına ve ağırlıkları olduğuna işaret eder. Enerji ve alanları fiziksel olarak gerçek kabul etmek için ayakları yere basan bir nedene ihtiyacımız varsa, bu kesinlikle odur. Johnson'un taşı gibi, alanların da ağırlığı vardır. Kapalı bir bölge içinde yeterli EM alanı biriktirebilirseniz buna tekme atabilirsiniz.

Şunu deneyin veya en azından hayal edin: İki mıknatısı birbirlerine yapışacak şekilde bir masanın üzerine yerleştirin. Buna A *konfigürasyonu* deyin. Şimdi bunları ayırın, tekrar masanın üzerine koyun. Buna da B *konfigürasyonu* deyin. Soru: Hangi konfigürasyonda bu sistemin (alanlarıyla birlikte mıknatıslar) enerjisi en fazladır veya enerjileri iki durumda da aynı mıdır? (İpucu: Enerji iş yapma becerisi olduğu için, bir sistem üzerinde iş yaptığınızda, enerjinizin bir kısmını harcamanız ve bu sistemin enerjisini artırmanız gerekir.)

Şimdi bunun üzerinde düşünün...

Eğer cevabınız B konfigürasyonu ise doğrudur. Mıknatısları ayırmak için iş yapmak zorundaydınız, dolayısıyla manyetik alana enerji eklediniz.

İşte bir devam sorusu: Hangi konfigürasyonda sistemin kütlesi en fazladır, yoksa iki konfigürasyonda da kütleleri aynı mıdır?

Tekrar düşünün...

Yanıt gene B'dir. En fazla enerjiye sahip konfigürasyonun kütlesi en fazladır, çünkü $E = mc^2$'dir.

Bu mucizevi görünür. Sadece enerji değil, kütle de ayrılmış iki mıknatıs arasındaki boş uzay adı verilen yerde bulunur. Bu uzay gerçekte hiç de boş değildir. Tıpkı taş gibi ağırlığı vardır.

Ancak EM alan enerjisinin sıradan madde kütlesi üzerinde önemli bir etkisi yoktur, çünkü sıradan madde atomlardan oluşur ve bir atomun EM alan enerjisi atomun toplam enerjisinden (mc^2, m atomun kütlesidir) milyonlarca kat küçüktür. Atomlar içinde etkili olan hâkim kuvvet EM kuvvet değil, kuarklarını ve çekirdeği bir arada tutan baskın kuvvettir. Nasıl EM kuvvet EM alanla tanımlanıyorsa, baskın kuvvet de bir *baskın kuvvet alanıyla* tanımlanır.

Baskın kuvvet alanının enerjisinin sıradan madde kütlesi üzerinde önemli bir etkisi var mıdır? Yanıt kesinlikle evettir. "Temel parçacık ve etkileşimlerin standart modelini"[22] gösteren bir grafiğe bakarsak, bir protonu oluşturan üç kuarkın kütlelerinin 0,012 kütle birim, bir protonun toplam kütlesinin ise 0,938 kütle birim olduğunu görürüz (bu rakamların ifade edildiği kütle birimleri yüksek enerjili fizik deneyleri için üretilmiştir ve bizim konumuz dahilinde değildir). Bir nötronu oluşturan üç kuarkın kütleleri 0,015 olduğu halde, bir nötronun toplam kütlesi 0,940 birimdir. Dolayısıyla proton ve nötronun kütleleri, onları oluşturan kuarkların kütlelerinin toplamından sırası ile 78 ve 63 kat fazladır. Bu mantıklı değildir. Bunun nedeni kuarkları bir arada tutan baskın kuvvet alanının neredeyse bütün enerjiyi ve dolayısıyla neredeyse bütün kütleyi protonlara ve nötronlara vermesidir. Tekil kuark kütlelerinin toplam kütlenin sadece küçük bir kısmında payları vardır.

Yukarı ve aşağı kuark kütlelerine ait bu sayılar yüksek enerjili fizik deneylerinden yalnızca dolaylı olarak çıkarsanır ve son derece hatalıdır, çünkü tekil kuarkları dolaysız olarak

incelemek için izole edemeyiz. Kuarkların tekil kütlelerine dair çok daha iyi bir tahmin teorik fizikçi Frank Wilczek'in çalışmalarından elde edilmiştir. Wilczek zorlu bir hesaplama çalışmasıyla, proton ve nötronların içindeki üç kuark arasında etkili olan baskın kuvvet alanının kütlelerini hesaplamak için kuantum alan teorisinin oldukça karmaşık bir özelliğini[23] kullandı. Bu teorik hesaplamanın sonucu, protonların ve nötronların kütlelerinin tam olarak %95'inin, onların baskın kuvvet alanlarının enerjisinden kaynaklandığını gösterdi.[24] Bu bizim bu alanların kütlelerine dair en iyi tahminimizdir.

Bunun üzerinde biraz düşünelim. Bütün sıradan maddeler atomlardan oluşur ve normal atomların kütlelerinin yaklaşık %99,95'i proton ve nötronlarında bulunur. Wilczek'in hesaplamasından, *sıradan maddenin kütlesinin %95'inin maddenin baskın kuvvet alanlarının kütlesi içinde bulunduğu* sonucunu çıkarırız. Evrendeki sıradan maddenin kütlesi sözde "katı" cisimlerden değil, neredeyse bütünüyle kuvvet alanlarından gelir! Mikro seviyede taşlar bile o kadar katı değildir; "madde dışı" alanlardan oluşurlar. Gelgelelim bunlar kütlelidir (yani kütleye sahiptir).

Ya sıradan maddenin kütlesinin kalan %5'i? Bizzat kuarkların ve elektronların kütlesi? 1964'te İngiliz fizikçi Peter Higgs başka fizikçilerle birlikte günümüzde *Higgs mekanizması* olarak bilinen bir hipotez geliştirdi. Bu hipotez kuarkların, elektronların ve kütle taşıyan diğer temel kuantumların kütlelerini nasıl edindiklerini açıklar. Fizikçiler 2012'de İsviçre'nin Cenevre kentindeki Yüksek Hadron Çarpıştırıcısı adındaki yüksek enerjili hızlandırıcıda yeni bir kuantum türü keşfedip 2013'te bunu *Higgs bozonu* olarak tanımladıklarında Higgs'in hipotezi deneysel olarak güçlü bir doğrulama kazandı. Bu keşif Higgs hipotezinin artık deneysel olarak doğrulanmış bir teori olduğu anlamına gelir.

Higgs teorisine göre bütün evrende önceden bilinmeyen bir temel alan –*Higgs alanı*– mevcuttur. Kuark ve elektron gibi bazı temel kuantumlar Higgs alanıyla etkileştiği halde, foton gibi bazı kuantumlar etkileşmez. Higgs alanıyla etkileşim kuantumlara atalet –ivmeye direnç– kazandırır ve ivmeye olan bu dirençle kastettiğimiz kütledir (3. Bölüm). Dolayısıyla *Higgs etkileşimi kuantumlara kütle kazandırır*. Bundan dolayı maddenin ışımadan tek farkı, madde Higgs alanı ile etkileştiği halde ışımanın etkileşmemesidir ve bu da maddeye kütle verirken ışımaya vermez. Bazı maddi kuantumların kütleleri diğerlerinden daha büyüktür, çünkü Higgs alanıyla daha güçlü bir biçimde etkileşirler. Bu alanın doğasını 5. Bölüm'de daha ayrıntılı olarak ele alacağım.

Bilinen bütün temel alanlar gibi, Higgs alanı da kuantizedir; alan enerjisi demetlerinden oluşur (5. Bölüm). Higgs alanının kuantumuna –enerji demeti– verilen isim *Higgs bozonudur*. Bu, daha önce belirttiğimiz gibi, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda yapılan yakın tarihli deneylerde tanımlandı. Teorinin öngörmüş olduğu gibi, Higgs bozonunun kendi kütlesi vardır; aslına bakarsanız, bu 133 proton kütlesine eşit, oldukça büyük bir kütledir.

Özetleyecek olursak, taşlar kuark ve elektronlardan oluşur, bunların Higgs alanıyla etkileşimleri de taşın kütlesinin %5'ini sağlar. Kalan %95 ağırlıklı olarak kuarkları protonlar ve nötronlar halinde ve protonları ve nötronları da çekirdeği oluşturacak şekilde bağlayan baskın kuvvet alanından kaynaklanır. Sonuçta, bir taş alanlardan –tekme atabileceğiniz alanlar– başka bir şey değildir.

Kuantumun İlk Dönemlerine Ait Dört Öykü

1900 itibariyle fizikçilerin çoğu şu sonuca vardı: Madde Newton'un teorisinin tanımladığı, küçük, maddi parçacıklar-

dan oluşur ve parçacıklar arasındaki kuvvetlere de doğrudan temas ve belirli bir mesafeden etki eden kütleçekimi ve elektromanyetizma kuvvetleri neden olur; en azından EM kuvvet, büyük mesafelerde kuvvetler yayan, uzayı kaplayan alanlar vasıtasıyla etkili olur. Bu vargılar kısa sürede değişmeye başladı.

Geriye dönüp baktığımızda, bu tablodaki ilk kusurun, 19. yüzyılın sonlarına doğru fizikçiler ısıtılmış cisimlerden çıkan ışımayı bariz bir araç –yani Faraday ve Maxwell'in alan teorisi– kullanarak açıklamanın olanaksız olduğunu gördüklerinde ortaya çıktığını görebiliriz. 2. Bölüm'de Max Planck'ın bu problemi 1900'de çözdüğü gördük, fakat Planck önceki teorilerde temeli olmayan, küçük bir varsayımda bulunmuştu: Isıtılmış bir cismin atomlarının yaydığı enerji kuantizedir (yani sadece izin verilen belirli miktarlarla sınırlıdır). Bu, kuantumun bilim sahnesine ilk girişiydi; zamanın rüzgârlarında zar zor fark edilen, önemsiz bir şey.

Tarihte bir kuantum açıklaması gerektiren ikinci fenomen *fotoelektrik etkiydi.* Bir metalin üzerine ışık düştüğünde metalin içindeki elektronlar genellikle ya dışarı atılır ya da yüzey boyunca akarlar. Bu güneş ışığından gelen, "fotovoltaik" elektriğin temelini teşkil eder. Klasik EM teori bu etkiyi en azından nicel olarak şu şekilde açıklayabilir: Işık titreşen bir EM alandır ve metal bir yüzeye çarptığında, bu titreşen alan yüzey üzerinde yayılarak bazıları kaçana kadar elektronları sallar. Bu akla yatkındır fakat nicel bir problem vardır. Klasik EM alan metal üzerinde homojen bir biçimde yayılır; öyle ki, yüzey üzerindeki belirli bir nokta üzerinde, o noktadaki bir atom bir elektronun kopması için gerekli ışıma enerjisini absorbe etmeden önce epeyce zaman gerekir. Hesaplamalar

bir atomda yeterli enerjinin birikmesi için birkaç saniye gerektiğini gösterirken, deney ışık yüzeye çarpar çarpmaz ilk elektronların fırladığını gösterdi.[25]

Dolayısıyla bir problem vardı. 1905'te Einstein çözümün Planck'ın fikrinin doğal bir uzantısında bulunduğuna dikkat çekti. Planck atomların yaydığı enerjinin izin verilen belirli değerlerle sınırlı olduğunu varsaymıştı. Kuantize salıncak örneğinde olduğu gibi, (2. Bölüm) bu enerjinin kısa patlamalar halinde yayıldığına işaret eder. Einstein bu mantığı bir adım ileri taşıdı ve bu patlamaların uzayda yolculuk eden, küçük ışıma kümeleri yarattığını ve ışığın bu kümelerden oluştuğunu varsaydı. Bu durumda her bir küme (günümüzde buna *foton* diyoruz) bütün enerjisini metal yüzeyin çok küçük bir bölümüne iletebilirdi. Eğer bu bir elektronu yerinden etmeye yeterliyse, o zaman her bir foton bir elektronu *hiç zaman gecikmesi olmaksızın* yerinden edebilirdi. Bu kümeler problemi çözdü ve nihayet Einstein da Nobel Ödülü'nü kazandı.

Kuantumun göründüğü üçüncü durum, çeşitli kimyasal elementlerin yaydığı ve soğurduğu EM spektrumlarla bağlantılı olarak ortaya çıktı. 1. Bölüm'de hidrojenin yayılım spektrumunu ele aldık. Hidrojen gazı yalnızca bazı tam dalga boylarında ışıma yayar. Peki, neden özellikle bu dalga boyları da başkaları değil? Bu fenomen ilk olarak 1802 gibi erken bir tarihte fark edildi. Bu tarihte güneşten gelen dalga boylarının tüm spektrumunu tespit etmek için prizmalar ve başka cihazlar kullanan bilim insanları bazı dalga boylarının güneşin dalga boylarının gökkuşağında mevcut olmadığını keşfettiler. Günümüzde bu eksik dalga boylarının güneşi kuşatan gaz atmosferindeki atomlar tarafından soğurulduğunu biliyoruz.

1913'te Niels Bohr atomların iç yapılarını çözmek için bu

yayılma ve soğurma verilerini kullandı. Atomların enerjiyi nasıl yayıp soğurduklarını açıklamak için daha önce keşfedilmiş gezegensel atom görüşünü (ufak bir çekirdeğin yörüngesinde dönen elektronlar) Planck'ın enerji kuantizasyonu hakkındaki fikriyle birleştirdi. Çoğunlukla en basit atom olan hidrojenle çalışan Bohr elektronun hızı ve çekirdekten olan mesafesi değiştikçe atomun yörüngedeki tek elektronunun enerjisinin nasıl değiştiğine ilişkin denklemler elde etmek için Newton fiziğini kullandı. Daha sonra burada ayrıntılı olarak açıklamaya gerek duymadığım ilave bir kural varsaydı; yörüngedeki elektronun sadece izin verilen belirli yörüngelerde hareket edebileceği, Planck'ın varsayımına ve kuantize salıncak benzetmemize (salıncağın erişebileceği yüksekliği kuantize ettiğimizi hatırlayın) benzer bir kuantumlama kuralı. Ayrıca (enerjinin korunumuna dayalı) şu mantıklı varsayımda da bulundu: Bir atom ışıma yaydığında, yörüngesindeki elektronun enerjisi izin verilen bir enerji değerinden, izin verilen daha düşük bir değere düşer. Benzer şekilde, bir atom ışıma absorbe ettiğinde, elektronunun enerjisi izin verilen düşük bir değerden daha yüksek bir değere yükselir. Bohr'un kuantumlama varsayımıyla birlikte Newton fiziğini kullanması ancak 1925'te kuantumun büsbütün yeni, Newtoncu olmayan teorisiyle çözülebilen kavramsal paradokslara yol açtı. 1913'te Bohr'un teorisi hidrojenin EM spektrumu için sayısal olarak doğru değerler sağladı. Fizikçiler paradokslara rağmen bu çalışmada bir şeyin doğru olduğunu kabul etti; teori ve deney arasındaki detaylı sayısal uyuşma bir tesadüf olamazdı. Bohr'un teorisi Newton'un saat gibi işleyen evreninden kuantum dünyasına uzanan bir köprüydü.[27]

Daha önce değindiğimiz gibi, 1900'deki geleneksel görüşe göre madde küçük parçacıklar halinde, ışıma ise uzayda ya-

yılmış alanlar halindeydi. Bu belirttiğimiz üç çığır açıcı buluş ışımanın alan teorisine karşı çıkarak ışımanın kümemsi, parçacık benzeri bir doğası olduğu sonucuna varır, fakat hiçbiri maddenin küçük parçacıklardan oluştuğunu ileri süren Newtoncu görüşe karşı çıkmaz. Louis de Broglie'ye ise şu tuhaf gelmişti: Yeni fikirler ışımaya bakışımızı kökten etkilerken maddeye bakışımızı fazla değiştirmiyordu. Broglie'nin bilimsel olduğu kadar estetik de olan rahatsızlığı onu kuantumun dördüncü bir erken belirtisine dair hipotez kurmaya yöneltti.

1923'te Paris Üniversitesi'nde doktora öğrencisi olan de Broglie ışıma ve madde arasında simetri –denge– olması gerektiğini düşündü. Madde daima parçacık gibi davrandığı halde, ışımanın, Maxwell'in klasik teorisinin işaret ettiği gibi hem dalga özellikleri ve hem de önceki üç çığır açan buluşun işaret ettiği gibi parçacık özellikleri sergilemesinin saçma olduğunu düşündü. Tezinde destekleyici detaylar veren de Broglie maddenin de hem dalga hem de parçacık özelliklerine sahip olması gerektiğini ileri sürdü. Bu tuhaf hipoteze ne anlam vereceğini bilemeyen doktora komitesi fikrini belirtmesi için Broglie'nin tezini Einstein'a gönderdi. Einstein "bunun fizik muammalarımızın en kötüsü üzerindeki ilk zayıf ışık demeti" olduğu yorumunda bulundu. Komite de Broglie'nin tezini onayladı. Ben dahil bazı bilim insanları için Broglie'nin tezi tarihteki en güzel bilimsel fikirlerden biridir.

Newtoncu eğitim almış fizikçiler için elektron gibi çok küçük bir maddi parçacığın uzayda yayılmış bir dalga olabileceğini hayal etmek olanaksızdı. Hangi vasıtada bir dalga? Dalgalanan neydi? Ancak de Broglie sebat etti. de Broglie, Planck'ın ısıtılmış cisimlerden çıkan ışıma üzerine yaptığı çalışmadan yararlanarak, kendi tasavvur ettiği simetriye dayanan, her maddi parçacıkla ilişkili olduğunu düşündüğü dalganın dalga boyunu öngören bir formül ortaya çıkardı.[28]

Dört yıl sonra, Clinton Davisson ve Lester Germer bir kristal (atomları düzenli yani kristal örüntüde düzenlenmiş) nikel hedefe elektronları, nikel yüzeyden sıçrayıp daha sonra bir tespit cihazına çarpacak şekilde ateşlediler. Elektronun çok küçük bir parçacık olduğu görüşüne uygun olarak her bir elektron detektördeki belirli bir noktaya çarptı. Ancak zilyonlarca yansıtılmış elektronun detektörde yaptığı *genel örüntü* hayret vericiydi. Yansıtmayı maddi olmayan EM dalgalar değil de maddi elektronlar yaptığı halde, bu bir EM dalga yüzeyden yansımış olsaydı öngörülebilecek türde bir örüntüydü! Tekil çarpmalara küçük parçacıklar neden oluyor gibi göründüğü halde, zilyonlarca nokta benzeri çarpmanın oluşturduğu genel örüntü bir dalga örüntüsüydü. Hatta Davisson ve Germer gözlemlenen örüntünün dalga boyunu bile ölçebilmişlerdi. Broglie'nin öngördüğü, elektronlarla ilişkili dalgaların dalga boyuyla uyumluydu.[29]

Bu en hafif deyimiyle kafa karıştırıcıydı. Aslına bakarsanız, bu dalga-parçacık bilmecesiyle ilgili halen kafa karışıklığı mevcuttur (5. Bölüm). Davisson ve Germer'in sonucu, de Broglie'nin, "parçacıkların" (elektronların olduğu farz edildiği) dalga özelliklerine sahip olabilecekleri hipotezini doğruladı. Dalga-parçacık bilmecesini ifade etmek kolaydır: Madde ve ışımanın ikisi de hem dalga hem de parçacık özelliklerine sahip gibi görünüyor. Bu neden böyledir? Madde nedir? Işıma nedir? Parçacıklar? Veya dalgalar? İlerideki sayfalarda hem maddenin hem de ışımanın kuantumlardan oluştuğunu ve *her bir kuantumun* uzayda yayılmış olduğunu ve bir alandaki bir dalga olarak sınıflandırılması gerektiğini göreceksiniz. Yine de her biri en iyi şekilde bir alan enerjisi demeti olarak tanımlanan, kuantumlara güçlü fakat nihayetinde yanıltıcı bir parçacık havası veren, oldukça birleşik tek bir cisimdir.

1925'ten 1930'a kadar Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Dirac, Max Born ve daha başka birçok fizikçi tanımladığımız çığır açıcı buluşlardan ilerleyerek, madde ve enerjinin davranışlarının temel teorisi olarak hem Newton'un klasik parçacık teorisinin hem de Faraday ve Maxwell'in klasik EM alan teorisinin yerine geçen yeni bir teoriyi biçimlendirmeye çalıştılar. Bilim insanları ve dünyanın dört bir yanındaki düşünen insanlar halen bu kuantum teorisini kabullenme sürecindeler. Umarım bu kitap bu süreci ilerletir.

Kalan bölümler 1930'da adlandırıldığı şekliyle, bu tamamen mekanik olmayan "kuantum mekaniğinin" ana ilkelerini sunuyor. Bu teori makroskobik algı dünyamızda zar zor fark edilebilir (yani klasik fizikten zar zor ayırt edilebilir) olmasına rağmen, kuantum fiziği mikroskobik seviyede çok önemlidir ve bu dünyanın olağandışı yeni bir anlayışını doğurarak yaşamlarımızın her yönünü etkileyen yeni teknolojilere öncülük etmiştir.

Oysa uzun vadede daha önemli olan, kuantum fiziğinin insanoğlunun düşünce alışkanlıkları üzerindeki etkisi olabilir. Kuantum, evrende çok önemli yer tutar: Evren bir kuantum olayından doğmuştur; galaksilerin düzeni derin kuantum gerçekliklerini yansıtır; evrenin gerçek dokusu klasik ilkelere değil, kuantum ilkelerine göre dokunmuştur. Klasik ve kuantum tanımları arasındaki kavramsal boşluk muazzamdır; gene de sezgilerimiz bilimin hayret verici, taze kuantum çağı yerine çok önceden sona ermiş Newton çağının boyunduruğu altındadır. Benim görüşüme göre bu farklılıkları araştırmaya, kuantum fiziğinin felsefi, tarihî ve kültürel önemini anlamaya daha yeni başlıyoruz. Kuantum kültürünü ciddi olarak araştırmak zor olmuştur, çünkü şu konuların fiziği hakkında çok az mutabakat olmuştur: Dalga-parçacık

ikiliği, temel rastgelelik, kuantum halleri, süperpozisyonlar, yerbilmezlik, ölçüm, kuantum sıçramaları ve diğer kuantum ikilemleri. Umarım bu kitap kuantum dünyasının daha geniş bir kültürle olan zenginleştirici bilgi birlikteliğinde bir adım olur.[30]

5

Bir Kuantum Nedir?

Demokritos'un mükemmel bir sorusu vardı: Evreni oluşturan madde uzayda yayılmış ve sonsuz olarak bölünebilir midir yoksa evren bölünmez parçacıklardan mı ibarettir? Demokritos yanıtın parçacık olduğunu öne sürdü. İki bin yıl sonra Newton da aynısını söyledi. Faraday ve Maxwell, Newton'un maddi parçacıkları arasında etkili olan EM kuvvetlere yayılmış bir vasıta sağlayan ve uzayı kaplayan bir EM alan olduğunu öne sürdüler. Einstein'ın kütleçekimi teorisi kuvvet alanlarından yanaydı. 20. yüzyılın başları itibariyle evren madde parçacıklarını bağlayan kuvvet alanlarıyla dolu görünüyordu.

Bu bölümde kuantum fiziğinin alabildiğine alanları desteklediğini göreceğiz. *Parçacıklar gözlemlenen kuantum fenomenlerini* açıklayamadıkları halde, alanlar açıklayabilir. Ve kuantum fiziği alanları klasik statülerinin çok ötesine götürür. *Kuantum fiziğine göre sadece kuvvet değil, madde de tümüyle alanlardan ortaya çıkar*. Bu alanlar klasik EM alanlara benzer, fakat arada büyük bir fark vardır: Bunlar kuantizedir. Bu onlara parçacık benzeri yönler verir. Örneğin alan enerjisi ancak bölünmez adımlar halinde artırılabilir veya azaltılabilir. Demokritos yarı yarıya haklıydı. Evren –1, 2, 3... diye– saya-

bileceğiniz bölünmez oluşumlardan ibarettir, fakat bu kuantumlar Demokritos'un parçacıklarına pek benzemez. Her bir kuantum yayılmış bir alan enerjisi demetidir; kuantumların küçük olması gerekmez; uzayda üst üste binerler; sert değil esnek, yok edilemez değil hassastırlar.

Uzayda yayılmış olmalarına rağmen kuantumların oldukça birleşik, bölünemez oluşumlar oldukları görülür. Dolayısıyla tıpkı Demokritos'un varsaydığı gibi, altın külçesi sonsuza dek *bölünemez*. Eninde sonunda tekil bir kuantuma ulaşırsınız ve bir kuantumu daha fazla bölemezsiniz.[1] Tüm bunların nasıl olabildiğini hayal etmek zordur. Bu bölüm bunun nasıl olabildiğini kanıtlarla açıklıyor.[2]

Büyük sanat ile büyük bilimin ortak noktası çoktur. Büyük sanatın bir tanımlaması da, beklenmedik olsa da bir kez deneyimlendiğinde mükemmel olduğudur: Bir senfoninin şaşırtıcı fakat mükemmel perde değişimi, bir öyküdeki olay örgüsünün şaşırtıcı fakat mükemmel değişimi. Bu bilimde de aynıdır. Einstein'ın "uzaysal eğrilik alanı" bilim insanlarını hayrete düşürse de, bunun kütleçekimi için mükemmel bir çerçeve olduğu ortaya çıktı. Tıpkı bunun gibi, kuantumlar kimsenin bekleyebileceği şeyler olmasa da mükemmel oldukları görülür. Şahane sanatsal sezgisiyle maddenin dalga özelliklerine sahip olması gerektiğini düşünen de Broglie bunu hisseden ilk bilim insanıydı. Görünüşe göre evren benzersiz bir yaratıcı sanatçıdır.

Kuantize Alan Nedir?

Neden hiçlik değil de bir şeyler var? Bu belki de nihai felsefi ve bilimsel sorudur. Benim fikrime göre bilim yanıta giderek yaklaşacak ama asla ulaşamayacaktır.

Yine de kuantum fiziği şaşırtıcı bir biçimde bu soruyu yanıtlamaya yaklaşıyor. Ancak elbette yanıta ulaşmak için bir-

kaç kuantum ilkesini kabul etmeniz gerekir ve daha sonra her zaman şunu sorabilirsiniz: Neden hiçlik değil de bu kuantum ilkeleri var? Kuantum savı şudur.

Kesinlikle hiçbir fiziksel fenomenin –normal madde, ışıma, karanlık madde veya karanlık enerji, başka fiziksel bir oluşum, enerji– olmadığı bir uzay bölgesi düşünün. Başka bir deyişle, uzayın bir bölgesinde mutlak hiçliğin olduğunu düşünün.

Böyle bir uzay bölgesinin var olamayacağı temel bir kuantum fiziği ilkesidir. Nedeni de şudur:

EM fenomenleri düşünelim. Kuantum fiziği hiçbir EM fenomenin –foton, elektrik yüklü cisimler, herhangi bir tür EM enerji veya EM alan– olmadığı "EM hiçliğin" olasılığı hakkında ne söyler? Bu durumda, bu uzay bölgesi boyunca hiçbir belirsizliğe yer bırakmayacak şekilde, EM alan kesin olarak sıfır olacaktır. Böyle bir durum ise tüm alanların en azından minimal bir derecede rastgeleliği sürdürmesi gerektiğini bildiren Heisenberg ilkesini ihlal ederdi. Dolayısıyla EM alanın var olması gerekir ve her yerde en azından minimal, rastgele farklılık gösteren bir enerjiye sahip olmalıdır. Başka bir deyişle, eğer bir uzay bölgesinde bir şekilde kesinlikle hiçbir EM alan olmasa, bu bölge ânında evrenden yok olurdu. Bu bölümde göreceğimiz gibi, farklı kuantum alanı türleri vardır. Çoğu fizikçi bunların sadece henüz keşfedilmemiş tek bir birleşik alanın farklı yönleri olduklarını düşünür. Tüm bu temel alanlar en azından minimal bir formda her yerde bulunmalıdır. Eğer uzay varsa, içinde bir şey, yani kuantum alanları olmalıdır.

Bu minimal alana *kuantum vakumu* veya *vakum alanı* denir. Bu alan evreni kaplar. Kesinlikle hiçlik değildir. Bu kuantum fiziğinin başlangıç noktasıdır. Yani kuantum fiziği, kuantum alanlarının (veya belki de tek bir birleşik kuantum alanının)

en azından minimal vakum formunda bütün evrende var oldukları kavramından başlar. Bu alanlar "kuantizedir"; başka deyişle, kuantum fiziğinin ilkelerine riayet ederler.

En basit örnek kuantize EM alandır. EM vakum alanı evren boyunca yayılır; "hiçbir şeyin" var olmadığı galaksiler arasındaki bölgelerde bile. Böyle vakum bölgelerinde hiçbir foton, yüklü cisim, EM kuvvet bulunmaz, fakat belirsizlik ilkesini karşılayan, rastgele dalgalanan, minimal bir EM alan vardır.

Klasik EM alan hakkında söylenen her şey kuantize EM alan için de geçerlidir. Bu bizzat uzayın bir özelliğidir. Duman odayı nasıl kaplarsa, kuantize EM alan da uzayı öyle kaplar. Bu, bütün EM ışımaların iletimi de dahil olmak üzere, elektrik yüklü cisimler arasında EM kuvvetlerin iletiminin vasıtasıdır.

Sadece EM fenomenlere bağlı kalarak, *elektromanyetik olarak meydana gelen her şey EM vakum alanındaki bozunumlar –dalgalar– olarak tanımlanabilir*. Bu zor bir kavram değildir. Bütün EM kuvvetler ve ışımalar, bir küvet sudaki dalgalara benzer şekilde, vakum EM alanındaki dalgalardır; aralarındaki tek fark su dalgalarının iki boyutlu bir yüzeyde, EM dalgaların üç boyutlu uzayda meydana gelmeleridir. Hiçbir dalga içermeyen bir küvet su bile EM vakum alanıyla kıyaslanabilir. Şimdi su yüzeyinde enerji taşıyan tek bir dalga düşünün. Bu dalga EM alan boyunca EM ışıma taşıyan tek bir fotonla kıyaslanabilir. *Fotonlar evrensel EM alandaki dalgalar, bozunumlardır*.

Bu durum ilave vakum alanı kavramı hariç, klasik EM dalgalara çok benzer görünür (4. Bölüm). Bu noktada bunu bir kuantum alanı yapan şudur: Gerçek dünyada EM alan *kuantizedir*. Bu da *bütün bozunumların –bütün fotonların–* kuantum *adı verilen oldukça birleşik EM enerji demetleri formunda olduğu* anlamına gelir. Dolayısıyla her EM etkileşim, bir veya daha fazla tam enerji kuantumunun anlık oluşumu, yok oluşu veya değiş tokuşuyla meydana gelir. Her bir demet, daha sonra de-

taylı olarak açıklanacağı gibi, öngörülmüş bir miktar enerji taşır. Dolayısıyla bir EM enerji kuantumunun (foton) bir ya hep ya hiç özelliği vardır: Alanda ya bütünüyle mevcuttur ya da bütünüyle yoktur. Fotonun sadece bir kısmına sahip olamazsınız.

Bu ya hep ya hiç özelliğinin 2. Bölüm'deki kuantize salıncak gibi tam bir enerji kuantumunu ânında eklemenizi veya çıkarmanızı gerektirmesi enerji değiş tokuşlarına bir sıçrama, düzensizlik özelliği verir. Üstelik her bir kuantum uzayda yayılmış (çünkü yayılmış EM alanın bir parçasıdır) olmasına rağmen daima tek bir birim gibi davranır. Kuantum kilometrelerce yayılmış olsa bile bir kuantumdaki değişiklikler ânında tüm kuantuma yayılır. Bir kuantumun bir parçasını değiştiremezsiniz, çünkü "parçası" yoktur; tek bir şeydir.

Bu bölümde birkaç tane daha kuantize alan türünü inceleyeceğiz. Her biri önceki ilkelere uyar: Her birinin bir vakum alanı vardır, bütün süreçler vakum alanındaki dalgalar şeklinde meydana gelir ve tüm bu tarz dalgalar belirli bir enerji miktarı taşıyan, son derece birleşik fakat uzayda yayılmış kuantumlar halinde oluşur.

Max Planck 1900'de kuantumlamayı fark eden ilk bilim insanıydı. Aslında bunu fark etmek kolay değildi. Nedenini anlamak için, frekansı 5×10^{14} Hz olan bir turuncu ışık fotonu gibi, görünür ışığın tipik bir kuantumunu göz önüne alalım. 1900'deki çalışmasında kuantum fikrini –ilk kez– ileri süren Planck bir fotonun enerjisini bulmak için şu formülü belirledi: Metrik birimleri kullanarak ışımanın frekansını (Hertz olarak ölçülen) $6{,}6 \times 10^{-34}$ sayısıyla çarpın. Böylece turuncu fotonumuzun enerjisi

$$\text{Enerji} = (6{,}6 \times 10^{-34}) \times \text{frekans} = (6{,}6 \times 10^{-34}) \times (5 \times 10^{14}) = 3{,}3 \times 10^{-19} \text{ jul olur.}$$

$6{,}6 \times 10^{-34}$ sayısına günümüzde *Planck sabiti* denir. Bildiğiniz gibi (3. Bölüm), 1 jul oldukça az bir enerji miktarıdır. Dolayısıyla tipik bir ışık kuantumunun –tipik bir foton– ciddi ölçüde küçük bir enerjisi vardır: 0,000.000.000.000.000.000.33 jul! İşte bu yüzden ışığın fotonlardan oluştuğunu hiç fark etmemişsinizdir.

Planck'ın fikri büyük fark yarattı. Kuantum fiziğinin var olmasının sebebi kuantumun var olmasıdır (yani kuantize alanların var olması). Kuantumları günlük hayatımızda hiç fark etmememize rağmen, evren bu küçük enerji demetlerinden oluşmamış olsaydı dünyamız klasik olurdu. Newton fiziğinin hüküm sürdüğü bir evreni tasavvur edebilirsiniz. Eğer Planck sabiti 0,000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.66 değil de sıfır olsaydı evrenimiz Newton fiziğine uygun olurdu. Evren sıkıcı olurdu fakat sorun değil, çünkü zaten biz de içinde olmazdık. Eğer Planck sabiti sıfır olsaydı atomlar var olmazdı, çünkü atomların içindeki elektronlar olası en düşük enerji durumuna sahip olmazlar (7. Bölüm) ve çekirdeğin içine doğru hızla düşerlerdi. Dünya yalnızca ufak, elektriksel olarak nötr çekirdeklerden ibaret olur, dolayısıyla kimya da olmazdı. Her şey çok daha az ilginç olurdu ve kesinlikle dondurma da olmazdı. Bereket versin ki Planck sabiti sıfır değildir. Bunun (Planck sabitinin sıfıra eşit olmaması) hiçlik yerine bir şeylerin var olmasının nedeni olduğunu iddia etmek mantıklıdır.

Işımayla Bir Deney

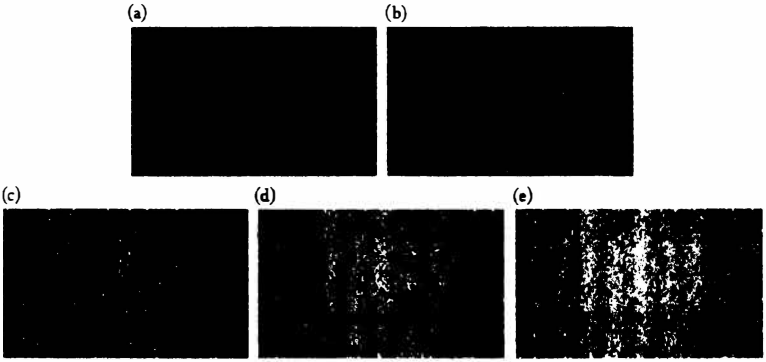
Işıkla yapılan çift yarık deneyini hatırlayın (Şekil 2.2). Deneysel sonuç (Şekil 2.3) dalga girişimini kanıtlayarak ışığın yayılmış bir ortamda –bir EM alan– bir dalga olduğunu gösterir. Bu bölüm bu deneyin daha detaylı bir versiyonunu anlatıyor. EM alanın kuantize olması gerektiğine –enerjisinin foton for-

mu şeklinde demetlenmiş olması gerektiğine– dair kanıt sağlıyor *fakat bu deney ışığın bir EM alanda bir dalga olduğuna dair vardığımız sonucu değiştirmez.* Bu deney daha önce ileri sürülen kuantize alanlar teorisine bir kanıt ve bir örnek sağlar.

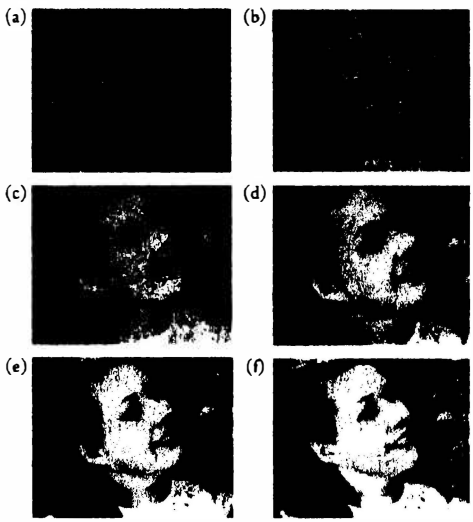
Çift yarık deneyini son derece zayıf bir ışıkla yaptığımızı hayal edelim. Sonucun Şekil 2.3'teki gibi, ancak sadece biraz daha sönük olması beklenir ve eğer EM alan klasik (kuantize değil) olsaydı bu doğru olurdu. Ancak bu olmaz. Şekil 5.1 meydana gelen şeyi gösterir.[4] Yeterince loş bir ışıkta ve kısa süreli pozlamada ışık ekrana sadece birkaç noktada çarpar, girişime dair fark edilebilir bir iz oluşmaz (Şekil 5.1a)! Daha uzun süreli pozlama daha çok çarpmaya yol açar (Şekil 5.1b). Ancak yeterince uzun süreli pozlamalarda (Şekil 5.1c-e) çarpma dağılımında bir girişim örüntüsü ortaya çıkar. Aynı fenomen sıradan fotoğraflarda da ortaya çıkar (Şekil 5.2).[5] Bu bazı Fransız empresyonistlerin noktacılık tekniğiyle yaptıkları resimlere benzer.

Küçük parlak noktalardan hareketle ışığın neticede küçük parçacıklardan oluştuğu sonucuna varmak normaldir. Ancak bu en hafif deyimiyle aceleye getirilmiş bir sonuç olurdu. Aceleye getirilmiş olmasının nedenlerinden biri noktaların o kadar küçük olmamasıdır. Şekil 5.2'deki küçük ışık noktaları metrenin iki milyonda biri boyutunda olan ve bir milyar atomdan oluşan tek bir gümüş fotografik grenin ışıklanmasını temsil eder. Atomik seviyede bakıldığında bu çok küçük değildir. Öyleyse bir fotonun ne olabileceğine (parçacık, dalga veya başka bir şey) dair bir betimlemeye kendimizi bağlamadan, bu küçük noktaların "fotonlarca" yapıldığını söyleyelim.

Işığın neden ibaret olduğu meselesi Newton'un zamanından bu yana tartışılmıştır ve biz de bunun üzerinde biraz zaman harcayacağız. İlk olarak çift yarık deneyinde bir yarığın kapatılıp ışığın sadece diğer yarıktan geldiğini düşünelim.



Şekil 5.1 (a-e) Zayıf ışıkla ve farklı pozlama zamanlarıyla yapılan çift yarık deneyi. Girişim örüntüsü parçacık benzeri çarpmalardan gelişir.

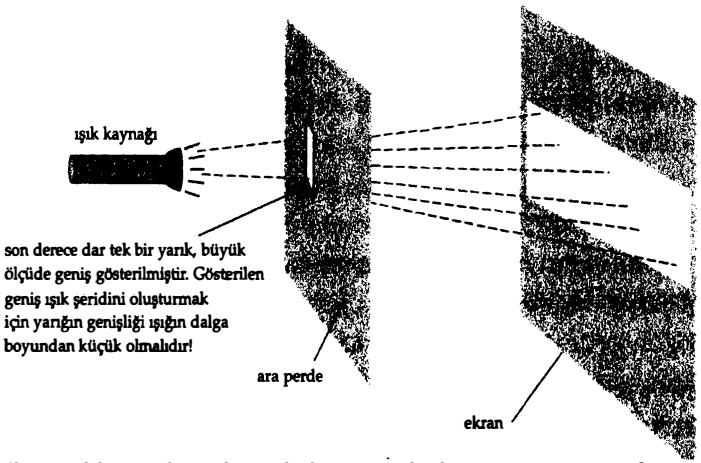


Şekil 5.2 Pozlama zamanı giderek uzadıkça parçacık benzeri tekil çarpmalardan bir fotoğraf ortaya çıkar.

Bildiğiniz gibi (2. Bölüm), dar bir delikten geçen dalgalar deliğin uzağında yayılacak yani "kırılarak yayılacaktır". Çok dar (ışığın dalga boyuyla kıyaslanabilir bir genişliği olan) tek bir yarıktan çıkan parlak ışık da aynı şeyi yapar: Işık, Şekil 5.3'te gösterildiği gibi, görüntüleme perdesini geniş çapta aydınlatır. Daha sonra zayıf ışık ve kısa pozlama zamanları kullanırsak gene ışığın küçük çarpma noktalarının ekran üzerinde geniş çapta dağıldığını görürüz, fakat biz yoğunluğu artırdıkça girişim örüntüsü ortaya çıkmaz. Bunun yerine, bütün ekran küçük ışık noktalarıyla dolar ve Şekil 5.3'teki yumuşak dağılım, noktacılık tekniğiyle yapılmış bir resim gibi, küçük nokta sayısı arttıkça ortaya çıkar.

Diyelim fotonların küçük parçacıklar olduğunu varsayıyoruz. Şekil 5.3'teki geniş tek yarıklı örüntü böylece açıklanabilir. Belki de her bir fotonun yarığın kenarlarıyla etkileşmesi fotonların yanlara saparak, her bir foton tek bir noktaya olmak üzere ekranın tüm yüzeyine çarpmalarına ve toplu olarak bütün ekranı doldurmalarına neden oluyor.

Fakat küçük parçacıklar Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'teki çizgili çift yarık girişim örüntüsünü nasıl açıklayabilir? *Parçacık* kelimesinin tam tanımına göre bir parçacık iki yarıktan birden geçemez. Bir yarıktan çıkan parçacığın diğer yarıktan kaynaklanan kuvvetlere maruz kalabileceğini veya diğer yarığın açık mı yoksa kapalı mı olduğunu bir şekilde "bilebileceğini" farz etmek mantıklı değildir; çünkü bir yarıktan geçmekte olan küçük bir parçacığın bakış açısından diğer yarık çok uzaktadır. Göreceğimiz gibi, bu deney sadece fotonlarla değil, elektronlar, nötronlar ve başka molekül türleriyle de yapılmış ve daima Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'tekine benzer bir girişim örüntüsü elde edilmiştir. Bilinen herhangi bir kuvvetin –kütleçekimi, elektromanyetik, güçlü nükleer veya zayıf nütleer kuvetlerden birinin– bir yarıktan çıkmakta olan çok küçük bir ışık



Şekil 5.3 Işıkla yapılan tek yarık deneyi. Işık ekran üzerine geniş bir şerit halinde gelir, girişim örüntüsü olmaz. Bunu iki yarık açık olduğunda neler olduğunu gösteren Şekil 2.4'le kıyaslayın.

parçacığının, diğer yarığın kapalı veya açık olmasına bağlı olarak farklı davranmasına neden olabileceğini tasavvur etmek zordur.[6]

Belki de girişim örüntüsüne bir yarıktan çıkan fotonların diğer yarıktan çıkanlarla etkileşmesi neden oluyordur. Bu hipotezi her seferinde sadece bir çarpma olmasına izin vererek test edebiliriz. Diyelim ışın çok zayıf olduğu için çarpma dakika başına bir tane olduğunda bile, girişim örüntüsü yeterince çok sayıda çarpmadan sonra yine oluşur. Dolayısıyla farklı fotonlar arasındaki etkileşimler örüntüyü açıklayamaz.

Şekil 5.1'deki çizgiler, fotonlar yarıklardan her seferinde bir tane geçtiğinde dahi oluştuğu ve sadece tek bir yarık açık olduğunda oluşmadığı için, *her bir fotonun iki yarıktan da geçtiği* sonucuna varmak zorunda kalırız. Şekil 5.1'deki küçük noktaları oluşturan nesneler ne olursa olsun, her biri yayılmalı ve iki yarıktan da geçmelidir. Kuantum fiziğinin kurucularından biri olan Paul Dirac'ın da belirttiği gibi, "Her bir foton

... yalnızca kendisiyle girişim yapar."[7] Ancak diyelim yarıkların aralarındaki mesafe bir milimetre, yani bir atomdan milyon kat büyük olabilir. Buradan hareketle önemli bir sonuca ulaşırız: *Bir foton atom boyutunda küçük bir parçacık olamaz.*

Bu çok önemli sonucu destekleyen büsbütün farklı bir argüman var. İki yarık arasındaki mesafeyi artırırsak girişim örüntüsü sıkışır (parlak çizgiler arasındaki aralık küçülür).[8] Bu sıkışma ekrandaki *bütün* foton çarpmalarının konumlarının kaydığını gösterir. Ancak bu mesafeyi soldaki yarığı biraz daha sola kaydırarak artırabiliriz. Parçacık hipotezi protonların yarısının sağdaki yarıktan çıktığına işaret eder. Eğer fotonlar parçacıksa, o zaman bu sağ yarıktan çıkan fotonların çarpma noktaları nasıl sadece sol yarık hareket ettirildiğinde değişebiliyor? Belli ki *her bir çarpma iki yarıktan da çıkan tek bir foton tarafından gerçekleştiriliyordu.*

Bu tuhaftı, fakat Richard Feynman'a göre sadece tuhaf değil, aynı zamanda paradoksaldı; mantıksal olarak çelişkiliydi. Her ne kadar Feynman, bu büyük ve sezgileri hayli güçlü deha 1940'larda –kuantum fiziğini Einstein'ın özel görelilik teorisiyle birleştiren– modern kuantum alan teorisinin icat edilmesine yardım etse de, katı bir biçimde parçacık taraftarıydı. Kuantum teorisyeni Frank Wilczek'in belirttiği gibi, "özellikle ... önemli fizikçiler arasında olan Feynman alanlardan kurtularak alan-parçacık ikiliğini bertaraf etmeyi umut ediyordu."[9]

Feynman çift yarık deneyi hakkındaki kendi dersinde bir önsöz olarak öğrencilerine şunu tavsiye etti:

> Eğer kaçınmanız mümkünse kendinize "Fakat bu nasıl böyle olabilir?" deyip durmayın, çünkü şim-

> diye kadar hiç kimsenin kaçamadığı bir çıkmaz sokakta emekleriniz boşa gidecek. Kimse bunun nasıl böyle olabildiğini bilmiyor.[10]

Ancak "Bu nasıl böyle olabilir?" sorusu daima mükemmel bir sorudur. Parçacık taraftarı olan Feynman aslında girişim örüntüsünün kendi önyargılarıyla –yani evrenin parçacıklardan oluştuğu görüşüyle– açıklanamadığını söyler.

Fakat fotonlar parçacık değilse o zaman parçacık benzeri çarpma noktalarını nasıl açıklarız? Şöyle açıklarız: Her bir foton iki yarıktan da çıkan ve sonra ekranla etkileşmeden hemen önce ekranı kaplayan, yayılan bir dalga, yayılmış bir alan enerjisi demetidir. *Daha sonra her bir foton bütün ekranla etkileşir.* Ancak ekran tek tek zilyonlarca atomdan oluşur. Foton bölünemediği için bütün enerjisini bu rastgele "seçilmiş" atomlardan birine bırakmalıdır (6. Bölüm). Daha sonra bu atomik seviyedeki etkileşim kuvvetlenir ve ekranda çok küçük, gözle görünür bir parlama oluşur.

Her bir parlamanın sınırlı, küçük kapsamı fotonun kendisinin değil, foton-ekran etkileşiminin bir özelliğidir. Fotonun bir çivi yatağına yerleşmekte olan büyük bir balon olduğunu düşünün. Etkileşim –patlama– tek bir çivide meydana gelecektir. Bu, patlamadan önce balonun sadece o çivide mevcut olduğunu göstermez.

Her bir foton ekrana yaklaşıkça bütün girişim örüntüsünü bünyesine katar; sönük çizgiler yerine parlak çizgilerde bir etkileşimi destekleyen bilgi içerir. Tipik bir ışıklı çift yarık deneyinde, örüntü (ve dolayısıyla çarpma öncesi foton) birkaç santimetre genişliğindedir. Her bir foton örüntü içindeki ekranın bütün atomlarına temas ederek bütün bölgeyi kaplar, buna rağmen enerjisini tek bir atoma vermelidir, çünkü o birleşik bir kuantumdur. Ancak foton belirli bir atomla nerede

etkileşmesi gerektiği hakkında değil, yalnızca genel çizgili örüntü hakkında bilgi taşır. Bu nedenle belirli bir atomun seçimi rastgele fakat toplam örüntünün sınırları içinde yapılır. Foton-atom etkileşimi fotonun kaybolmasına yol açar.

Özetleyecek olursak: İki yarık da açık olduğunda her bir foton iki yarıktan da çıkar ve bütün girişim örüntüsü üzerinde yayılan tek bir cisim olarak ekrana yaklaşır. Kuantum tek bir birleşik cisim olduğu için, daha sonra ekranda rastgele seçilen tek bir atomla etkileşmelidir. Daha sonra kuantum bütün enerjisini bu atoma verir, yani bu atom içinde kaybolarak "çöker". Yarıklardan geçerken ve ekrana yaklaşırken bir dalga gibi davranır, fakat daha sonra bir parçacık gibi çarpar. O daima bir alan içindeki bir dalgadır.

Fotonun büyüklüğü ne kadardır? Kuantum fiziğinin kurucularından biri olan Louis de Broglie'ye göre tekil bir kuantum "bütün uzayı kaplar" (daha sonra alıntılanan ifadesini göreceğiz). de Broglie'nin sözünü ettiği elektronlardı, fakat aynı ilke fotonlar için de geçerlidir. Kuantum teorisi her serbest (sınırlandırılmamış) kuantumun uzayda belirsiz biçimde yayıldığını ve sonlu hacmin herhangi bir bölgesi içinde sınırlı olmadığını ifade eder. Dolayısıyla foton veya başka bir kuantumun büyüklüğü hakkındaki bir söz, fotonun, görüntüleme ekranı gibi bir detektörle etkileşim olasılığının çok büyük olduğu, (diyelim %99) sonlu bir bölgeyi ifade etmelidir. Bu takdirde tek bir foton için böyle yüksek olasılıklı bir bölgenin büyüklüğü ne kadardır?

Çift yarıklı bir deney için şunu ileri sürdüm: Her bir foton iki yarıktan da çıkar ve tüm girişim örüntüsü üzerinde yayılır. Görünür çift yarık örüntüsü (Şekil 2.3) rahatlıkla birkaç cm genişliğinde olabilir, dolayısıyla bu fotonların her birinin

yüksek olasılıklı bölgesi bu genişlikte olmalıdır. Ancak fotonlar bundan çok daha geniş olabilir. Şili'nin kuzeyindeki Cerro Paranal Dağı üzerinde bulunan Çok Büyük Teleskop, aralarındaki toplam mesafe 100 metre olan dört hareket ettirilebilir teleskoptan alınan ışıktaki girişimi tespit ederek, (hareket yönlerine dik olarak) en az 100 metre genişlikteki görünür ve kızılötesi fotonları doğrular. "Her bir foton yalnızca kendisiyle girişim yaptığı için" (Dirac) bu dizilimin tespit ettiği fotonların yanal uzamları en az 100 metre olmalıdır. Dalga boyları daha uzun olan radyo fotonları 100 metreden çok daha büyük olabilir. Birleşik Devletler, New Mexico'da bulunan Scorro yakınındaki Çok Büyük Dizilim dünyadaki en büyük radyo teleskobu dizilimidir. 36 km boyunca uzanan bu dizilim radyo fotonlarının bu mesafedeki girişimini kanıtlayarak fotonların 36 km genişliğinde olabileceğini doğrular.

Çok uzun temel interferometre olarak bilinen bir teknik kullanan bir radyo astronom ekibi dünyanın dört bir yanına yerleştirilmiş bazı radyo teleskopu dizilimlerini tek bir Olay Ufku Teleskobu'na bağlıyor. Her bir dizilim fotonun uzay ve zamanda geliş verilerini çok doğru olarak kaydedecek ve ileriki bir zamanda bilgisayarlar dünya boyutundaki tek bir radyo alıcısının yapabileceği gözlemlere eşdeğer sonuçlar elde etmek amacıyla ayrı gözlemleri birleştirecek. Olay Ufku Teleskopu Samanyolu'nun merkezinde bulunan, dört milyon güneş kadar kütlesiyle Merkür'ün yörüngesi büyüklüğünde bir bölgeye sıkışmış olan devasa kara delik üzerinde odaklanacak. Bu kara deliğin kenarının hemen dışında yani "olay ufkunda" –hiçbir şeyin kaçamadığı küresel yüzey– meydana gelen süreçleri gözlemleyecek. Bu şimdiye kadar gözlemlenmiş açık ara en aşırı kütleçekimi ortamı olacak ve Einstein'ın genel görelilik teorisi için nihai bir test zemini sağlayacak. Bu birleşik sistemin tespit ettiği fotonların genişliği gezegenimi-

zin genişliği kadar olacak, buna rağmen bir alıcı tarafından tespit edildiklerinde Şekil 5.1'de görülen ışık noktaları gibi ânında küçük bir bölgeye yığılacaklar.[11]

Maddeyle Bir Deney

Tıpkı Faraday ve Maxwell'in düşünmüş oldukları gibi, en azından bir temel kuvvetin, EM kuvvetin evreni kaplayan bir alan olduğuna, fakat bunun *kuantize* bir alan ve bunun da yeni bir şey olduğuna dair kanıtları görmüştük.

Şimdi kuvvetten çıkıp geleneksel olarak parçacıklardan oluştuğu düşünülen maddeye geçelim. Broglie'nin maddenin de EM ışıma gibi hem dalga hem de parçacık özellikleri sergilemesi gerektiğine dair önermesini ve Davisson ve Germer'in, maddenin bir formu olan elektronların dalga özellikleri sergilediklerine dair ispatlarını hatırlayalım. Günümüzde deneyler gerçekte her bir elektronun bir alanda bir dalga olduğunu oldukça dolaysız gösteriyor. Ancak parçacık olması gereken elektron nasıl dalga olabilir? Bu soruya önceki çift yarık deneyinin bir varyasyonunu inceleyerek yanıt bulacağız. Feynman'ın belirttiği gibi, çift yarık deneyinde "kuantum mekaniğinin özü var. Gerçekte içerdiği *tek* gizem o."[12] Bu defa bu deneyde foton yerine elektron kullanıldığını varsayacağız.

Sabit bir elektron akışı oluşturmanın birçok yolu vardır: Örneğin elektronlar sıcaktan dolayı telden uzaklaşana kadar bir teli elektriksel olarak ısıtmak gibi. Tıpkı Şekil 2.2'deki gibi, fakat bu defa foton kaynağı yerine bir elektron kaynağıyla bir çift yarık düzeneğine doğru bir elektron akışı gönderdiğimizi varsayalım.[13] Elektronlarla böyle bir çift yarık deneyini ilk kez 1961'de Claus Jonsson yaptı.[14] Sonuç hayret vericidir. Görüntüleme ekranındaki görüntü tamı tamına Şekil 2.3'tekine benzer bir girişim örüntüsüdür! Tek farkı, elektronun tipik dalga boyları ışık dalga boylarından çok daha küçük olduğu

için örüntünün çok daha küçük olmasıdır (parlak ve karanlık çizgiler daha incedir).

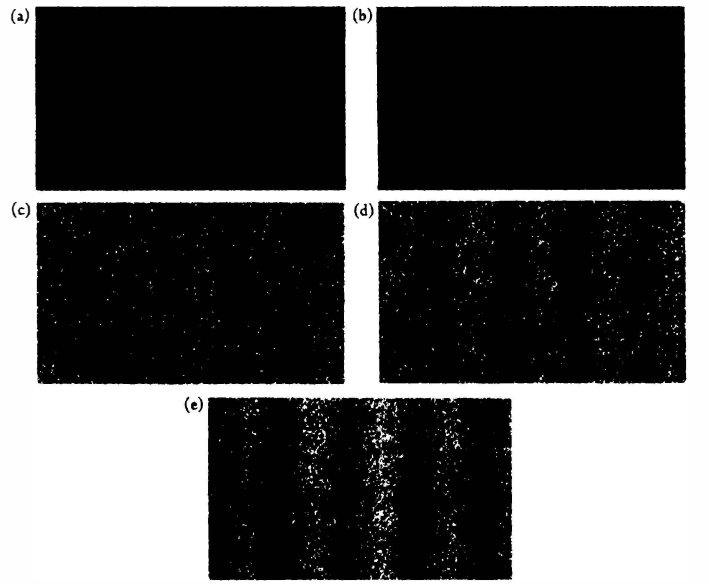
Peki, burada olan nedir? Bir elektron akışı nasıl olur da bir girişim örüntüsü oluşturabilir? Ne de olsa bunun bir parçacık akışı olması gerekir. Dalgalanan nedir?

Bu durumu açıklığa kavuşturan bir deney 1989'da Akira Tonomura ve meslektaşları tarafından yapıldı.[15] Ekip elektron akışının yoğunluğunu milisaniyede (saniyenin binde biri) yaklaşık bir elektron taşıyacak şekilde düşürerek tek seferde bir elektrondan fazlasının yarıklardan ekrana geçme olasılığının düşük olmasını garantiledi. Bu durum elektronlar arasındaki etkileşimlerin veya ortak etkilerin (bir ses dalgasına benzer şekilde) sonucu belirleme olasılığını bertaraf eder. Ayrıca pozlama zamanını da kısalttılar. Bunun 1961'de Claus Jonsson'ın gözlemlediği girişim örüntüsünün daha sönük bir versiyonunu üreteceğini tahmin edebilirsiniz, fakat bu tahmin yanlış olur. Şekil 5.4 bunun ne ürettiğini gösteriyor.

Girişim örüntüsü tam olarak Şekil 5.1'deki gibi, binlerce küçük tekil çarpmanın istatistiğinden gelişir. Nihai çarpma örüntüsü birçok küçük çarpmadan çıkan, "noktacı" bir etkidir. Fizikçiler aşağı yukarı 1930'dan bu yana bu sonucu öngörmüşlerdi fakat bu zor deney 1989'a dek yapılamadı. Girişim örüntüsü son fotoğrafta oldukça nettir.

Belki bu tekli çarpmalara neyin sebep olduğunu tahmin etmişsinizdir: Elektronlar! Şekil 5.4a'da sadece birkaç elektron, Şekil 5.4e'de ise zilyonlarca elektron çarpmıştır.

Tonomura'nın deneyi kuantum fiziğinin özünü açığa çıkarır. Deney, fotonlu çift yarık deneyinde fotonların bir girişim örüntüsü oluşturmada oynadığı rolü (Şekil 5.1), elektronlu çift yarık deneyinde bir girişim örüntüsü oluşturmada elekt-



Şekil 5.4 (a-e) Çift yarık deneyinde elektron kullanımıyla bir girişim örüntüsünün oluşturulması. Şekil 5.1'de olduğu gibi, daha uzun pozlamalarda tekil çarpmalardan bir girişim örüntüsü ortaya çıkar.

ronların oynadığını gösterir (Şekil 5.4). Dolayısıyla elektronlar fotonlarla kıyaslanabilir!

Yani fotonlar EM ışıma için ne ise elektronlar da madde için odur!

Ne var ki fotonlar EM alanın kuantumlarıdır. Dolayısıyla önceki bölümde ele alınan tüm nedenlerden ötürü, *elektronlar uzayı kaplayan bir alanın kuantumları, enerji demetleridir*. Ancak bu alan EM alan olamaz, çünkü bu alanın kuantumları (alan demetleri) şu an foton olarak biliniyor. Fotonlar elektronlardan tamamıyla farklıdır. Evvela, fotonlar maddi olmadıkları (ışık hızında yol kat ederler, kütleleri sıfırdır) halde elektronlar maddidir (kütleleri sıfırdan büyüktür ve ışık hızından daha yavaş hareket eder). Dolayısıyla elektronlar EM alan dışında bir alanın kuantumları olmalıdır.

Bu yeni fiziksel alan kuantum fiziğinin ana keşfidir.[16]

Yeni alanın birkaç ismi vardır: *psi* (Yunanca Ψ harfinden), *elektron-pozitron alanı* veya *madde alanı*. Muğlak tarihî ve teknik nedenlerden ötürü fizikçiler genellikle bu alandaki dalgalara *dalga fonksiyonları* veya *olasılık dalgaları* der. Bu iki matematik terimi çoğu insan için iticidir ve daha da kötüsü, aslında bu yeni alan oldukça gerçek, kuantum fiziğinin özü ve bütün maddelerin özünde olduğu halde, salt matematiksel bir soyutlama olduğu gibi yanlış bir izlenim verir. Bu psi alanını diğer öne çıkan kuantize EM alanla karıştırmamaya dikkat edin.

Bu yeni sonuç oldukça geniş kapsamlıdır. Diğer madde formlarıyla yapılan deneyler bunun sadece elektronlar için değil, proton ve nötronlar için de geçerli olduğunu gösterir. Uygun çift yarık deneylerinde örneğin protonlar Şekil 5.4'tekine benzer bir girişim örüntüsü oluşturur; nötronlar da öyle. Aslına bakarsanız atomlar ve moleküller bile benzer bir girişim örüntüsü oluşturur; bu hayret vericidir, çünkü atomlar ve moleküller birçok elektron, proton ve nötrondan oluşan, "birleşik" cisimlerdir. Bu durum tüm bu maddi cisimlerin – proton, nötron, atom ve moleküller– bir madde alanının kuantumları oldukları anlamına gelir.

Yüksek enerji fiziğine göre bu madde alanlarından birkaç çeşit vardır,[17] ancak dünya üzerindeki çoğu durumda esasen hepsi özdeştir ve elektron, proton, nötron, atom ve moleküllerin madde alanı için aynı Ψ sembolünü kullanırız. Bilim insanları çift yarık deneyine benzer girişim deneylerini sadece elektronlarla değil, protonlar, nötronlar ve çeşitli atom ve molekül türleriyle de yaptılar; tüm bu deneylerin Şekil 5.4'tekine benzer girişim örüntüleri üretmeleri bu cisimlerin her birinin bir alanın kuantumu –örneğin bir çift yarık deneyinin iki yarığından birden geçebilen bir kuantum– olduğunu kanıtlar. Hatta Viyana Üniversitesi'nden fizikçi Anton Zeilinger C_{70}

moleküleriyle madde dalgası girişimini bile kanıtlamıştır. Her molekül 70 atom ve her atom altı proton altı nötron ve altı elektron içerdiği için, bir C_{70} molekülü atomik standartlara göre oldukça ağır bir cisimdir. Zeilinger'in girişim örüntüsü Şekil 2.3'tekine benziyordu; tek farkı çok daha küçük olmasıydı, çünkü dalga boyu dolayısıyla örüntü maddi kuantumlar için sadece daha küçük olmakla kalmayıp, kuantumların kütleleri büyüdükçe de küçülür. Bu beklenen bir şeydir, çünkü kütleler büyüdükçe kuantum etkileri göz ardı edilebilir hale gelir. İşte bu nedenle asla lahanaların, kralların ve salıncakların kuantum kurallarına uyduklarını fark etmemişsinizdir.

Madde alanlarının varlığı ve kuantize oldukları olgusu bilim insanlarının 1900'den bu yana aradıkları, tanımlanması güç bir ilkedir. *Sadece ışımanın değil, maddenin de kuantumlardan oluştuğu* ilkesi fiziğin büyük birleştirici ilkelerinden biridir. Şekil 5.4'ü üreten deneye "fizikteki en güzel deney" denmesi boşuna değildir.[18]

Kuantize madde alanları mikroskobik maddenin mutlak tek biçimliliğini açıklar. Bildiğimiz kadarıyla her elektron diğer elektronlarla tam olarak özdeştir, her proton diğer protonlarla özdeştir, tüm hidrojen-1 atomları (yani çekirdeği tek bir protondan oluşan atomlar) özdeştir vb. Peki, bu neden böyle? Bunun açıklaması derin bir gizem olarak kaldı, ta ki madde alanlarının keşfi elektronların özdeş olduklarını, çünkü her elektronun evreni kaplayan tek bir madde alanında bir dalga olduğunu gösterene dek. Bu tüm elektronların mutlak kimliğini açıklamakla kalmaz, aynı zamanda başka bir birleşmeyi de gösterir. Örneğin zilyonlarca elektron bir şeyin örnekleridir: Evrensel elektron-pozitron alanının.

Dolayısıyla elektronlar hiç de küçük parçacıklar değildir: Bunlar evreni kaplayan bir alandaki dalgalardır. İşte Louis de Broglie bunu 1924'te unutulmaz bir biçimde şöyle açıkladı:

Madde parçacıkları denen şeyler parçacık değildir. Nasıl fotonlar EM alanın kuantumlarıysa, onlar da tam anlamıyla madde alanlarının kuantumlarıdır. Tüm bu şeyler sadece görünmeyen alanlardaki dalgalardır. Sadece elektron ve kuarklar değil, proton, nötron ve atom gibi, elektron ve kuark bileşimleri ve moleküller de bir madde alanının kuantumlarıdır. Kuantum alan kuramcısı Steven Weinberg'in dediği gibi, "Doğanın temel öğeleri alanlardır; parçacıklar türemiş fenomenlerdir".[20]

Fakat Demokritos ve Newton'a ait olan, maddenin küçük parçacıklardan oluştuğu kavramı kolay kolay bırakılamaz. Her ne kadar ışıkla yapılan çift yarık deneyi Faraday ve Maxwell'in elektromanyetizma teorileriyle birlikte 19. yüzyıl fizikçilerini ışığın bir alandaki bir dalga olduğuna ikna etmişse de, de Broglie'nin maddenin de bir alandaki bir dalga olduğu görüşü deneylerle tekrar tekrar doğrulanmış olmasına rağmen birçok fizikçi için halen kabul etmesi zor bir görüştür. Bu bölümün geri kalanında kuantum alanlarını daha detaylı ele alacak ve evrenin tümüyle onlardan ibaret olduğuna dair başka kanıtları açıklayacağım.[21]

Kuantum Alan Teorisi: Kuantum Fiziği Özel Görelilikle Buluşuyor

Kuantum fiziği Newton fiziğinin halen hüküm sürdüğü 1900 ila 1930 yılları arasında geliştiği için fizikçiler bariz alan kavramlarını uygunsuz bir şekilde Newton parçacıkları açısından yorumladı. Oysa sonunda, "yüksek enerjili" yani "göreli" kuantum fiziğinde bir alan görüşü, daha düşük enerjili göreli olmayan kuantum fiziğinde istikrarsız parçacık görüşü egemen oldu. Bu yıllar boyunca tarifsiz kafa karışıklığına yol açtı.

Erwin Schrödinger 1925'te, ilham aldığı, tahmine dayalı yoğun çalışma döneminde, de Broglie'nin varsayıma dayalı

madde dalgalarının uyması gereken bir denklem oluşturdu. Schrödinger'in denklemi bugün bile muhtemelen kuantum fiziğinin en çok kullanılan matematik formülü ve çoğu kuantum fiziği öğretiminin temelidir. "Kısmi diferansiyel denklem" adı verilen bu denklem açık bir biçimde Maxwell'in kısmi diferansiyel denklemlerine benzerdir. Nasıl Maxwell'in denklemleri EM alanda yayılan ışıma dalgalarını tanımlıyorsa, Schrödinger'in denklemi de Schrödinger'in Yunanca psi harfiyle göstermiş olduğu bir madde alanında yayılan madde dalgalarını tanımlar.[22] Denklemini doğru bir biçimde hidrojen atomunun EM spektrumu tahmin etmede kullanan Schrödinger, denkleminin bununla ilgili oldukça doğru bir şey içerdiğini gösterdi. Günümüzde, kuantize EM alan (Şekil 5.1) ile kuantize madde alanı (Şekil 5.4) arasındaki benzerliği hesaba kattığımızda ve başka birçok nedenden ötürü, hem ışımanın hem de maddenin kuantum fiziğinin parçacıklarla değil, alanlarla ilgili olduğu ve Schrödinger'in denkleminin madde alanlarını Maxwell'in denklemlerinin EM alanları tanımladığına benzer şekilde tanımladığı açıktır. Ne yazık ki çoğu fizikçi kuantum fiziğinin tamamen alanlar hakkında olduğuna dair bu işaretleri göz ardı ederek Ψ'yi alan yerine parçacık yönünden yorumlamakta ısrar etmiştir.

1920'lerin sonlarında Heisenberg, Born, Dirac ve başka bilim insanları yeni kuantum ilkelerini klasik EM alanda uyguladılar. Schrödinger'in denklemi "göreli olmasa da" –yani Einstein'ın özel görelilik teorisini dikkate almasa da– herhangi bir EM alan kuantum teorisi özel görelilik teorisini hesaba katmalıdır, çünkü EM ışıma en yüksek hızlı görelilik fenomenidir. Bildiğiniz gibi (3. Bölüm), klasik EM alan uzayda her noktada mevcuttur, dolayısıyla bu alanın herhangi bir kuantum teorisi uzaydaki her noktada kuantum ilkelerine uymalıdır. Bu nedenle elektromanyetizmanın kuantum teorisi

zorunlu olarak parçacıklarla değil, alanlarla ilgili bir teoriydi. Kuantum fikirlerini görelilik fikirleriyle birleştiren bu ve diğer teoriler *kuantum alan teorileri* olarak bilinegeldi.

1927'de Paul Dirac EM alan ve elektronların ilk mantıklı tam kuantum alan teorisini oluşturdu ve ışık demetlerinin (fotonlar) kuantum fiziğini EM alana uygulamanın mantıklı bir sonucu olarak ortaya çıktığını gösterdi.[23] Fizik jargonunda Dirac "Maxwell'in denklemlerini" kuantize etti. İki temel EM fenomen ışımanın yayılımı ve absorbe edilmesidir. Dirac'ın teorisinde bu fenomenler fotonların oluşumuyla ve yok olmasıyla meydana gelirler. Örneğin yayılım, bir atomdaki bir elektron daha düşük bir enerji haline "düşüp" de bunun sonucunda bir foton oluşturduğunda ortaya çıkar. Kuantum alan teorisi bu tarz süreçleri sayısal detaylarla tanımlar. Bu yeni ve devrimsel bir temeldir. Klasik atomculuk –yaratılamayan veya yok edilemeyen, indirgenemez parçacıklar– kuantum fiziği ile göreliliğin birleşimi kuantum alan teorisinin öngördüğü gibi, foton oluşumu ve yok olmasıyla bağdaşmaz.[24]

Fotonlar Demokritos ve Newton'un düşündükleri yok edilemez parçacıklara hiç benzemezler.

Çok geçmeden sadece fotonların değil, elektron ve proton gibi maddi kuantumların da oluşturulup yok edilebilecekleri açıklık kazandı. Örneğin yeterince yüksek enerjili bir foton bir elektron-pozitron çiftine dönüşerek (3. Bölüm) tümüyle EM enerji alanından maddi kuantumlar yaratabilir. Günümüzde her çeşit kuantumun yüksek enerjili fenomenlerde çok bol miktarda oluşup yok olduklarını biliyoruz; bunlar patlayan yıldızlar ve dünyanın atmosferindeki kozmik ışın çarpmalarının yanı sıra, proton çiftlerinin birbirleriyle çarpışarak çarpışma enerjisinden bol miktarda kuantum oluşturdukları Cenevre'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki deneylerde meydana gelir.

Dolayısıyla zihninizde mikro dünyayı canlandırdığınızda boş uzayda muhteşem yalnızlıkları içinde hareket eden izole parçacıkları değil, bunun yerine kendiliğinden oluşum ve yok oluş içindeki alan kuantumlarının durmadan değişen, enerji içeren, öngörülemez, kalabalık kaleydoskobunu canlandırın. Kuantumun –yani kuantum alan teorisinin– tam öyküsü tüm bunları tanımlar ve öngörür. Bu bize bu dinamik evrenin baştan aşağı hem kuantum hem de göreli olduğunu bildirir. Büyük patlama dahil evrenin en karakteristik fenomenleri kuantum alan teorisinin öngördüğü yaratımı ve yok oluşu içerir. Bu süreçler kendiliklerinden ortaya çıkar, çünkü evren enerjiden oluşur, çünkü enerji rastgele birçok biçim alır ve kütle ve enerji eşdeğerdir. Gerçeklik, kuantumların içinde dalgalandıkları ve enerjinin bir gölü hareket ettiren rüzgâr gibi değişim, yok oluş ve yaratım olasılığını doğurduğu, uzayı kaplayan alanlar dizisidir.

Var olan tek şey alanlardır. Diyelim ki taşları ve masaları düşündüğümüzde bu inanılmaz gelir. Bunlar bir manyetik alana benzer şekilde nasıl sadece alan olabilirler? *Bunun* üzerinde *düşünmeye değer*... Okumayı bırakın ve yumruğunuzu hızla bir masaya indirin. Elinizin acımasından anlayabileceğiniz gibi, masa da size tepki verir. Bu, Samuel Johnson'ın taşa tekme atması gibi, düşünmenizi sağlayan bir olaydır. Şimdi mikroskobik resme bakın: Masa ve eliniz atomlardan oluşur, atomlarda da EM alanları oluşturan elektronlar vardır. Vurmak elinizin elektronlarını masanın elektronlarına yaklaştırır ve bunların EM alanlar birbirlerini iter. Kuvvet alanlarının başka kuvvet alanlarını itmesi elinizi durdurur. Aynı zamanda elinizdeki molekülleri (daha çok alan) saptırarak elinizdeki sinir hücrelerinin (daha çok alan) beyninizdeki (şüphesiz daha fazla alan) bir ağrı merkezine bir sinyal iletmesine yol açar. Bunların hepsi alanlara indirgenir.

Schrödinger'in denklemi yavaş hareket eden maddelerin kuantum fiziği için sağlam bir temel sunmakla birlikte, daha yüksek enerjilerde problemlerle karşılaşır, çünkü özel görelilik ilkeleriyle uyuşmadığı görülür. 1928'de Paul Dirac bu sorunu Schrödinger'in denklemini genelleştiren, yani özel görelilik ilkelerini içeren ve dolayısıyla yüksek enerjili göreli maddeyi doğru bir biçimde tanımlayan bir denklem icat ederek çözdü. Dirac'ın denklemi hidrojen spektrumunu tahmin etmesi ve elektronun *dönüş* olarak bilinen ve açıkça kuantum olan yeni bir yönünü içermesi yönünden de Schrödinger'in denkleminden de daha doğruydu.[25] Schrödinger'in denklemi gibi Dirac'ın denklemi de Maxwell'in denklemlerine benzeyen bir kısmi diferansiyel denklemdi ve Schrödinger'in denkleminin tanımladığı aynı Ψ fiziksel alanını tanımlıyordu. Aslına bakarsanız, Dirac'ın denklemi yavaş hareket eden maddeye uygulandığında Schrödinger'in denklemine özdeş hale gelir.

Fizikçiler ilk başta Dirac'ın denklemini Schrödinger'in denklemiyle aynı şekilde, maddi parçacıkların bir tanımı olarak değerlendirdiler. Ancak Dirac'ın denklemi aynı zamanda Maxwell'in denklemlerinin klasik EM alanı tanımlamalarına benzer şekilde, Ψ'nin bir tanımı olarak da görülebilir. Bu Dirac ve diğer bilimcilerin yeni bir şey keşfetmelerini sağladı: Dirac'ın denklemi, Dirac'ın Maxwell'in denklemlerini kuantize ettiği şekilde "kuantize" edilebilirdi. Tıpkı Maxwell'in denklemlerinin kuantizasyonunun fotonların oluşumlarını ve yok oluşlarını öngörmeleri gibi, Dirac'ın denkleminin kuantizasyonu da maddi kuantumların oluşumlarını ve yok oluşlarını öngörür. Bu kuantumların elektron olduklarını tahmin ediyorsanız doğru yoldasınız demektir. Ancak Dirac'ın denkleminin kuantizasyonu hayal edilemeyen bir şey öngörür: Her bir çiftin bir elektron ile bir *pozitrondan* –tıpkı elekt-

rona benzer, fakat negatif yerine pozitif yüklü bir cisim– oluştuğu maddi kuantum çiftlerinin oluşumları ve yok oluşları.

Öngörülen pozitron birkaç yıl sonra, 1932'de Carl Anderson tarafından deneysel olarak keşfedildi. Daha önceden bilinmeyen bir kuantumun öngörülmesi ve deneysel olarak doğrulanması kuantum fiziğinin en büyük başarılarından biriydi ve bu EM alan ve Ψ alanı gibi alanların incelenmelerinin kuantum yönteminde yeni ve derin bir şeye işaret ediyordu. Aynı şekilde önemli olan başka bir şey de pozitronun elektronun antikuantumu olarak kavranmasıydı. Çok geçmeden bütün maddi kuantumların denk antikuantumları olduğu öngörüldü ve bu deneylerle doğrulandı: Antiproton, antikuark ve antinötronlar vardır.[26] Antihidrojen atomları –bir antiprotonun yörüngesinde bulunan bir pozitron– sentezlenmiş ve 15 dakikadan fazla muhafaza edilmiştir ki bu zor bir iştir, çünkü antikuantumlar evrene egemen olan, sıradan (anti olmayan) kuantumlarla karşılaştıklarında hızla yok olurlar.[27]

İster Newtoncu ister göreli ister kuantum olsun, önceki teoriler hareketi tanımlamışlar fakat oluşumu veya yok oluşu tanımlamamışlardı. *Kuantum alan teorisi bize yalnızca şeylerin nasıl hareket ettiklerini değil, ne tür şeylerin var olabildiklerini ve nasıl oluştuklarını da söyler.* Ve kuantum alan teorisi madde ve ışımayı aynı temele yerleştirir. Artık evren küçük maddi parçacıklar ile uzayı kaplayan kuvvet alanlarına ayrılmaz, tek tür bir şeyden oluşur: Kuantize alanlar.

Bu yeni teoride elektron gibi elektrik yüklü cisimlerin tam da klasik fizikte bağlantılı oldukları gibi EM alanla halen bağlantılı olduklarına dikkat edin: Elektronlar aralarında etki eden EM alan vasıtasıyla birbirleri üzerinde kuvvet uygularlar. Klasik (kuantum öncesi) fizikte elektronlar parçacık, EM alan da uzayda yayılmış, klasik (kuantize olmayan) bir alandır. Ancak kuantum alan teorisinde hem elektronlar hem

de fotonlar alanların kuantumlarıdır. Bu muazzam bir birleşimdir: Artık hem alanlar hem de parçacıklar yoktur, sadece kuantize alanlar vardır. Elektron, psi-alanın (yani elektron pozitron alanının) kuantumu, foton da EM alanın kuantumudur; dolayısıyla elektronlar fotonlar arasında meydana gelen süreçler vasıtasıyla etkileşirler. Fotonların elektronlar arasında etkili olan EM kuvveti *taşıdıkları* yani *ilettikleri* söylenir.

Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli ve diğer bilim insanları 1920'ler ve '30'larda kuantum alan teorisinin temellerini attılar, ancak pratik başarılarına rağmen teori matematiksel tutarsızlıklar içeriyor ve bazı deneysel olarak ölçülmüş detayları açıklayamıyordu. Fizikçilerin çoğu, dünyanın geri kalanıyla birlikte 1939 ila 1945 arasında savaşa gitti. Hemen sonrasında, 1947/1948'de birbirlerinden bağımsız çalışan bir Japon ve iki Amerikalı –Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger ve Richard Feynman– EM kuvvetin kuantum alan teorilerini yayımladılar. Üç teori de farklı görünmesine rağmen, mantıksal olarak eşdeğer oldukları ortaya çıktı; önceki kuantum alan teorilerinin mevcut zorluklarını çözdüler ve üçü de Nobel Ödülü'nü aldı. Teorileri eşdeğer olmasına rağmen, Schwinger çalışmasını alanlar yönünden, Feynman ise parçacık yönünden yorumlamıştı.

Dikkate değer biçimde, 1928'deki Dirac denklemi ve hemen sonrasında denklemin kuantizasyonu ve 1932'de pozitronun keşfiyle birlikte çığır açan doğrulanması fizik camiasını kuantum fiziğinin tümüyle alanlarla ilgili olduğuna ikna edemedi. Ne de olsa Dirac'ın denklemi, özellikle de kuantize versiyonu açıkça Maxwell'in denklemlerinin EM alanla kıyaslanabilir olan, yayılmış bir Ψ madde *alanını* tanımlıyordu. Buna rağmen çoğu fizikçi bu aynı Ψ oluşumu Schrödinger'in denkleminde ortaya çıktığında bunun düşük enerjili maddi *parçacıkları* tanımladığını iddia etmeye devam ettiler. Dolayı-

sıyla Schrödinger'in denklemi basitçe Dirac'ın denkleminin yavaş hareket eden elektronlar durumuyla sınırlı hali olmasına rağmen, Ψ fiziksel kavramı her nasılsa Schrödinger'in denkleminde parçacıkları, Dirac'ın denkleminde ise bir alanı temsil ediyordu. Sanki yavaş hareket eden parçacıklar sırf daha hızlı hareket ederek her nasılsa uzayı kaplayan alanlara dönüşüyordu.

Bu çelişki muhtemelen pedagojik nedenlerden ortaya çıktı. Bütün üniversite fizik departmanları, bütün seviyelerdeki müfredatta Schrödinger'in denklemini esas alan, görelilik dışı (düşük enerjili) kuantum fiziğini öğretir. Fakat kuantize Dirac denkleminin Ψ'sı gibi kuantize alanlara dayanan, görelilik içeren kuantum fiziği sadece ileri lisansüstü derslerde öğretilir ve sadece uzmanların aşina oldukları bir alandır. Bu da fizikçileri birbirleriyle iletişim kuramayan iki kampa ayırır: Uzmanlaşmamış, düşük enerjili parçacık kampı ile uzmanlaşmış yüksek enerjili alanlar kampı. Ψ'nin anlamına dair çelişkili fikirler büyük olasılıkla bu iki kamp arasındaki iletişim eksikliğinden ortaya çıkmıştır.

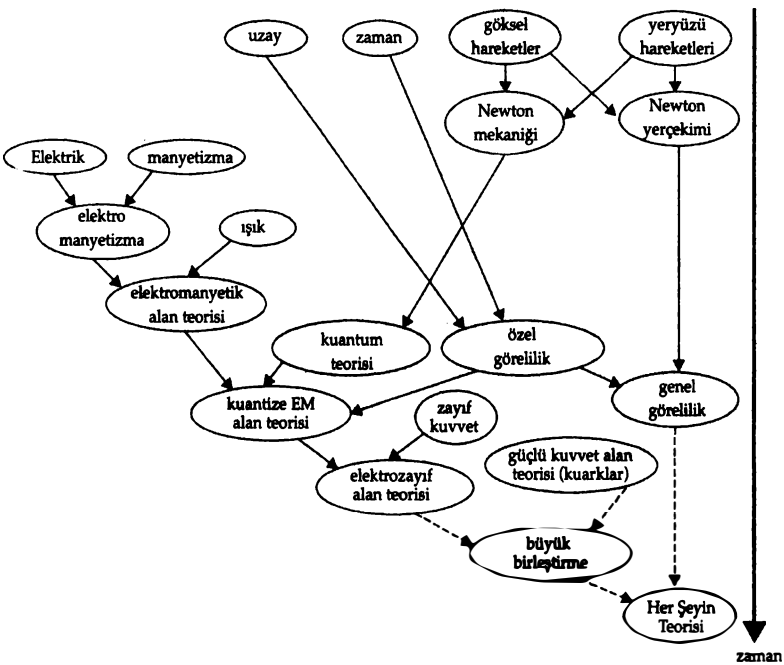
Doğru kelimeleri kullanmak önemlidir. Çift yarık deneyinin kuantize EM alanlar ve kuantize madde alanları yönünden yorumlanmaları gerektiğini gördük. Bu *kuantum alan teorisi* terimini yanıltıcı bir biçimde gereksiz kılar. Bunun hepsi salt kuantum fiziğidir ve kuantum fiziği de bütünüyle alanlar hakkındadır. Bu ayrıca *parçacık* kelimesini de gereksiz ve son derece yanıltıcı kılar. Daha basit ve çok daha doğru bir kelime vardır: *Kuantum*.

Parçacık yoktur. Bir foton veya elektronu bir alandaki dalga olarak gözünüzde canlandırırken, bunların dalga içinde yüzen küçük bir parçacık olduğunu hayal etmeyin. Dalga foton veya elektrondur. Var olan tek şey alanlardır.

Temel Kuantumlar ve Standart Model

Birleştirme bilimin tekrarlanan bir temasıdır. Kopernik dünyayı diğer gezegenlerle birleştirdi; Newton yeryüzündeki fiziği gökteki fizikle birleştirdi; Faraday ve Maxwell elektrik, manyetizma ve ışığı birleştirdi. Şekil 5.5'ten de görebileceğiniz gibi, kuantum fiziği bu eğilimi devam ettirir ve genişletmeye çalışır. Bu bölüm bu gelişmenin durumunu özetliyor.[28]

Kuantum birleştirmenin kitabında birçok bölüm çoktan yazılmıştır. Zilyonlarca kuantum birkaç çeşit alandaki bozunumlardır. Birçok kuantum diğer daha temel kuantumların bileşimleridir. Örneğin her bir proton ve nötron üç kuarktan oluşur. Dolayısıyla Standart Temel Alan ve Kuantum Mode-



Şekil 5.5 Fizik tarihindeki birleştirmeler. Zaman yukarıdan aşağıya doğru ilerliyor. Oklar bilimsel gelişmeleri ve birleşmeleri, kesikli oklar da gelecekteki olası birleşmeleri temsil ediyor.

li'ne –dünyanın en güçlü bilimsel teorisi için cazip olmayan bir isim– göre sadece birkaç kuantum alanı vardır ve bütün kuantumlar ya bu alanların enerji demetleri ya da bu tarz demetlerin bileşimleridir. Tablo 5.1'de standart modelin alanları ve bunların ilişkili kuantumları listelenmiştir. Standart model fizikçiler arasında 1970'lerden bu yana var olan bir mutabakatı temsil eder. Burada birkaç önemli noktayı özetleyeceğim; daha fazla referans için dipnotlara bakın.[29]

Standart model normal maddeyi ve kütleçekimi dışındaki kuvvetleri tanımlar; kütleçekimini, karanlık maddeyi ve karanlık enerjiyi tanımlamaz. *Model* kelimesinin işaret edebileceğinin aksine, bu model tamamlanmamış olduğu bilinmesine rağmen gerçekte doğrulanmış bir teoridir. Bu teoriye göre iki tür madde alanı (kuark ve lepton) ve iki tür kuvvet alanı (güçlü ve elektrozayıf), ayrıca Higgs alanı vardır. Kuark alanının *kuark* adı verilen altı çeşit maddi kuantumu ve lepton alanının da *lepton* adı verilen altı çeşit maddi kuantumu vardır. Kuarklar ve leptonlar arasındaki fark, kuarkların hem güçlü hem de zayıf kuvvetleri deneyimledikleri halde leptonların sadece zayıf kuvveti deneyimlemeleridir. Proton ve nötronlar tabloda yer almaz, çünkü bunlar kuark bileşimleridir ve temel değildir.

Tablo 5.1 Standart temel alan ve kuantum modelinin özeti, temel alanların bir teorisi. Her bir alanın bir veya daha fazla çeşit temel kuantumu vardır. Tabloda antikuantumlar yer almaz. Teori tamamlanmamış olarak bilinir, çünkü karanlık maddeyi, karanlık enerjiyi ve kütleçekimini içermez.

madde alanları:	**birinci nesil kuantumlar**	**ikinci nesil kuantumlar**	üçüncü **nesil kuantumlar**
kuark alanları:	yukarı kuark	tılsım kuark	üst kuark
	aşağı kuark	acayip kuark	alt kuark
lepton alanları:	elektron	muon	tau
	elektron nötrino	muon nötrino	tau nötrino
kuvvet alanları:			
baskın alan:	"glüon" adı verilen 8 kütlesiz kuantum		
elektrozayıf alan:	4 kuantum: foton, W^+ bozonu, W^- bozonu, Z bozonu		
Higgs alanı:	1 doğrulanmış kuantum: Higgs bozonu		

Kimsenin bilmediği nedenlerden ötürü, 12 maddi kuantum paralel yani benzer özellikler sergileyen üç *nesil* halindedir. Her bir nesil, Tablo 5.1'de gösterildiği gibi iki kuark ve iki lepton içerir.

Birinci nesil kuantumlar istikrarlı fakat ikinci ve üçüncü nesiller istikrarsızdır, yani hızla ve kendiliklerinden daha düşük nesil kuantumlarına bozunurlar. Üçü de büyük patlama sırasında saniyenin çok küçük bir kısmında önemli roller oynadılar, arkasından ikinci ve üçüncü nesiller bozundu. Günümüzde bu daha ileri nesil kuantumlar dünyanın atmosferindeki kozmik ışın çarpmaları, yıldız patlamaları ve yüksek enerjili fizik deneyleri gibi yüksek enerjili, izole olaylarda sadece kısa süreliğine ortaya çıkarlar.

Bu maddi kuantumların dokuz tanesi elektrik yükü taşır ve elektriksel olarak etkileşir, fakat her bir neslin elektrik yük-

lü olmayan ve sadece zayıf kuvvet ve kütleçekimi vasıtasıyla etkileşen bir *nötrinosu* vardır. Nötrinolar neredeyse tespit edilemezler ve etrafımızda olup bitenler üzerindeki etkileri hemen hemen sıfırdır. Milyonlarcası şu anda vücudunuzdan geçiyor; bunlar bir saniye içinde ayın ötesine uçar, birçoğu da ilk önce dünyanın içinden bozulmadan geçerler.

İkinci ve üçüncü nesiller istikrarsız oldukları için normalde etrafımızdakiler sadece birinci nesil kuantumlardan oluşur. Ve nötrino aynı anda birçok yerde bulunmasına rağmen normal çevremizde fark edilmez. Dolayısıyla *bütün sıradan maddeler sadece üç çeşit kuantuma indirgenir*: Yukarı ve aşağı kuarklar ve elektronlar. Hepsi bu! Protonlar iki yukarı ve bir aşağı kuarktan, nötronlar bir yukarı ve iki aşağı kuarktan ve atomlar da proton, nötron ve elektronlardan oluşur. Bu tam bir birleşmedir.

Kuvvetlere dönecek olursak: Madde iki kuvvet alanı vasıtasıyla kuvvet uygular: 1-*güçlü alan* 2-hem zayıf nükleer kuvveti hem de EM kuvveti ileten *elektrozayıf alan*. 1967'de birbirlerinden bağımsız olarak çalışan Pakistanlı fizikçi Abdüsselam ile Amerikalı fizikçi Steven Weinberg zayıf ve EM kuvvetler arasında bir bağlantı ortaya çıkardılar. Her ikisini de içeren yeni bir kuantize alan öne sürdüler. Bu, 19. yüzyılda elektrik ve manyetizmanın birleştirilmesiyle kıyaslanabilecek bir birleştirmeydi. Yeni *elektrozayıf* teorisi üç farklı zayıf kuvvet kuantumu –W^+ *bozonu*, W^- *bozonu* ve *Z bozonu*– olduğunu, dolayısıyla elektrozayıf kuvvetin dört çeşit kuantumla (bu üçü ve foton ile) taşındığını öngörüyordu. *Bozonun* anlamını 8. Bölüm'de açıklayacağım. Kütlesiz fotonun aksine, W^+, W^- ve Z'nin her birinin yaklaşık 90 protonun kütlesine eşdeğer bir kütleleri vardır. Yeni teorinin parlak bir başarısı ise bu üçünün de 1983'te, bu kuantumların büyük kütlelerini oluşturacak yeterli enerjiye sahip bir ivmelendiricinin yapımının ardından deneyle doğrulanmaları oldu.

Güçlü alanın *glüon* adı verilen, kuvvet taşıyıcısı sekiz çeşit kuantumu vardır; bunlar fotonların EM kuvveti ilettikleri şekilde güçlü kuvveti iletirler. Bu alan kuarkları proton ve nötronlar halinde, proton ve nötronları da atom çekirdeklerine bağlayan bir yapıştırıcıdır.

Fotonlar gibi glüonlar da ışık hızında yol alırlar ve kütleleri sıfırdır. Ancak zayıf kuvveti ileten W^+, W^- ve Z bozonlarında tuhaf bir şey vardır. Bunlar kuvvet alanlarının kuantumları oldukları için fotonlar ve glüonlar gibi kütlesiz olduklarını ve ışık hızında yol aldıklarını düşünebilirsiniz. Gelgelelim bunların kütleleri vardır. Peki, neden? Yanıtı aşağıdaki kütlenin başlangıcının öyküsüyle ilişkilidir.[30]

1961'de Sheldon Glashow EM ve zayıf kuvvetleri birleştirmeye teşebbüs eden bir teori geliştirdi. Hesaplamaları birleşik kuvvetin zayıf kısmının, fotonlara benzer şekilde, kütlesiz kuantumlar tarafından iletilmesi gerektiğini gösteriyordu. Ancak fotonlar bütün evrende kolayca hareket ederek, EM kuvvete uzun erimini sağlar ve diğer kütlesiz kuvvet kuantumları da kısa erimli değil, uzun erimli kuvvetleri taşımalıdır. Zayıf kuvvetin çok küçük bir erimi –atom çekirdeğinden küçük– vardır, dolayısıyla Glashow'un teorisine zıt olarak, kuantumlarının kütleleri olmalıdır.

Şaşırtıcı bir biçimde, bu bilmecenin çözümünün bir süper iletken içinde meydana gelenlerle ilişkili olduğu görülür. Birçok metal, 0 kelvin (-273 C) civarına soğutulduğunda, hiç enerji harcaması olmaksızın –*elektrik direnci* olmadan– elektriği iletir hale gelir. Bu *süper iletkenliğin* oluşmasının nedeni, sıcaklık yeterince düştüğünde bir "faz değişiminin" meydana gelmesidir; bu suyun sıcaklığı donma derecesinin altına düştüğünde olanlara biraz benzerdir. Daha sonra süper iletkenin

elektronları bağlanarak iki elektrondan oluşan bir çift haline gelir (bunun bir elektron-pozitron değil, iki *elektrondan* oluşan bir çift olduğuna dikkat edin), bunun yapısı çift halinde olmayan normal elektronlardan tamamıyla farklıdır.[31] Bu en iyi, elektron madde alanı yönünden kavramsallaştırılır. Bu alan, kuantumu artık tek bir elektron değil de bir elektron çifti olan yeni bir duruma geçer, yani bu alanın temel "demeti" iki eşli elektrondur.[32] Bu dönüşmüş madde alanı fotonların şaşırtıcı bir şekilde davranmalarına yol açar. *Fotonlar atalet –kütle– edinir ve ışık hızından daha düşük hızda hareket ederler.* Önceki paragrafta görmüş olduğumuz gibi, kütleli kuvvet taşıyıcıları kuvvetleri sadece kısa mesafelerde iletir, dolayısıyla kütleli fotonlar EM kuvvetin bir süper iletken içinde kısa erimli hale geleceğini gösterir; o kadar kısa erimli ki, elektron çiftleri etraflarındaki sıradan EM kuvvetlere maruz kalmadan metal içinde serbestçe hareket edebilir. İşte bu nedenle süper iletkenler işler: Çift elektronlu alan, fotonların kütleye ve EM kuvvetin de sadece kısa bir erime sahip olmalarına yol açar ve bu da süper iletkenin iç kısmındaki EM kuvvetleri nötrleştirerek elektronların serbest hareket etmelerini sağlar.

Şimdi zayıf kuvvete dönelim. Bu kuvvetin zayıflığını açıklamak için, 1964'te Peter Higgs ve diğer bilim insanları *süper iletkenlik faz geçişine benzer bir etkinin bütün evrende var olduğunu öne sürdüler.* Higgs'in teorisine göre, bir süper iletken içindeki çift elektronlu alana benzer olan, bilmediğimiz evrensel bir kuantum alanı vardır. Fotonlar bu Higgs alanıyla etkileşmez, fakat W ve Z bozonları etkileşir ve *bu da onlara kütle kazandırır*, tıpkı çift elektronlu alanın bir süper iletken içindeki fotonlara kütle kazandırdığı gibi. Higgs alanı W ve Z bozonlarını pekmezin içinde hareket eden bir kabarcığı etkilemesi gibi etkiler. W ve Z yavaşlar, başka bir deyişle atalet yani kütle edinirler. Çoktan tahmin etmiş olabileceğiniz gibi,

bu yeni Higgs alanının kuantumu –karakteristik enerji demeti– ünlü *Higgs bozonudur*.[33]

Bu, zayıf kuvvetin neden bu kadar kısa bir erimi olduğunu açıklar. Tıpkı çift elektronlu alanın bir süper iletken içindeki fotonlara kütle vererek EM kuvvetin kısa erimli olmasına yol açması gibi, Higgs alanı da W ve Z bozonlarına kütle vererek zayıf kuvvetin bütün evrende kısa erimli olmasına neden olur.

Bu açıklamanın yanında bir de büyük ödül gelir. *Bütün kuark ve leptonların da Higgs alanıyla etkileşmeleri sonucu Higgs alanının bu kuantumlara içsel bir kütle kazandırması gerektiği* ortaya çıkar. Bu sizin ve benim için kesinlikle iyi bir şeydir. İçsel bir kütleleri olmasa, kuark ve leptonlar bütün evrende ışık hızında oradan oraya zıplar ve bir araya gelip atomları veya dondurmayı oluşturamazlardı.

Elektrozayıf birleşmesi temel alanlar arasındaki ilişkileri gösterir. Teori Faraday ve Maxwell'in elektrik ve manyetik kuvvetleri birleştirmelerine benzer şekilde EM ve zayıf kuvvetleri birleştirir. Bu tarz birleştirmeler Einstein'a bütün temel fizik fenomenlerini içerecek bir birleşik alan vizyonunun ilhamını verdi. Günümüzde fizikçiler böyle bir birleşimi kuantum fiziğinin içinde bulmayı umut ediyorlar. Bir coşku veya kibir patlaması içinde, buna çoktan bir isim verilmiştir: *Her şeyin teorisi*.

Higgs bozonu standart modelin keşfedilmeyen tek öngörüsü olarak kaldı, ta ki 2012'de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda oluşturulana kadar. Kütlesinin büyük olduğu tahmin edilmişti, fakat aslında 133 proton kütlesinde olduğu ortaya çıktı. 3. Bölüm'de açıklandığı gibi, sıradan maddelerin kütlelerinin %95'i kuarkları birbirine bağlayan baskın kuvvetin enerjisinden gelir, ancak kuarkların Higgs alanı yüzünden var olan içsel kütlelerinden kaynaklanan kalan %5 hayati

önem taşır. Bu olmasa, kuarklar ışık hızında hareket eder ve katı madde var olamazdı.

Standart Modelin Ötesinde

Evrende standart modelden fazlası vardır. Standart model mantıksal tutarlılık için bir Higgs alanına gereksinim duysa da, daha başka Higgs türü alanlar keşfedilmeyi bekliyor olabilir. Tablo 5.1'e göz attığımızda, kuark ve leptonlar arasındaki benzerlikler açığa çıkar. Her birinden altı tane vardır. Üç nesilden oluşurlar, her bir nesil de iki kuark ve iki leptondan ibarettir. Bu tarz örüntüler elektrozayıf ve baskın alanların *büyük bir birleşik teorisini* araştırmayı teşvik ederler. Karanlık madde ve karanlık enerji standart modele dahil değildir. Bunlar neredeyse kesinlikle kuantize alanlardır. Karanlık enerji Higgs alanıyla ilintili olabilir.[34]

1998'de Takaaki Kajita ve 2001'de Arthur McDonald standart modelin ötesinde yer alan yeni keşifler yaptılar. Toprağın çok derinine gömülmüş devasa detektörlerin kullanıldığı muazzam deneylerde, nötrinoların kütlesi olmadığını ve ışık hızında hareket ettiklerini öngören standart modelle çelişkili olarak, nötrinoların üç çeşidinden en azından birinin kütleye sahip olması gerektiğini gösterdiler. Çalışmaları ayrıca nötrino kütlelerinin çok küçük –bir elektronun kütlesinden milyon kat küçük– olduğunu gösterir. Neden nötrino kütleleri sıfır yerine çok küçük olmak zorundadır? Bunun yanıtını kimse bilmiyor; belki nötrinolar Higgs alanıyla etkileşiyordur veya belki de bunlara kütle kazandıran Higgs alanı dışında bir mekanizma vardır. Kajita ve McDonald bu keşifleriyle 2015'te Nobel Fizik Ödülü'nü kazandılar.

Ve kütleçekimiyle ilgili çok büyük bir problem vardır. Kabul edilen ilk temel kuvvet olan kütleçekimi görünüşe göre "kuantize edilen" (kuantum yönünden yorumlanan) son

kuvvet olacak. Kuantum fiziği bugüne kadar karşılaşılan bütün mikroskobik fenomenleri doğru bir biçimde tanımladığı halde, Einstein'ın genel görelilik teorisi kütleçekimi dahil bütün büyük ölçekli kozmolojik fenomenleri tanımlar.

Standart model ve genel görelilik günümüzde egemen olsalar da, her şey bunlardan ibaret olamaz. Genel görelilik klasik bir teori olduğu halde standart model bir kuantum teorisidir ve ikisinden birinde bir değişiklik yapmadan bir araya gelmelerini sağlamanın bilinen bir yolu yoktur. Genel göreliliğe göre madde kütleçekimine sebep olur ve kütleçekimi de buna karşılık uzay ve zamanın yapısını etkiler.[35]

Mikroskobik kuantum fenomenleri mikroskobik seviyedeki uzay-zaman geometrisi için genel göreliliğin çıkarımlarında değişiklik yapmalıdır. Ancak bir kuantum kütleçekimi teorisi olmadığından, fizikçiler bu tarz değişiklikleri nasıl tanımlayacaklarını bilmiyorlar. Deneysel olarak problem, kütleçekiminin atomik seviyede pratik olarak göz ardı edilebilir olması nedeniyle kuantum kütleçekimi etkilerinin atomlar seviyesinde ortaya çıkmaması yüzünden karmaşıklaşıyor. Örneğin bir hidrojen atomundaki proton ve nötron arasındaki kütleçekimi kuvveti aralarındaki EM kuvvetten trilyon trilyon trilyon kat küçüktür!

Şaşırtıcı bir biçimde, bu atomlardan çok daha küçük bir seviyede olduğu için –o kadar küçük bir seviye ki, deneylerle erişmek asla mümkün olmamıştır– genel görelilik ile kuantum fiziği arasındaki çelişkiler kesin olarak ortaya çıkar. Nedeni şudur: İki protonun ağır çekimde, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda olduğu gibi, fakat çarpıştırıcıda mümkün olandan çok daha yüksek enerjilerde şiddetle çarpıştıklarını düşünün. Kütleçekiminin 0,1 nm (bir hidrojen atomunun çapı) gibi mesafelerde göz ardı edilebilir olduğunu gördük. Ancak iki protonumuz giderek daha çok yaklaştıkça aralarındaki kuv-

vetler artar, dolayısıyla kuvvet alanlarında depolanan enerji de artar. Ancak *enerjinin kütlesi vardır, dolayısıyla protonlar yaklaştıkça kütleleri de artar*. Bu kütle artışı kütleçekimi kuvvetini etkilediği halde EM kuvveti etkilemez, bu da protonlar yaklaştıkça kütleçekimi kuvvetinin diğer kuvvetlere kıyasla muazzam derecede hızlı artmasına yol açar. Zamanla kütleçekimi diğer tüm itme kuvvetlerini aşar ve durum istikrarsız hale gelir. Bu noktanın ötesinde, protonlar arasındaki mesafe, kütleleri sonsuza doğru arttıkça kendiliğinden azalmaya devam eder. Bu tabloda bir şeyler yanlış olmalıdır, çünkü sonsuz bir kütle bütün evrenin çökmesine yol açardı!

İtme ve kütleçekimi kuvvetlerinin büyüklüklerinin eşit olduğu devir noktası, protonlar birbirlerinden yaklaşık 10^{-35} metre –*Planck mesafesi* olarak bilinen mesafe– uzaklıkta olduklarında meydana gelir. Doğrusu, teorisyenler bilinen dört kuvvetin de bu süper küçük mesafede aşağı yukarı eşit olması gerektiğini düşünüyor. Bu mesafede kütleçekimi etkileri kuantum fiziğinde önemli hale gelmelidir, bu da genel göreliliğin önemli bir rol oynaması gerektiğini akla getirir. Kuantum ilkelerini genel göreliliğe dahil eden bir teoriye ihtiyaç vardır.

Bu problem, bir hidrojen atomunun çekirdeğinin yörüngesinde bulunan bir elektron durumunda ortaya çıkan benzer bir problemi hatırlatır. Klasik fizikte yörüngedeki elektronun enerji yaydığı ve çekirdeğin içine hızla düştüğü, elektron çekirdeğe yaklaştıkça EM çekim kuvvetinin sonsuz hale geldiği öngörülür. Ancak bu istikrarsızlık atomların bildiğimiz ve sevdiğimiz şekliyle var olamayacakları anlamına gelirdi ve şimdiye kadar bunun dondurmanın var olmaması demek olduğunu çok iyi anladınız. Niels Bohr bu muammanın çözümünü, 1913'te atomun yapısına kuantum kavramlarını dahil ederek buldu. Bu kavramlar elektronun ışıyamadığı ve dolayısıyla çekirdeğin içine düşmediği, olası en küçük elektron

yörüngesine karşılık gelen, olası en düşük enerji durumunu ifade ediyordu. Mikroskobik mesafelerdeki sonsuz kütleçekimi kuvveti de aynı şekilde paradoksaldır ve çözüm belli ki genel göreliliğe kuantum kavramlarını dahil etmeyi gerektirir. Ancak birçok kişinin çabalarına rağmen bu henüz başarılamamıştır.

Temel kuvvetlerin Planck mesafesinde eşit farz edilmeleri bunun altında yatan tek bir birleştirici kuvvete işaret eder. Böyle bir birleşik teorinin ana adayı *sicim hipotezidir*. Çoğu yazarın aksine, bu güzel ve gelecek vaat eden fikre *teori* yerine *hipotez* diyorum, çünkü şu anda bunu doğrudan destekleyen hiçbir kanıt yoktur. Sicim hipotezi için henüz var olmayan kapsamlı deneysel doğrulamalar bilimsel bir teori için bir zorunluluktur. Kelimeler önemlidir ve ne kadar şahane, yaratıcı ve heyecan verici de olsa, gelecek vaat eden bir tahmin için uygun kelime *hipotez* olabilir.

Sicim hipotezi kuantize edici kütleçekimi problemlerinden doğdu. Sicim hipotezinden önce olası kuantum kütleçekimi teorileri sonsuz kuvvetleri ve diğer mantıksız şeyleri öngörüyordu. Bu problemin kaynağı, kuantum alan teorilerinin, tekil bir kuantumun yeterince büyük enerjilerde daima istenen küçük bir ebada sıkıştırılabileceğini varsaymasıydı. Büyük enerjiler büyük kütlelere işaret ettiği için, kuantumların yüksek enerjilerdeki bu nokta benzeri doğaları teoriyi bozan sonsuzluklara işaret eder. *Sicim hipotezi bütün kuantumların sicim olduklarını varsayarak bu yüksek enerjili nokta benzeri yapıdan kaçınır*. Sicim bir kuantumdur; en yüksek enerjilerde en küçük konfigürasyonuna sıkıştırıldığında, bir nokta yerine, lastik bir şerit gibi tek boyutlu bir ilmeğe indirgenir. İlmek konfigürasyonu tam da sonsuzluklardan kaçınmak için gereken şekilde kuantumu yayar.

Bu fikir mükemmel birleşmeye götürebilir: *Bütün temel*

kuantumlar, aralarındaki tek fark titreşim tarzlarında olan, nihayetinde özdeş olan sicimler olabilir. Fizik ise tam olarak evrenin "müziği", "vibrafonu" olurdu. Fotonlar ve elektronlar doğal harmonilerinden birinde titreşen bir borazana benzer şekilde, farklı değerlerde titreşen, özdeş sicimler olurdu. Evren tek çeşit bir şeyden oluşurdu: Borazanlar.

Hayır, cidden, evren kuantumları çeşitli titreşim durumlarındaki özdeş sicimler olan tek bir kuantize alandan oluşurdu.[36]

Şair T. S. Eliot şöyle yazmıştı: "Keşfetmekten vazgeçmeyeceğiz ve tüm keşiflerimizin sonu başladığımız yere varmak ve o yeri ilk kez tanımak olacak."[37] Demokritos'tan bu yana fizikçiler her şeyi tek bir basit fikre göre açıklayan bir teori bulmayı hayal etmişlerdir. Belki de sicimler bizi bu yere götürecekler.

Parçacık mı, Alan mı yoksa Her İkisi de mi?

Kuantumların parçacık olduğu kavramı çift yarık deneyiyle çelişir. Görmüş olduğunuz gibi, her bir kuantumu iki yarıktan birden çıkan, tüm ekrana yayılan, ekranın atomlarıyla etkileşen, bir atom boyutunda bir bozunuma çöken, yayılmış bir cisim –bir alandaki bir dalga– olarak gözümüzde canlandırmalıyız. Bu bölüm parçacık alan karşıtlığının ortaya çıktığı diğer bağlamların birkaçını inceleyerek, her durumda tüm-alanlar görüşünün kuantum fiziğini incelemenin tek uygun yolu olduğu sonucuna varıyor.

Mikroskobik fenomenler genellikle hem kuantum hem de özel görelilik içerir. Örneğin atomlardaki elektronlar ışık hızının %1 ila %10'una karşılık gelen hızlarda hareket eder ki, bunlar özel görelilik etkilerinin ihmal edilebilirlikten çok uzak olduğu hızlardır. Dirac, Heisenberg, Tomonaga, Schwinger, Feynman ve diğer bilimciler özel görelilik kurallarıyla doğa-

sı gereği uyumlu olan kuantum teorileri oluşturarak bunun varlığını kabul ettiler. Feynman'ın versiyonu bir alan teorisinden çok bir parçacık teorisi gibi görünmesine rağmen, bu teorilerin çoğu uzayda yayılmış alanlarla ilgili gibi görünüyordu. Art arda tartışmalar ortaya çıkıyordu: Görelilik kuantum teorileri alanlarla mı, parçacıklarla mı ilgiliydi?

Kuantum fiziğini özel görelilik çerçevesine oturtmak kolay değildir. Einstein 1905'te özel göreliliği hiçbir kuantum belirtisi taşımayan, salt bir klasik teori olarak oluşturdu. Schrödinger'in kuantum davranışları tanımlayan 1926 tarihli temel denklemi özel göreliliğin *kovaryans* ilkesiyle –fizik yasalarının, ivmelenmeyen her laboratuvarda veya "referans çerçevesinde", o referans çerçevesinin hızı diğer referans çerçevelerine göre ne kadar göreli olursa olsun aynı formu alması gerektiği kavramıyla– çelişiyordu. Einstein'ın kovaryans fikri şunu der: Eğer düz bir çizgide, değişmeyen bir hızda hareket eden, ivmelenmeyen bir yolcu jeti gibi bir referans çerçevesindeyseniz, her şey size "normal" görünmelidir. Örneğin fincanınıza kahve boşaltırsanız, kahveniz bir şekilde uçağın ileri doğru hızını hesaba katan, çapraz bir çizgi izlemek yerine (kahvenizi fincana boşaltmanızı son derece zorlaştırır), doğrudan aşağı doğru akmalıdır (gözlediğiniz gibi). Kovaryans ilkesi sayısız kereler doğrulanmıştır; uçağa bindiğiniz zaman bir fincana kahve boşaltarak bunu siz de doğrulayabilirsiniz –veya dümdüz giden, ivmelenmeyen bir otomobilde yolcuysanız elinizden bir taş bırakabilirsiniz– taş bir elinizden dosdoğru aşağı, diğer elinize düşmelidir. Paul Dirac ve diğer bilim insanları Schrödinger'in denklemini kovaryant hale getirerek bu problemi çözdüler; aslına bakarsanız daha önce "Dirac denkleminin" deneysel olarak Schrödinger'in denkleminden daha doğru olduğunu görmüştük. Gelgelelim, ilk bakışta özel görelilikle çelişir gibi görünen bazı kuantum

fenomenleri vardır. Bu fenomenleri 9. Bölüm'de araştıracak ve çelişkilerin gerçek değil, yalnızca görünürde olduklarını keşfedeceğiz. Ders şudur: Hem kuantum hem göreli olan bir teori hakkında düşünürken, çelişkilerden kaçınmak için oldukça dikkatli düşünmeliyiz.

Özellikle 1974'te, Gerhard Hegerfeldt parçacık fikrinin tutarlılığını hem kuantum hem de göreli olan herhangi bir teori içinde analiz etti.[38] *Parçacığın* net bir tanımından başladı. Bu kelimeyi "bir yerle sınırlandırılabilen" –yani kesin olarak, tümüyle sınırlı bir uzay bölgesi içinde olduğunu söyleyebilecek şekilde izleyerek bulabileceğimiz– herhangi bir oluşum olarak geniş bir biçimde tanımladı. "Sınırlı bir bölge" herhangi bir yönde sonsuzluğa uzanmayan, uzaysal bir bölge anlamına gelir. Oturma odanız sınırlıdır. Pasifik Okyanusu da öyle. Hegerfeldt'in parçacıkları güneş büyüklüğünde olabilir, fakat kesin olarak bulundukları sınırlı *bir* bölge olmalıdır. Bu bizim *parçacık* olarak adlandırmak istediğimiz bir oluşuma pek benzemez.

Hegerfeldt daha sonra *parçacıkların hem kuantum fiziğinin hem de özel göreliliğin standart ilkelerine uyan bir teori içinde var olamayacaklarını* gösterdi. Bu şaşırtıcı sonucun nedeni herhangi bir oluşumun hareket etmesi gereken şekli belirten standart tanımda ve özel göreliliğin kilit bir ilkesinde bulunur.

Hegerfeldt şunu gösterdi: Eğer farz edilen bir parçacık tek bir anda (diyelim, öğleyin) sınırlanmışsa ve bir yerde kalacak şekilde (örneğin bir atoma bağlanmış olsaydı) dış kuvvetler tarafından sınırlanmamış, "serbest bir parçacık" ise, öğleden sonra *herhangi* bir zamanda bir yerle sınırlı olmayacaktır. Örneğin öğleden sonra, bir saniyenin onda birinde, sıfır olmayan bir olasılıkla, başlangıçtaki sınırlı bölgesinin bir milyon kilometre uzağında tespit edilecektir. Bu kuşkusuz tuhaf görünür. Hegerfeldt'e göre eğer bir yerle sınırlı parçacıklar

varsa, bunlar sadece bir an için o yerle sınırlı kalırlar, çünkü ânında sonsuz (sınırsız) bir mesafe boyunca uzayacak şekilde genişlerlerdi. Üstelik şimdi açıkladığım gibi, bu davranış özel göreliliğin kilit bir ilkesini ihlal ederdi.

"Hiçbir şey ışıktan daha hızlı gidemez" ifadesini duymuş olabilirsiniz, fakat aslında bu kavram yanlıştır. Örneğin kozmologlar büyük patlamadan sonraki çok kısa bir zaman aralığı içinde evrenin ışık hızını büyük ölçüde aşan hızlarda genişlediğini düşünüyorlar. Bu hızlı genişleme özel göreliliği ihlal etmez, çünkü uzayın kendisinin genişlemiş olduğu farz edilir ve özel görelilik de *uzayda* hiçbir şeyin, ışığın uzayda hareket ettiğinden daha hızlı hareket edemeyeceğine işaret eder.[39]

Göreliliğin evrensel hız limitinin doğru bir ifadesi şudur: *Cisimler ve bilgiler uzayda ışık hızından daha hızlı aktarılamaz.* Bunun nedenini şöyle açıklayabiliriz. Özel göreliliğin uzay ve zamanla ilgili sonuçları nedeniyle, eğer bir cisim ışıktan hızlı hareket ederse o zaman o cismin zamanda geriye doğru hareket ettiği gözlemlenebilecek bir referans çerçevesi –hareket halinde bir laboratuvar– bulabiliriz. Bu, şeylerin normal "nedensel" sırasını ihlal ederdi, çünkü böyle bir laboratuvar içinde sonuçlar nedenlerden önce meydana gelirdi: Örneğin çırpılmış yumurtalar çırpılmamış haline geri dönerek termodinamiğin ikinci yasasını ihlal ederdi. Ve eğer bilgi uzayda ışıktan hızlı aktarılabilseydi, prensipte, bir haydut çetesine geçmişte büyükbabanızı büyükannenizle tanışmadan önce öldürme talimatı veren bir mesaj göndermeniz mümkün olurdu; mantıksal bir çelişki.

İşte, problemi görüyorsunuz. Eğer öğleyi bir saniyenin onda biri kadar bir süre geçe parçacığımızın bir milyon kilometre uzakta tespit edilebilmesinin en ufak bir olasılığı varsa, bu parçacığın oraya ulaşması için uzayda ışık hızından daha hızlı hareket etmesini gerektirirdi ve bu da göreliliğin evren-

sel hız limitiyle çelişirdi. Dolayısıyla eğer göreliliği ve nedenlerin sonuçlardan önce geldiği kavramını kabul ediyorsak, o takdirde *her serbest yani sınırlanmamış kuantum sonsuzluğa uzanıyor* demektir.

Kuantum vakumu kuantum parçacıkları için ilave problemler teşkil eder. Hatırlarsanız belirsizlik ilkesi her kuantum alanının, hiçbir kuantum içermese de, en azından minimal rastgele dalgalanmalar sürdürmesini gerektirir. *Eğer parçacıklar temel gerçeklik ise, hiç parçacığın olmadığı vakumdaki dalgalanma değerlerini içeren şey nedir?*

Kuantum vakumu teorisyenlerin hayal güçlerinin bir ürünü değildir. Bu vakum gerçek kuvvetler uygular. Bu kuvvetler ölçülebilir roller oynar –örneğin elektronun manyetik momentinde (1. Bölüm); hidrojen atomunun *lamb kayması* olarak bilinen, EM spektrumun bir detayını belirlemede ve *Casimir kuvveti* denen bir etkide– ki, bunun öyküsünü şimdi anlatacağım.

Casimir kuvveti 1948'de öngörüldü. Eğer elektriksel olarak nötr, iki düz metal plaka, aralarında kısa bir mesafe olacak şekilde, birbirlerine paralel yerleştirilirse ve iki plaka bütün dış kuvvetlerden arındırılmış, boşaltılmış bir bölge içindeyse, kuantum fiziği hesaplamaları, aralarındaki mesafe azaldıkça plakaların hızla artan bir kuvvetle birbirlerini çekeceklerini gösterir. Deneyler beklenen teorik değerin %1'i içinde bu sonucu doğrular.[40]

Böyle bir kuvvete ne sebep olabilir? Plakalar baştan sona elektriksel olarak nötr kalır. Kütleçekimi kuvveti gözlemlenen kuvvete neden olamayacak kadar küçüktür. Teori hiçbir dış kuvvet olmadığını varsayar ve deneyler de bunu yüksek bir derecede başarır. Teoriye göre kuvvete EM alanın vakum

dalgalanmaları neden olur. Nedeni şudur: Bir vakumda hiç kuantum olmamasına rağmen –vakum alanında yol alan dalgalar yoktur– bir keman yayı boyunca veya bir borazan içindeki hava sütunu içinde oluşan dalgalara benzer, *duran dalga* denen, yol katetmeyen, rastgele dalgalar vardır. Vakum EM alanın bu dalgalanmaları çeşitli dalga boylarında birçok tekil duran EM dalgaya ayrılabilir.[41] Paralel plakaların dışı gibi sonsuz derecede büyük bir bölgede, bu dalgaların dalga boylarında sınırlama olmaz. Ancak iki plaka arasındaki bölgede (eğer plakalar kare ise kutu biçimindedir) sınırlamalar vardır: Her bir duran dalga bu *oyuk* adı verilen şekle uymalıdır. Çoğu dalga boyu plaka sınırlarında düzgün bir şekilde ortaya çıkacak şekilde uymaz. Bunu başka bir şekilde ifade edecek olursak, çoğu dalga boyu, çoğu dalga boyunun sabit uzunluktaki bir sicim üzerinde rezonant olmadığı gibi, oyuk içinde de "rezonant" değildir.

Dolayısıyla oyuğun içindeki ve dışındaki EM vakumun karakteristik yapısı arasında büyük bir fark vardır. Oyuk dışında dalgalanmaların çok daha geniş bir aralığına izin verilirken, "tam uyan" bu dalgalanmalara sadece içeride izin verilir. Bu dalgalanmalar iki plakanın iç ve dış yüzeylerine basınç uygular, ancak her bir plakanın dışı üzerindeki kuvvet daha büyüktür, çünkü içerisine kıyasla dışarıda daha fazla dalgalanma çeşidine izin verilir. Dolayısıyla her bir plaka üzerinde net bir içe doğru kuvvet vardır. Bu Casimir kuvvetidir. Kuantumun olmadığı vakumda metal plakalar üzerine kuvvet uygular. Eğer evren parçacıklardan oluşuyorsa, hiç parçacığın olmadığı vakumda bu plakalara içe doğru basınç uygulayan nedir?

Unruh ışıması vakumun kuantum parçacık kavramı için yarattığı başka bir büyüleyici bilmecedir. 1976'da William

Unruh özel görelilik ve kuantum fiziğine dayanarak bir vakumda hareket eden, ivmelenmekte olan bir gözlemcinin, ivmelenmeyen bir gözlemcinin tespit edemeyeceği kuantumları tespit edeceğini öngördü.[42] Ayrıca eğer iki gözlemci de etraflarındaki uzayın sıcaklığını ölçerlerse, ivmelenmeyen gözlemci sıcaklığı 0 kelvin, ivmelenen gözlemci de tespit ettiği kuantumların rastgele ısıl hareketi nedeniyle 0 kelvinden büyük olarak bulur. Başka bir deyişle, boş uzayda etrafta dalgalanan (ve dolayısıyla ivmelenen) bir termometre, boş uzayda sıcaklığa *sahip* kuantumlar olmamasına rağmen sıfırdan farklı bir sıcaklık kaydedecektir!

Kesin olarak gözlemlenmemiş fakat birçok uzmanın doğru olduğunu düşündüğü bu tahmin,[43] kuantumları parçacık olarak görüyorsanız can sıkıcıdır. Gerçek parçacıklar bir gözlemciye göre mevcut olabildiği halde, aynı uzay bölgesini gözlemleyen başka bir gözlemciye göre nasıl mevcut olamaz? Ancak evren alanlardan oluşuyorsa her şey yerli yerine oturur: İki gözlemci de uzayı kaplayan aynı vakum alanını deneyimler, fakat bir gözlemcinin ivmesi bu alanı farklı yorumlamasına neden olur.

Tahmin etmiş olabileceğiniz gibi, ölçülebilir bir miktarda Unruh ışıması üretmek için gereken ivme çok çok büyüktür. Sadece 1 kelvin sıcaklığına sahip bir vakum bölgesini gözlemlemek için, dünyada serbest düşmekte olan bir cismin ivmesinden on milyon kere trilyon kat daha fazla bir ivme (10 milyon kere trilyon "g"den fazla) gerekir.

Almanya'nın Konstanz şehrinde bulunan Uygulamalı Foton Bilimi Merkezi'nde Alfred Leitenstorfer ve Claudius Riek'in yürüttüğü, gerçekliğin alan doğasının en ikna edici olası ispatı olabilecek hassas bir deneyde, öngörülen vakum

enerjisi dalgalanmaları yakın zamanda doğrudan tespit edildi. Plan 0,000.000.000.000.001 (10^{-15}) saniye gibi kısa zaman aralıklarında boş uzayın son derece küçük bölgelerini inceleyecek, hassas lazer optik tekniklerini kullanmaktı. Bu kadar küçük bir bölgede tespit edilen rastgele EM bozunumların dalga boyları muhakkak çok kısa olur ve dolayısıyla yüksek bir frekansa ve büyük –doğrudan tespit edilebilecek kadar büyük– bir enerjiye sahip olurlardı. Deney hiç fotonun bulunmadığı, mutlak karanlıkta bile var olan bu EM titreşimlerin varlığını ikna edici bir biçimde kanıtladı.

Gene şunu sormalıyız: Eğer gerçeklik parçacıklardan oluşuyorsa, o zaman farz edilen hiçbir parçacığın olmadığı bu vakum halinde titreşen nedir?

Bu yanlış parçacık kavramının yer etmesinin bir nedeni de, konuşma diline özgü, yanıltıcı *parçacık* kelimesinin yaygın bir şekilde kullanımıdır. Kanıtlara rağmen ve önde gelen kuantum teorisyenleri alan görüşünü açık bir biçimde savundukları halde, üniversite kütüphanemdeki ders kitaplarının incelenmesi fizik öğrencilerinin çoğunun hâlâ evrenin "parçacık" adı verilen şeylerden oluştuğunu öğrendiklerini gösterir.

Kuantumlar kum taneciklerine veya ufak bilyelere veya diğer normalde sezgiye dayalı parçacıklara pek benzemez. Bu ve takip eden bölümlerde açıklandığı gibi, kuantumlar oldukça birleşik, yayılmış, esnek, değişebilir, öngörülmez, kırılgan, hafif oluşumlardır; en muazzam hızlarda uçuşabilir veya titreşebilir, muazzam bölgelere yayılabilir, yine de görünüşte bir anda atomik veya daha küçük boyutlara çökebilir, enerjilerini başka bir forma dönüştürerek bir anda kaybolabilir, bozunmakta olan bir atomun veya başka bir kuantumun veya rastgele bir enerji dalgalanmasının enerjisinden birden

var olabilir ve birbirlerine dolanarak son derece birleşik fakat hassas bir biçimde bağlı, belki de kozmolojik mesafelerde ânında temas halinde görünen, kompozit ilişkili cisimler ağı oluşturabilir.

Böyle bir cismi tanımlamak için *parçacık* kesinlikle yanlış kelimedir. En temel bilimsel teorimiz hakkında ciddi bir yanlış kanı uyandırır. Dünyanın bilimsel açıdan eğitimli hale gelmesi için, ki birçoğumuz dünyamızın yaşanabilir kalması için öyle olması gerektiğini düşünüyoruz, bilim insanları uygun anlamlarını gösteren veya en azından uygun anlamlarıyla bariz bir şekilde çelişmeyen terimler kullanmalıdır. Neden doğru kelimeyi, yani *kuantumu* kullanmıyoruz?

Tüm-alanlar tablosunun ilginç çıkarımları vardır. Fizikçiler temel alanları uzayın durumları olarak görür. Dolayısıyla elektron, foton, atom ve moleküller uzayın durumları, "halleri" yani "şekilleridir". Öyle ki, lahanalar, krallar ve ayaklar uzay hallerinden oluşur.

Fantastik mi? Evet, fakat bu deneylerle çok detaylı biçimde doğrulanmıştır ve bazılarının evrenin nasıl parçacıklarla kaplı olabileceğini açıklamaya çalışırken tasarımladıkları, çarpıtılmış, doğrulanmamış ve sahte bilimsel görüşlerinden çok daha az fantastiktir (10. Bölüm).[44]

KISIM 2

KUANTUMLARIN DAVRANIŞLARI

6

Mükemmel Rastgelelik

Richard Feynman şu sözleriyle meseleyi çok iyi ifade etmişti: "Bir zamanlar bir filozof şöyle demiş: 'Bilimin var olabilmesi için, aynı koşulların daima aynı sonucu vermeleri şarttır.' Fakat durum böyle değildir. Gelecek öngörülemez."[1] *Kuantum rastgeleliği* klasik fiziğin temel bir çıkarımının karşısında uçuşup gider: Öngörülebilirlik.

Albert Einstein kuantum rastgeleliğine soğuk bakıyordu. Bir keresinde arkadaşı Niels Bohr'a şöyle demişti: "Kuantum mekaniği çok etkileyici. Ancak içimden bir ses bana bunun henüz gerçek olmadığını söylüyor. Teori çok şey üretse de bizi Tanrı'nın sırrına zar zor yaklaştırıyor. Ne olursa olsun, Tanrı'nın zar atmadığı kanısındayım."

Bohr'un yanıtı ise şuydu: "Einstein, Tanrı'ya ne yapacağını söylemekten vazgeç."[2]

1650'den 1900'e kadar çok iyi iş gören klasik fizik dünyada sıradan koşullar altında gözlemlenen neredeyse her şeyi oldukça doğru bir biçimde tanımladı. 3. Bölüm'de görmüş olduğumuz gibi, şimdinin kesin bir tanımı verildiğinde, klasik fizik prensipte tüm geleceği ve geçmişi öngörür. Yazı tura atmanın klasik ama öngörülemez olduğunu öne sürerek itiraz edebilirsiniz fakat bu prensipte öngörülebilirdir. Parayı atan

kişinin başparmağının uyguladığı kuvveti, hava direncini, yere olan mesafeyi, paranın sıçramasının elastik özelliklerini vs. dikkate alırsanız klasik fizik sonucu tahmin edebilir.

Kuantum rastgeleliği yazı tura atışlarından daha derine iner. Temel rastgelelik genellikle kuantumlar arasındaki etkileşimlerle birliktedir. Doğadaki hiçbir şey belirli bir kuantumun etkileşebileceği başka bir kuantumla etkileşime girip girmeyeceğini belirlemez ve yine doğadaki hiçbir şey böyle bir etkileşimin özel sonucunu belirlemez. Böyle şeyler genellikle rastgele, belirsizdir. Örneğin radyoaktif bir çekirdek içindeki bir alfa kuantumu (3. Bölüm) çekirdeğin yüzeyinin hemen dışında bulunan güçlü EM itme kuvvetiyle etkileşebilir veya etkileşmeyebilir ve etkileşirse de çekirdekten hangi yönde çıkacağı belirsizdir.

Daha önce belirttiğim gibi, kelimeler önemlidir. Kuantum rastgeleliği çoğunlukla *kuantum belirsizliği* olarak ifade edilir fakat bunun şundan veya bundan emin olmayan *insanlarla* doğrudan bir ilişkisi olduğunu düşünmek büyük bir yanılgı olur. Kuantum fiziğinin tümü gibi kuantum rastgeleliği de nesnel evrene dolanmıştır ve insanlarla özel olarak bir ilgisi yoktur. Heisenberg bu konu hakkındaki 1927 tarihli çığır açıcı çalışmasında Almanca *ungenauigkeit* (*indeterminacy*-belirsizlik) kelimesini kullanmış, sadece dipnotlarda *unsicherheit* (*uncertainty*-belirsizlik) kelimesini kullanmıştır. Ne yazık ki kullanımda kalan sonraki terim olmuştur. Şimdiye kadar tahmin etmiş olabileceğiniz gibi, bu kitap daha az insan kökenli kelimeleri kullanacak: *Rastgelelik* ve *belirsizlik*. Bu iki terim eşdeğerdir: Bir olay, her detay hesaba katıldıktan sonra bile öngörülemiyorsa esasen rastgele yani belirsizdir.

Temel Rastgeleliğin Kanıtları ve Tanımı

1. Bölüm'deki ışınları kısmen yansıtan vitrin gibi, bir ışın demeti ayırıcısı da ışığı iletilen ve yansıtılan ışınlara ayırır.

Bir 50-50 ışın demeti ayırıcısı şu şekilde yapılabilir: Küçük bir cam plakaya alüminyum buharı verilir, ta ki alüminyum gelen bir ışının %50'sini yansıtacak kalınlığa erişene kadar.

Yine Şekil 1.1'deki deneyde ikinci ışın demeti ayırıcısının olmadığını varsayalım. Gelen ışın saniyede bir fotona düşürülmüş olsun. 1. Bölüm'de her bir fotonu, ya birinci ya da ikinci detektörün tespit etmesinin, tekil kuantumların bütünlüğünü doğruladığını gördük: Bir foton asla bölünmez, asla iki detektöre birden gitmez. Ve deney birçok özdeş fotonla tekrar tekrar yapılırsa çarpma istatistiği tamamen rastgele çıkar, fotonların %50'si her bir detektöre gider. Her foton tamı tamına aynı durumla karşılaşır, gene de fotonların yarısı bir detektöre, diğer yarısı da diğer detektöre gitmelidir. Kuantumun bütünlüğü seçimin rastgele olmasını dayatır.

Şu soruyu sormak doğal fakat nihayetinde nafiledir: Hangi detektöre çarpılacağını belirleyen nedir? Örneğin bunu belirleyen cam plakadaki düzensizlikler midir? Ancak cam yüzeyi daha muntazam yapıldığında ayrılmanın daha az değil, daha çok rastgele olduğu görülür. Dolayısıyla görünüşe göre yanıt, yolu *hiçbir şeyin* belirlemediğidir. Kuşkusuz hiçbir belirleyici faktör keşfedilmemiştir. Her bir foton tamamen simetrik bir durumla karşılaşır, gene de her bir foton bütün kalmalıdır. Doğanın bu ikilemi çözebilmesinin tek bir yolu vardır. Sonuç her detektörde %50 etkileşim olasılığıyla, tamamen rastgele olmalıdır. Bu şekilde *kuantumun bütünlüğü doğada rastgeleliği dayatır*.

Kuantum rastgeleliğinin görünürde rastgele makroskobik fenomenlerle eşitsizlenmesinde bir mükemmellik vardır. İş kolları, kumarhaneler vb. sıklıkla güvenilir rastgele sayılar dizisine ihtiyaç duyar. Bunları oluşturmak kolay değildir. Yazı tura atmak, zar atmak ve benzerlerinin yanı sıra bazı matematik formülleri ve bilgisayar programları görünüşte

rastgele seçilmiş sayı listeleri oluşturabilir. Ancak bu listeler kapsamlı istatistik testlerine tabi tutulduklarında mükemmel rastgelelikten saparlar. Örneğin sıfır ve birlerin sözümona rastgele dizisinde, arka arkaya altı sıfırdan oluşan çok fazla dizi tutarlı bir şekilde bulunabilir. Problem şu ki, kişinin başlangıçtaki koşulları hakkında yeterli bilgisi varsa herhangi bir klasik sürecin sonucu nihai olarak belirlenebilir, dolayısıyla bu "gerçekte" rastgele değildir. Uzun sıfır ve bir dizileri oluşturmak için ışın demeti ayırıcıları ve radyoaktif bozunma gibi kuantum süreçleri kullanıldığında, istatistik testleri bu dizilerin herhangi bir klasik rastgele sayı oluşturma yönteminden kolayca ayırt edilebilir ve daha rastgele olduklarını gösteriyor.[3] Kuantum rastgeleliğin bu mükemmelliği temel doğasına dair azımsanmayacak bir kanıt sunar.

Çoğumuz için bu durum Tanrı'nın gerçekten de zar attığını, kuantize doğanın klasik rastgeleliğin boy ölçüşemeyeceği bir biçimde, tamamen rastgele olduğunu kanıtlar. Ancak bilim asla mutlak surette kesin değildir ve bazı fizikçiler, ışık bir ışın demeti ayırıcısından geçtiğinde, gözlemlenmeyen "gizli değişkenlerin" her bir fotonu ya yansımaya ya da iletmeye yönlendirdiğini, bunun da kuantum süreçlerin sadece rastgele göründüklerini, fakat klasik fizik gibi nihayetinde önceden belirlenmiş olduklarını gösterdiğini öne sürerler. Gizli değişkenleri daha sonra ele alacağım. Günümüzdeki çoğu fizikçi için rastgelelik gerçektir ve gizli değişkenler yoktur. Kuantum temelleri uzmanı 17 kişiden oluşan bir gruba yakın zamanda şöyle bir soru soruldu: "Kuantum mekaniği doğada indirgenemez rastgeleliğe mi işaret eder?" Uzmanlardan on biri oldukça açık bir evet, ikisi hayır dedi, dördü de çekimser kaldı.[4] Çalışan fizikçiler (çoğu kuantum temelleri uzmanı değildir) ve standart ders kitapları kuantum fenomenlerinin doğaları gereği rastgele olduklarında hemfikirdir.

Kuantum rastgeleliği klasik dünya görüşüne derinden müdahale eder. Örneğin ışık maddeyle ne zaman etkileşse aniden ortaya çıkar. Işığın tek bir yarıktan geçtiği deneyi düşünün. Eğer yarık çok darsa ışın demeti görüntüleme ekranının tüm yüzeyine yayılır yani "kırınım yapar" (2. Bölüm); böylece fotonların hepsi aynı dar yarıktan çıkmalarına rağmen ekranın tüm yüzeyinde tek tek farklı noktalara çarparlar. Yarığı daraltmak ise ışını daha da genişleterek bu etkiyi artırır. Belki de ışını ilk yarığın hemen ötesindeki ikinci bir dar yarıktan göndererek paralel hale getirebiliriz; kuşkusuz, iki yarıktan da geçen bu fotonlar dümdüz hareket eden, tek bir dar ışın halinde paralel hale gelir. Ancak çarpma noktasını kontrol etmeye yönelik tüm bu girişimler başarısız olur. Yarıktan çıkan *her bir proton* yarığın ötesinde geniş bir biçimde yayılır ve daha sonra ekrandaki belirli bir molekülle etkileşerek çöker. Başka bir molekül yerine özellikle bu molekülü belirleyen nedir? Hiçbir şey. Ekranın bütün molekülleri esasen özdeştir ve etkileşim noktası temelde rastgeledir.

Aynı belirsizliği Şekil 5.1'deki iki yarık örüntüsünde de görüyoruz. Şekil 5.1'deki fotonlar için geçerli olan şey Şekil 5.4'teki elektronlar için de geçerlidir. Tüm foton ve elektronların yanı sıra, atomlar, moleküller ve diğer tüm kuantumlar da rastgele etkileşir. Fizikçi Edward Teller bunu iyi bir şekilde şöyle ifade etmiştir: "Atomun yapısını anlamak için geleceğin belirsiz olduğu fikrini kabul etmeliyiz. Gelecek fiilen dünyanın her bölümünde, her atom ve her canlı ile yaratıldığı ölçüde belirsizdir. Makine benzeri determinizmin tam zıddı olan bu bakış açısı idrak edilmesi gerektiğine inandığım bir şeydir."[5]

Gelecek şimdide kodlanmamıştır ve fiilen meydana gelene kadar var olmaz. Kuantum fiziğine göre geçmiş ve gelecek arasında muazzam bir niteliksel fark vardır: Geçmiş, prensipte geçmiş

zamanlarda ve yerlerde tam olarak neler olduğunu bilmenin mümkün olduğu anlamında vardır. Bu anlamda kuantum rastgeleliği nedeniyle gelecek mevcut değildir. Klasik fizik geçmiş ile gelecek arasındaki ayrımı yalnızca termodinamiğin ikinci yasası vasıtasıyla tanır: Toplam entropi geçmişte daha azdı ve gelecekte daha büyük olacaktır. Ancak kuantum fiziği şu âna, "şimdiye", özünde belirsiz olandan özünde belirli olanı ayıran an olarak eşsiz bir rol atfeder gibidir.

Olasılık belirsiz sonuçları olan süreçlerle bağlantılı olarak kullanılır. Bir olayın olasılığı sayısal bir ölçümdür; olay olanaksızsa değeri 0, kesinse 1 ve olayın meydana geleceğinden daha eminsek daha büyüktür. Yazı tura atışı gibi tekrarlı süreçler için bunu sayısal olarak tanımlamak kolaydır. Turanın gelme olasılığının %50 olduğunu söylediğimizde kastettiğimiz şey, uzun bir denemeler dizisinde atış sayısı arttıkça tura oranının %50'ye giderek daha çok yaklaştığıdır. Belirli bir sonucun *olasılığı* uzun bir denemeler dizisinde o sonucun meydana gelmesinin kesirli ifadesidir (yani *göreli sıklığı*). Göreli sıklıklar ancak uzun bir deneme dizisinin mümkün olduğu süreçlerde bir anlam ifade eder. Genellikle içsel simetrilere dayalı olasılıkları hesaplamak mümkündür. Örneğin tek bir zar atışında altı sonucun arasındaki simetri her birinin olasılığının altıda bir olduğuna işaret eder (sürecin gerçekten simetrik yani adil olduğunu varsayarsak). İki zar atışında 36 farklı simetrik sonuç olduğunu kabul ederiz, bu da her biri için 1/36 olasılığa işaret eder; dolayısıyla, örneğin 12'nin olasılığı 1/36, 11'in olasılığı 2/36'dır, vb. Bu tahminleri deneysel olarak test etmek eğlencelidir. Babam bir keresinde bunu yapmam için 72 atışın tahmin edilen istatistiğinin bir grafiğini çizerek beni cesaretlendirmişti. Deneyin. Babam gurur duyardı.

Peki, bu cumartesi ilçe fuarındaki açılış yarışmasında altı attan her birinin kazanma olasılıkları nelerdir? "Her bir atın üzerine altıda biri" gibi kolay bir yanıta dayalı bahis oynarsanız, o zaman sizinle poker oynamak isterim. Ya da belirli bir Mars'a iniş aracının Mars'a ulaşma ve uygun bir şekilde konuşlanma olasılığı nedir? Göreli sıklıkları kendine özgü süreçlere uygulamak kolay değildir. Ancak belirli bir sonucun meydana geleceğine dair kişisel inanç derecemizi temsil eden, sıfır ila bir arasında bir rakam atamak yararlı olabilir. Bereket versin ki bu mesele hakkında endişelenmemiz gerekmiyor, çünkü kuantum olasılıkları öznel, kendine özgü değildir. Belirli bir türün tüm kuantumları özdeş ve kuantum deneyleri en azından prensipte tekrarlanabilir olduğu için göreli sıklık tanımı yeterlidir ve belirli bir kuantum sürecini doğru olarak tanımlayan tek bir olasılık kümesi vardır. Bu olasılık kümesi tekrar eden denemelerdeki göreli sıklıklarla kontrol edilebilir.[6]

İstatistik olasılıkla bağlantılı olarak ortaya çıkan başka bir kelimedir. Olasılık bir teorisyenin ideali, uzun dönemli, düzenli tekrarlı denemelerdeki göreli sıklık, *istatistik* ise güncel sonlu denemeler kümesinin belirli sonuçlarıdır. Adil bir yazı tura atışında olasılıklar %50 yazı ve %50 turadır, fakat 100 yazı tura atışındaki istatistik 57 tura, 42 yazı ve köpeğiniz parayı yutarsa bir olabilir.

Radyoaktif Bozunma: Tamamen Rastgele

Bildiğiniz gibi (3. Bölüm) bazı çekirdek türleri radyoaktiftir; yani genellikle küçük bir alfa veya beta kuantumunun yayılımı vasıtasıyla başka bir çekirdek türüne dönüşerek kendiliklerinden bozunurlar. Bunun öyküsü kuantum rastgeleliğinin mükemmel bir örneğidir.

Bir alfa kuantumu (iki proton ve iki nötron) fevkalade istikrarlı bir birleşim olduğu için, birçok çekirdek içinde bir

altyapı olarak kolayca oluşur. Alfa bozunmasına eğilimli bir çekirdekte, çekirdek kuvvetleri çekirdeğin dış yüzeyinin yakınında alfa kuantumlarının oluşumunu destekler. Uzayda yayılan bir madde alanı olan bu tarz alfa kuantumlarının her biri tümüyle çekirdek yüzeyinin etrafına yayılır. Bu dış bölgede diğer protonların ve nötronların güçlü nükleer çekme kuvveti sadece çekirdek yüzeyinin dışına hâkim olur;[7] bu yüzeyin ötesinde bu kısa erimli çekme kuvveti ciddi oranda azalır ve diğer protonların alfa kuantumuna uyguladıkları dışa doğru itmeyle uzun erimli itici EM kuvveti baskın hale gelir.

Eğer klasik fizik geçerli olsa bir alfa kuantumunun çekirdek yüzeyinin dışında görünmesi mümkün olmazdı, çünkü çekirdeğin çekme kuvveti, bir kâsenin yan taraflarının kâsenin içinde yavaşça dönen bir bilyenin kaçmasını önlemesine benzer şekilde onun kaçmasını önlerdi. Fakat eğer kâse ve bilye mikroskobik olsa ve kuantum fiziğinin hâkimiyeti altında olsa, bilyenin madde alanının bir kısmı "kâsenin" kenarlarının içinden dışarıya uzanabilirdi. Bu şekilde alfa kuantumumuz sınırlayıcı kâsesinin (çekirdeği) dışındaki, klasik fizikteki yasak bölgeye uzanır ve alfa kuantumunun bu bölgede bir noktayla etkileşmeye rastgele "karar verme" olasılığı vardır; ve eğer bunu yaparsa alfa kuantumunun çekirdek yüzeyi boyunca "tünel yaptığı" söylenir. Daha sonra diğer protonların uyguladıkları muazzam kuvvet alfa kuantumunu dışa doğru yüksek enerjiyle savurur. Bu alfa bozunumudur. Böyle bir etkileşimin olup olmayacağı ve olursa alfa kuantumun hangi yönde uçacağı belirsizdir.

Belirli bir çekirdeği inceleyerek bozunmak üzere olup olmadığını belirleyebileceğimizi sanmak yaygın bir yanlış kanıdır. Eğer tek bir çekirdeğe dikkatle bakabilseydik, zaman içinde önemli bir değişim göstermeyen, istikrarlı bir titreşim halinde olduğunu görürdük. Ancak hemen akabinde çekir-

dek mikro saniye içinde bozunabilir veya bozunmamış halini binlerce yıl koruyabilir. Bu zar atışı gibidir: İlk atışta hepyek gelebilir veya sonraki 500 atışta hiç gelmeyebilir.

Kuantum rastgeleliğe rağmen alfa bozunumunda ve diğer kuantum süreçlerinde deterministik sıranın önemli bir öğesi vardır. İster radyoaktif bozunma ister ışın demeti ayırıcıları olsun, uzun dönemli istatistikler tahmin edilebilirdir. Her seferinde bir fotonun incelendiği ışın demeti ayrıştırıcısı deneyi tamamen belirsizdir. Buna rağmen 1.000 fotonda her detektöre yaklaşık 500'ünün gideceğini tahmin edebiliriz. Temel rastgelelik bu istatiksel intizamı garanti eder. Aynı istatiksel determinizm, Şekil 5.1 ve Şekil 5.4'te zamanla ortaya çıkan öngörülebilir örüntülerden de görebileceğiniz gibi, çift yarık deneyinde de işler.

Kuantum etkileşimler ayrı ayrı rastgeledir; fakat diğer rastgele süreçler gibi, deneme sayısı çok olduğunda kuantum süreçlerin istatistiği yaklaşık olarak belirlidir. Makroskobik seviyede klasik determinizmin ortaya çıkmasına yol açan işte tam olarak bu istatiksel determinizmdir. Örneğin çift yarık deneyinde zilyonlarca foton geçtiğinde genel sonuç esasen tahmin edilebilirdir (Şekil 2.3). Gelgelelim sadece 25 foton geçtiğinde sonuçlar öngörülebilir olmaktan çok uzaktır (Şekil 5.1a).

Bu ironiktir. Kuantumun bütünlüğü doğadaki temel belirsizliğe yol açar, fakat kuantum seviyesindeki bu mükemmel rastgelelik *nedeniyle* klasik seviyede determinizm ortaya çıkar.

Kuantum belirsizliğin daha derinlerine inmeden önce çekirdeğin yapısıyla ilgili bir noktayı açıklamak istiyorum. Bir çekirdeğin özelliklerini önemli ölçüde etkileyen sadece proton sayısı değil, aynı zamanda nötron sayısıdır da. O yüzden belirli bir çekirdeği irdelemek için sadece hangi elemente ait olduğunu (proton sayısını) değil, o elementin hangi *izotopuna* ait olduğunu (nötron sayısını) da belirlememiz gerekir. Örne-

ğin karbon (C) elementinin çekirdeğinde altı proton vardır, fakat nötron sayısı altı, yedi veya sekiz olabilir. Bu üç izotopu C-12, C-13 ve C-14 şeklinde kısaltırız; buradaki sayılar toplam nükleon (proton artı nötron) sayısını gösterir. Bu üç karbon izotopunun da elektron sayısı aynıdır ve dolayısıyla kimyasal özellikleri özdeştir, fakat çekirdek özellikleri oldukça farklıdır. Örneğin C-14'ün 6 protonu ve 14-6 = 8 nötronu vardır, radyoaktiftir fakat C-12 ve C-13 değildir.

Uranyum-235 (U-235) atomlarından oluşan çok küçük bir örnek düşünelim; bunun ağırlığı bir mikrogramın yarısına (bir gramın milyonda birinin yarısı) eşit olabilir ki, bu bin trilyon atoma karşılık gelir. Bu izotopun çekirdeğinin 92 protonu ve 235-92 = 143 nötronu vardır. Her U-235 çekirdeğinin yüzeyinin yakınında yüzen belirli sayıda alfa kuantumu vardır ve bunların madde alanları yüzeyin çok az ötesine uzanır. Dolayısıyla her U-235 çekirdeğinde, belirli bir zaman periyodunda, diyelim 1 saniyede, bir alfa kuantumunu dışarı doğru fırlatacak bir etkileşimin meydana gelmesinin belirli bir olasılığı vardır. Örneğimiz bin trilyon çekirdek içerdiği için bu olasılıklar öngörülebilir istatistiklere çevrilebilir.

Bu tarz en yararlı istatistik *yarılanma ömrüdür*. Yarılanma ömrü sırasında özdeş radyoaktif çekirdeklerden oluşan büyük bir örneğin yarısının bozunması beklenebilir. Eşdeğer bir tanım da, izotopun yarılanma ömrünün tek bir çekirdeğin bozunma olasılığının %50 olduğu süreye karşılık gelmesidir. U-235'in yarılanma ömrü yaklaşık 700 milyon yıldır. Yarılanma ömürleri çok fazla çeşitlilik sergiler: U-239'un yarılanma ömrü 24 dakika, U-238'inki 4,5 milyar yıl ve polonyum-214'ünki 0,000164 saniyedir.

Bin trilyon U-235 atomundan oluşan örneğimiz için belirli bir gündeki ortalama bozunma sayısı yaklaşık 3.000, yani 30 saniyede ortalama 1 bozunmadır. Vücudunuza giren her biri

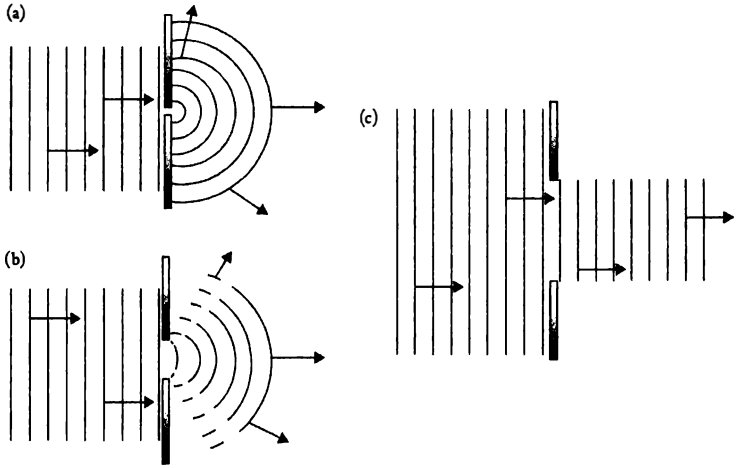
biyomoleküllerden elektron çıkararak, yani molekülleri iyonize ederek biyolojik zarar verebilir. Bununla birlikte 30 saniyede bir yayılma düşük seviyeli bir alfa ışımasıdır, yakındaki insanlar için çok düşük bir risk taşır. Örneğin bu ortalama bir insanın doğal olarak etrafımızdaki hava, taş ve topraktan aldığı doğal alfa ve beta ışıması seviyesinden çok daha azdır. Küçük U-238 örneklerinin radyoaktifliği daha da azdır, çünkü U-238'in yarılanma ömrü daha uzundur. Ancak bin trilyon U-239 atomunu elinizde tutmak istemezsiniz, çünkü her saniye yaklaşık 300 milyarı bozunur.

Hem tekil radyoaktif çekirdeklerin belirsizliği hem de radyoaktif çekirdeklerin büyük örneklerinin istatiksel düzenlilikleri kuantum fenomenlerin mükemmel rastgeleliğini doğrular.

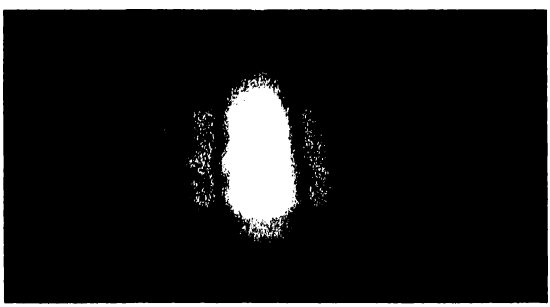
Kuantum Fiziği İstatistikseldir

Daha önce belirttiğimiz gibi, ışın demeti ayrıştırıcısı deneyi kuantumlamanın mutlaka belirsizliğe yol açtığını kanıtlar. Her bir fotonun iki simetrik seçeneği olmasına rağmen foton bölünemez. Bu bilmecenin çözümü belirsizliktir. Yine de ışın demeti ayrıştırıcıları ve diğer kuantum fenomenleri istatistiksel olarak öngörülebilirdir: Birçok denemeden elde edilen birikimli istatistik öngörülebilirdir. Kırınım, bu ve sonraki bölümde kuantum belirsizliğin temellerini daha derinlemesine araştırmamıza imkân veren, yol gösterici bir örnek sağlar.

Şekil 2.1 su dalgalarının iki yarık içeren bir bariyerden geçtikten sonra yayılmalarını –kırınımlarını– gösterir. Bir dalga ne zaman küçük bir delikten geçse daima böyle bir kırınım meydana gelir; bunun nedeni deliğin, bozunumun bariyerin uzak tarafındaki tüm bölgeye yayılması için bir kaynak sağlamasıdır. Deneysel olarak delik ancak dalga boyundan küçük veya kıyaslanabilir olduğunda anlamlı bir kırınım meydana



Şekil 6.1 Bir dalga tek yarıktan geçtiğinde oluşan kırınım. Yarığın sol tarafındaki düz çizgiler dalga zirvelerini temsil ediyor. Dalga boyu yan yana çizgiler arasındaki mesafedir. (a) Eğer yarığın genişliği dalga boyundan küçükse yarık bir nokta kaynak gibi davranır ve dalgalar tüm yönlerde kırılıp yayılır. (b) Eğer yarık genişliği dalga boyundan biraz daha büyükse dalga kısmen kırılıp yayılır ve kenarlarda girişim olur (tek yarığın farklı bölümlerinden geçen farklı dalgalar arasında). (c) Eğer yarığın genişliği dalga boyundan çok daha büyükse dalgalar diyagramda gösterilmeyen kenarda hafif yayılma haricinde düz geçer.



Şekil 6.2 Genişliği dalga boyundan birkaç kat daha büyük olan bir yarıktan yayılan ışığın fotoğrafı. Örüntüde tek yarığın farklı kısımlarından kaynaklanan girişim nedeniyle geniş bir merkezî bölge ve dar yan bantlar vardır.

gelir ve delik dalga boyundan çok daha büyük olduğunda bu kırınım sadece deliğin kenarlarındaki küçük bir etki olur. Şekil 6.1 başlıkta tanımlanan üç durumu gösterir.

Şekil 6.2 genişliği dalga boyundan birkaç kat daha büyük olan tek bir yarıktan geçen ışığın kırınımının fotoğrafik kanıtını sunar (Şekil 6.1b). Görüntüleme ekranı üzerindeki merkezde, yarık içindeki farklı noktalardan gelen dalgalar arasındaki girişim etkilerinin neden olduğu bir veya daha fazla dar saçakla kuşatılmış, geniş bir yoğun ışık bölgesi görürüz. Bu resim 4. Bölüm'de başparmağınız ve yüzükparmağınızla oluşturduğunuz tek bir yarığı kullanarak yarattığınız ve gözünüzün retinasında doğrudan görüntülenen örüntüye benzerdir. Bu deney ışığın dalga yapısı için Şekil 6.2'nin yanı sıra ilave kanıt sağlar.

Şekil 6.1 ve 6.2 ışığın tek yarıktan kırılmasının klasik yönlerini gösterir. Eğer ışın demetini zayıflatır ve ekrandaki tespiti kuantumların (fotonlar) tek tek ortaya çıktıkları noktaya kadar büyütürsek ne olur?

Her ne kadar Şekil 5.1 ve 5.4 tek yarıklı deney yerine çift yarıklı deneyi gösterse de, bunlar bize ne bekleyebileceğimizi gösterir. Şekil 5.1 deneyinde, her bir fotonun iki yarıktan da aynı anda uzayda yayılmış bir dalga olarak çıktıktan sonra görüntüleme ekranıyla etkileşerek çöktüğünü keşfettik. Tekil çarpmalar rastgele dağılmış görünseler de, zilyonlarca çarpmanın istatiksel sonucu olarak bir girişim örüntüsü ortaya çıkar.

Bu evveliyatla birlikte tek yarıklı deneyin tek foton seviyesindeki sonucunu tahmin etmek kolaydır. Her çarpmanın konumu Şekil 6.2'deki örüntü olduğunu varsayacağımız sonuçtaki örüntüyle uyumlu bir biçimde, yalnızca olasılığa dayalı olarak belirlenir. Dolayısıyla her bir foton deneyden geçerken tüm yarığı kaplar (çünkü bu yayılmış bir alandır),

ekrana yaklaştıkça yayılır ve ekranla etkileşip çöker. Etkileşim Şekil 6.2'nin daha parlak bölgelerinde yüksek olasılıkla, sönük bölgelerinde düşük olasılıkla ve karanlık bölgelerinde esasen sıfır olasılıkla meydana gelir.

Aynı mantık elektron veya atom gibi maddi bir kuantum ışını için de geçerlidir. Elektronlar fotonlara çok benzer davranır. Yayılmış alanlardaki dalgalar olan elektronlar tek bir dar yarıktan geçerken kırılıp yayılır; zilyonlarca elektron çarpmasından oluşan istatiksel örüntüleri Şekil 6.2'ye benzerdir, tek farkı elektronların daha küçük olan dalga boyları nedeniyle daha küçük olmasıdır. Bir sonraki bölümde bu deneyi önemli kuantum temellerinden birini açıklamak için detaylı olarak inceleyeceğiz.

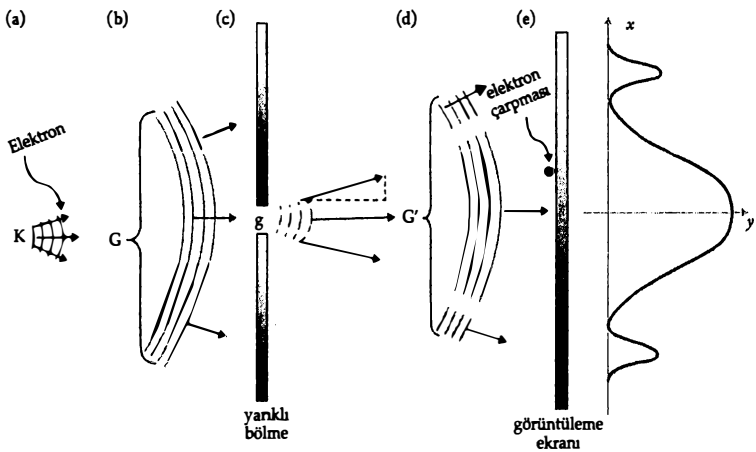
Heisenberg'in İlkesi

Her kuantum küçük bir bulut gibi çeşitli konum ve süratlere sahip bir alandır, dolayısıyla diğer kuantumlarla etkileşimlerinin çeşitli yer ve süratlerde meydana gelmesi bir dizi olası sonuca yol açar. *Heisenberg'in ilkesi* bu olasılık aralığı için genel limitleri belirler. Genel tabloyu tipik bir örneği ele alarak betimleyeceğim: Tek bir yarıktan geçen bir elektronun kırınımı.

Şekil 6.3 bu süreci tasvir eder.[8] Elektron kaynağı *K* "Mini" adını vereceğim bir elektron yayar. 3. Bölüm'den bildiğiniz gibi, Mini evrensel bir madde alanındaki bir dalgadır. Bu dalgayı sayfada soldan sağa doğru *y* yönünde hareket eden dört tane yakın aralıklı dalga zirvesi olarak betimledim. Resmin sağında gösterilen *x* ve *y* eksenlerinin yönleri resmin başlığında açıklanan nedenlerden dolayı alışılmışın dışındadır. Şekil 6.3'teki (a)'dan (e)'ye kadar olan beş bölüm bu deney boyunca ilerledikçe Mini'yi 5 farklı zamanda gösterir. (a)'da Mini *K*'dan uzaklaşır. Mini (b)'ye ulaştığı zaman dalgaların yaptığı

gibi yanal bir *G* genişliğine ulaşmıştır ve dar bir *g* genişliğine sahip bir yarığa doğru ilerliyordur (yarığın uzun boyutu sayfanın içine kadar uzanır). Mini ilk bariyerle rastgele etkileşim içinde olabilir, bu durumda Mini'yi göz ardı edecek ve bunun yerine yine Mini isimli bir elektronun (ne de olsa elektronlar özdeştir) bariyere çarpmadan yarıktan geçtiğini varsayacağım.

(c)'de Mini, yarığın genişliği olan *g* genişliğine daralır. Şuna dikkat edin: Mini şimdi yarıktaki girişim etkileri nede-



Şekil 6.3 Tek bir yarıktan geçen bir elektronun beş "enstantanesi". (a) Elektron, kaynağı K'den uzaklaşır. (b) G genişliğinde tek bir yarık içeren bir bölmeye doğru hareket eder. (c) Yandan taşan saçaklarla birlikte yarıktan dışa doğru yayılır. (d) Bir görüntüleme ekranına doğru hareket eder. (e) Ekrana çarpar (etkileşir) ve rastgele seçilmiş, atom boyutundaki küçük bir bölgeye çöker. Zilyonlarca çarpmadan oluşan kırınım örüntüsünün grafiği en sağda gösterilmiştir. Grafiği anlamak için kafanızı sağa eğin, böylece y ekseni yukarı doğru, x ekseni de sola doğru yönlenmiş görünür. Grafikte x çarpma konumuna karşılık y çarpma sayısı yer alır. Kuantum fiziği bu örüntüyü ve gösterildiği şekliyle elektronun gelişim şeklini öngörür.

niyle merkezî bir bölgeye ve iki dar kenar "saçağına" ayrılmıştır; ancak Mini tek bir elektron –bir kuantum– olarak kalır. (d)'de Mini gene G' yanal genişliğine yayılır ve görüntüleme ekranına yaklaşır. Bildiğiniz gibi (5. Bölüm), her bir elektron en sonunda ekranda beliren bütün örüntünün genişliğine ulaşır; belki birkaç milimetre.[9] (e)'de Mini ekran üzerinde rastgele bir noktayla etkileşir ve ekranın belirli bir atomuna çöker; ekran bu etkileşimi büyüterek çarpmayı görünür kılar. Çarpma Mini'yi muazzam ölçüde değiştirerek atomik boyutlardaki çok daha küçük bir şeye çöktürür. Güç algılanır ve tartışmalı olan bu çökme 10. ve 11. bölümlerde detaylı olarak ele alınacaktır.

Görüntüleme ekranının ötesindeki grafikte makroskobik kırınım örüntüsünün yoğunluğunu (y ekseni boyunca) gösterdim; bunlar farklı x yanal konumlarında ekrana çarpan zilyonlarca elektrondan kaynaklanır. Schrödinger'in denkleminden detaylı olarak öngörülebilen grafik Şekil 6.2'dekine benzer bir yoğunluk örüntüsünü gösterir, fakat her iki tarafta da tek bir görünür girişim saçağı vardır. Örüntünün ekrandaki her bir x noktasındaki y yoğunluğu Mini'nin bu noktaya çarpma olasılığının bir ölçümüdür.

Mini'yi (c)'de dar yarıktan geçtikten hemen sonra daha dikkatli analiz edelim. Mini klasik bir nokta parçacık olsa kesin bir konumu olurdu ve yarıktan tek bir yönde hareket ederek çıkardı; ancak Mini tüm üç uzaysal boyutta da yayılan ve yarıktan çeşitli yönlerde ortaya çıkan bir alandır. Sadece x yanal boyutunu göz önüne alalım. Mini yarıktan çıktığında, yanal kapsamı yarığın genişliği g'ye eşittir. Buna Mini'nin o belirli andaki "konum belirsizliği" diyeceğim (resimde (c)'ye karşılık geliyor).

Gel gör ki Mini yarıktan çıktıkça yayılır; yarık daha dar olduğunda daha geniş yayılır (Şekil 6.1'i hatırlayın). Bunu

analizimize dahil etmek için Mini'nin süratini göz önüne almalıyız. *Sürat* kelimesiyle fizikçiler sadece hızı değil, yönü de kastederler. Örneğin saatte 80 kilometre hızla kuzeye doğru araba sürmek aynı hızda doğuya doğru araba sürmekten oldukça farklı bir süratte gerçekleşir. Sürat normalde diyagramlarda uzunluğu hızı belirten bir okla gösterilir.

Mini'nin (c)'de yayılması, (c)'de üç farklı yöndeki oklarla gösterilen, farklı yönlerde çeşitli süratleri olduğu anlamına gelir. Üst süratin yatay (y) ve dikey (x) "bileşenlerini" kesikli çizgilerle gösterdim. Üst sürat x eksenine doğru kısmen yönlenir ve dolayısıyla v adını vereceğim, pozitif bir x bileşenine sahiptir. Orta süratin bir x bileşeni yoktur ve alt süratin x bileşeni $-v$'nin (eksi v) büyüklüğü, üst süratin x bileşeniyle aynı fakat negatiftir. Buradan hareketle, Mini'nin süratinin x bileşeni $-v$'den $+v$'ye herhangi bir değer alabilir, dolayısıyla bu sürat bileşeninin belirsizliği $2v$'dir.

Şimdi burada anlatmak istediğim sonucu görebilirsiniz: Bu iki belirsizlik –Mini'nin g yanal konum belirsizliği ile $2v$ yanal sürat belirsizliği– ilişkilidir. Bunun nedeni, Şekil 6.1'in de gösterdiği gibi, yarığı daraltırsanız dalganın (elektron yani Mini) daha geniş bir şekilde yayılması, böylece yanal süratin daha geniş bir yayılma geliştirmesidir. Eğer yarığı genişletirseniz, Mini'nin süratinin dikey bileşeninin yayılımı daha küçük olur; aslına bakarsanız, Şekil 6.1 bu yayılımın dikey bileşeninin çok geniş bir yarık için neredeyse sıfır olduğunu gösterir. İşte dalgalar bu şekilde davranır: Çok dar bir yarığın uzağında geniş bir biçimde yayılır, fakat geniş bir yarıktan dümdüz geçerek çok az yayılırlar. Elektron gibi kuantumlar dalga olarak (ve Schrödinger'in dalga denklemine uyarak) aynı şeyi yapar.

Kuantum fiziğinin genel ilkelerinden faydalanan Heisenberg bir kuantumun konumdaki yayılımı ile süratteki yayılımı arasındaki bu karşılıklı durumun genel bir ilke olduğunu

keşfetti. Özel olarak *Heisenberg'in ilkesi, maddi bir kuantumun, konumun herhangi bir bileşenindeki ve süratin aynı bileşenindeki belirsizliklerinin birbirleriyle ters orantılı olarak değişmesi gerektiğini bildirir*: Birisi azaldığında diğeri artmalıdır. Biri yarıya düştüğünde diğeri iki katına çıkar, biri üç katına çıktığında diğeri üçte bire düşer, vb. Bunu başka bir şekilde ifade edecek olursak, *bu iki belirsizlikten birini değiştirdiğimizde, diğer belirsizlik çarpımlarının sonucu aynı kalacak şekilde değişmelidir.* Görmüş olduğunuz gibi, bunun nedeni kuantumların uzayda yayılmış dalgalar olmaları ve bunun dalgaların yaptığı bir şey, örneğin kırılıp yayılmaları olması.

Cebir uygulamalarının yeri bu kitap olmamasına rağmen, Heisenberg'in türettiği şekliyle ilkesinin matematiksel formu şöyledir:

$$\Delta x \times \Delta v \geq h / 4\pi m$$

Terimleri açalım:

Δx ("delta x" olarak okunur) tek bir maddi kuantumunun kapladığı x değerlerinin (uzaysal konumlar) aralığı yani belirsizliği (metre olarak).
Δv bu kuantumun süratinin x bileşeninin belirsizliği (saniyede metre olarak).
$\Delta x \times \Delta v$, Δx ve Δv'nin çarpımı.
$\geq$ eşittir veya büyüktür anlamına gelir, Heisenberg'in ilkesinin belirsizliklerin çarpım sonucu üzerinde bir alt limit tespit ettiğine işaret eder.
h Planck sabitidir: $6{,}6 \times 10^{-34}$, standart metrik birimler kullanıldığında.
π Yunanca pi harfidir, değeri yaklaşık 3,14'tür.
m kuantumun kilogram cinsinden kütlesidir.

Belirsizliğin anlamına dair bir noktayı açıklığa kavuşturmak istiyorum. 5. Bölüm'den hatırladığınız gibi, de Broglie her bir kuantumun "bütün uzayı kapladığına" dikkat çekti ve Hegerfeldt de herhangi bir sonlu boyuta sahip bölge içinde kuantumların sınırlanamayacağını göstererek aynı sonucu daha kesin olarak kanıtladı. Başka bir deyişle, her kuantumun boyutu (dış kuvvetlerle sınırlanmadığı müddetçe) sonsuzdur. Buna rağmen, Heisenberg'in bir kuantumun yayılımının x bileşenini gösteren Δx belirsizliği sonsuz olmayan bir sayıdır. Bunun nedeni Heisenberg'in Δx'inin sadece, kuantumun eğer fırsat verilirse etkileşme olasılığının çok yüksek olduğu yüksek olasılıklı bölgeyi temsil etmesidir. Daha doğrusu, Δx "x'in ortalama değerinden standart sapmasıdır"; eğer bunun tanımını öğrenmek istiyorsanız, dipnotlarda yer alıyor.[10] Benzer bir açıklama Δv için de geçerlidir.

Belirsiz Bir Evren

Heisenberg'in ilkesi belirsizliklerin en azından formülü karşılayacak kadar büyük olması gerektiğini bildirir. Belirsizliklerin daha büyük, çok daha büyük olabilmeleri şaşırtıcı değildir, çünkü bir kuantumun konumunun veya süratinin belirsiz olabilmesinin çok çeşitli nedenleri vardır. Örneğin bir kuantumun belirsizlikleri genellikle bunu azaltan bir etkileşim meydana gelmediği sürece, zamanla birlikte artar. Dolayısıyla Mini'nin (c)'de Δx'i küçüktür, ancak Mini (d)'ye ulaştığında farklı süratleri yayılmasına yol açmış, böylece Δv değişmemesine rağmen Δx daha büyük bir değer almıştır. Ayrıca bir kuantumun belirsizliğinin, çoğunlukla deneysel hata olarak sınıflandırılan kuantum dışı çok çeşitli nedenleri de vardır.

Heisenberg'in ilkesinin fikri, maddi bir kuantumun belirli bir içsel $\Delta x \times \Delta v$ "boyutunun" olduğu –birleşik konumu ve süratinde belirli bir toplam uzam– ve bu "boyutun" üç

uzaysal boyutun her biri için en az $h/4\ \pi m$ olduğudur. Heisenberg'in ilkesi bir kuantumu küçük bir "boyuta" sıkıştırabilmenizin bir limiti olduğunu bildirir: Δx veya Δv'den birini belirli bir noktanın ötesinde daha fazla sıkıştırmak kesinlikle diğer belirsizliği artırmalıdır. Şekil 6.1'in gösterdiği gibi, daha dar bir yarık yarıkta daha küçük bir Δx olduğuna işaret eder, fakat bu kuantumun yarığın ötesinde daha geniş biçimde kırılıp yayıldığı anlamına gelir (yani Δv daha büyüktür). Bu sızdıran bir tüpteki hamura benzer: Bir yerden sıkıştırdığınızda başka yerden fışkırır.

(c)'de dar yarıktan geçmeyi başaran bir elektronu seçmek elektronun yanal konumu hakkında bilgi sahibi olmanın yani "ölçmenin" bir yoludur. Tahmin edilebileceği gibi, ölçüm Mini'nin yanal belirsizliğini G'den g'ye azaltır. Bu daha sonra detaylı olarak ele alacağımız genel bir ilkenin bir örneğidir: Ölçümler genellikle kuantum hallerini değiştirir. Mini görüntüleme ekranına çarparak yanal boyunu G'den atomik boyutlara azalttığında başka bir ölçüm meydana gelir.

Yanlış kanılara mahal vermemek için: "Ölçümlerin" fizik laboratuvarlarıyla veya insanlarla ille de bir ilgisi olmadığını aklınızda tutun (2. Bölüm). Yarık uzak bir gezegendeki iki kabarcık arasındaki bir açıklık olabilir ve analiz esasen değişmeden kalır.

Mini sonunda ekranda bir hidrojen atomuna bağlı kalabilir; bu durumda Δx konum belirsizliği, hidrojendeki en yaygın elektron yörüngesi çapı olan yaklaşık 10^{-10} m olurdu. Şuna dikkat edin: Mini sıfır olmayan bir Δx uzaysal yayılımı korur ve Şekil 5.4'te gösterilenlere benzer nokta benzeri deneysel sonuçlardan bazen çıkarıldığı gibi, bir atomun içine absorbe edildiğinde bir nokta parçacığa dönüşmez. Elektronlar alandır ve görüntüleme ekranlarında parçacık *benzeri* (küçük) çarpmalar oluşturduklarında bile alan olarak kalırlar.

Elektron bir hidrojen atomunun içine absorbe edildikten *sonra* bile halen Heisenberg'in ilkesine uyulup uyulmadığını görmek için birkaç numara yapalım. Bu en küçük yörüngedeki Mini'nin hızı (Schrödinger'in denkleminden) hesaplandığında ortalama değeri saniyede yaklaşık 2×10^6 m (ışık hızının yaklaşık %1'i) olarak bulunur, bu herhangi bir sürat bileşeninin bu üst değere yükselebileceği anlamına gelir, böylece sürat belirsizliği saniyede yaklaşık 2×10^6 m olur. Dolayısıyla $\Delta x \times \Delta v$ aşağı yukarı metrik birimde $(10^{-10}) \times (2 \times 10^6) = 2 \times 10^{-4}$'tür. Elektronlarda $h/4\ \pi m$'in değeri metrik birimde yaklaşık 6×10^{-5}'tir. 2×10^{-4}, 6×10^{-5}'ten yaklaşık üç kat büyük olduğu için Mini'nin belirsizliği Heisenberg'in ilkesini karşılayacak kadar büyüktür.

Kuantum belirsizliğinin, ölçümlerin yol açtığı kaçınılmaz bozunumlardan kaynaklandığını duymuş olabilirsiniz. Bu yanlış bir kanıdır. Kuantum belirsizliği, ölçülmüş olsun veya olmasın, her bir kuantumun içsel Δx ve Δv uzamlarından ortaya çıkar. Kuantumlar x ve v'de yayılan damla, bulut ve demetlerdir ve etkileşimlerindeki belirsizlik bu doğal yayılımın bir sonucudur. Δx ve Δv, ikisi de oldukça değişkendir, fakat ikisinin çarpımı olan $\Delta x \times \Delta v$, $h/4\ \pi m$'in altına düşemez. Ölçümün neden olduğu herhangi bir belirsizlik sadece bu içsel belirsizliğe katkıda bulunur. Örneğin Şekil 6.3'teki (d)'de Mini'nin Δx'i kırınım örüntüsünün tümüne yayılır ve bunun bu deney sırasındaki bozunumlarla çok az ilgisi vardır. Bu elektron öylesine yayılmıştır ki, neredeyse bir konumu yoktur; sadece ekrana çarpıp da çöktüğünde biraz doğru bir konum edinir.

Bu temel bir noktadır: Kuantum belirsizliği, insanların bilgisizliğinden, ölçüm belirsizliğinden veya bozunumdan dolayı ortaya çıkmaz. Ortaya çıkma nedeni kuantumların yayılmış alanlar olmaları ve dolayısıyla tam konuma veya sürate *sahip olmamalarıdır*. Belirsizlik kuantum evrenin bir özelliğidir.

Bununla birlikte şu da doğrudur; kuantum fiziği doğanın o kadar narin özelliklerini inceler ki, bu özellikleri değiştirmeden bunları gözlemlemek de neredeyse olanaksızdır. Örneğin bir elektronun yaklaşık konumunu üzerine EM ışıma tutarak ve buna göre fotonların davranışlarından belirleyebiliriz. Foton-elektron etkileşimleri bu elektronun süratini mutlaka etkileyerek süratte daha çok belirsizlik yaratacak ve Heisenberg'in ilkesini koruyacaktır. Sonuç itibariyle, doğa veya fizikçiler hem x hem de v'yi açıklığa kavuşturmak için ne yaparlarsa yapsınlar, deneyler ve teori her kuantumun Heisenberg'in ilkesine uyduğunu gösterir.[11]

1911'de Ernest Rutherford atomun küçük çekirdeği ve yörüngesindeki nokta benzeri elektronuyla gezegeni andırdığını akla getiren kanıtları keşfettiğinde, klasik fizik bu yapının kendini nasıl sürdürdüğünü açıklayamıyordu. Klasik elektromanyetizma yörüngedeki bir elektronun hızla enerji yayarak çekirdeğe düşeceğini ve atomu çökerteceğini öngörür. Kuantum fiziği bu ikilemi çözer. Elektronun çekirdeğe hızla düşmesi için Heisenberg'in ilkesini ihlal etmesi gerekirdi. Bu, evrenin klasik fizikle değil de kuantumla yönetildiğini gösteren, çarpıcı bir örnektir.

Heisenberg'in ilkesi bütün maddi kuantumlar için geçerlidir: Protonlar, moleküller ve hatta birçok kuantumdan oluşan beysbol topu gibi makroskobik nesneler için bile. Minimum $\Delta x \times \Delta v$, $h/4\ \pi m$'e eşit olduğu ve bu, cismin kütlesi büyüdükçe azaldığı için, Heisenberg'in ilkesi daha kütleli cisimler üzerinde daha az sınırlama teşkil eder ve beysbol topları üzerinde neredeyse hiç sınırlama teşkil etmez. Örneğin 0,15 kg'lık bir beysbol topunun minimum $\Delta x \times \Delta v$'si 3×10^{-34}'tür. Bu bir elektronun minimum $\Delta x \times \Delta v$'sinden milyon trilyon trilyon kat daha küçüktür ve sıfırdan neredeyse ayırt edilemez. Heisenberg'in ilkesi makroskobik cisimler için pratik bir sonuç

doğurmaz. Bu, klasik fiziği makroskobik dünyada kullanabilmemizin nedenlerinden biridir.

Proton ve nötronlar bir elektrondan 2.000 kat daha kütlelidir, dolayısıyla minimum $\Delta x \times \Delta v$'leri 2.000 kat daha küçüktür. Çekirdeklerin atomlardan çok daha küçük olmalarının ana nedeni budur. Diğer neden de proton ve nötronları bir arada tutan çekirdek kuvvetinin kısa erimli olmasıdır. Bu kısa erim, uzun erimli itici elektrik kuvvetleri çekirdeği parçalamadan önce tek bir çekirdeğe yaklaşık 100 proton yerleştirebileceğiniz anlamına gelir.

Bir elektronun veya protonun "yarıçapı" gibi kavramlar muğlak olabilir. Şekil 5.4'te gösterilen gibi deneylerde, çarpmadan hemen önce bir elektron 1 milimetreye (10^{-3} m) yayılabilir. Bir atomdaki bir elektronun genişliği 10^{-10} m gibi çok küçük bir değerden 10^{-6} m gibi büyük bir değere kadar değişebilir.[12] Bu sayılar çeşitli fiziksel durumlardaki elektronların Δx'ini ifade eder. Elektronun yarıçapı çok küçük olduğu için ölçmeyi asla başaramadığımızı ve hatta bunun sıfır bile olabileceğini duymuş olabilirsiniz. Böyle bildirimler bir elektronun *minimum* Δx'ini ifade eder, yani Δv'nin buna karşılık büyümesine izin verilerek bir elektronun sıkıştırılabileceği en küçük uzaysal hacmin boyutunu. Günümüzde yalnızca bu minimum Δx'in (bugüne kadar) ölçülebilir en küçük mesafeden daha küçük olduğu biliniyor: Yaklaşık 10^{-19} m. Birçok fizikçi elektronu bir nokta cisim veya boyutu Planck mesafesi olan bir sicim olarak görür, fakat elektronun başka kuantumlardan oluşan bir altyapıya sahip olduğu ortaya çıkabilir.[13]

Atomlardaki elektronların Δx değerleri yaklaşık 10^{-10}'dur. Elektronları bundan daha küçük boyutlara sıkıştırmak ancak daha büyük bir Δv pahasına yapılabilir ki, bu da elektronun hızlarının yüksek bir değere çıkması, yani elektronun ortalama hızının oldukça büyük olması gerektiği anlamına gelir.

Başka bir deyişle, uzaysal olarak sıkıştırılmış bir elektronun enerjisi yüksek (büyük) olmalıdır. Benzer nedenlerden ötürü, küçük şeyleri tespit edecek bütün deneyler Büyük Hadron Çarpıştırıcısı gibi yerlerde yüksek enerjilerde yürütülmelidir. Küçük şeyleri tespit etmek için yüksek enerjilere ihtiyaç duymamızın nedeni Heisenberg'in ilkesidir.

Evrenin çarpıcı bir kuantum kökeninin olması olasıdır. Büyük patlamanın nasıl başladığına dair güncel teori, algılanabilir en küçük uzay bölgesi –Planck mesafesi– içinde rastgele kuantum enerji dalgalanmalarını gerektirir. Bu yüksek enerjili dalgalanmalar çok daha büyük bir boyuta (hâlâ ufak olsa da) hızla genişleyen yani "şişen" yeni bir kuantum alanı oluşturdu. Kuantum rastgeleliği nedeniyle madde ve enerjinin bu ufak alan içindeki dağılımı muntazam değildi ve alan şiştikçe bu farklılıkların daha büyük ölçekteki bir evrende izi kaldı. On dört milyar yıl sonra, genişlemeyle büyümüş ve kütleçekimiyle kuvvetlenmiş bu farklılıkları, bilinen evreni kaplayan –vakuma yakın devasa boşluklarla birbirlerinden ayrılmış– dev galaktik madde ve enerji kümeleri düzeni içinde görüyoruz. Dolayısıyla muhteşem teleskoplarımız kozmosun büyük ölçekli düzenine sonsuza dek kazınmış kuantum belirsizliğini apaçık gözlemler.

Gizli Bir Determinizm mi Var?

Yazı tura attığınızda sonuç rastgele görünse de gerçekte rastgele değildir. Başparmağınızın hızı, zeminden yukarı olan mesafe, paranın sıçramasının elastikiyeti, vb. gibi fark edilmeyen veya "gizli" değişkenler sonucu belirler ama normalde dikkate alınmazlar. Kuantum belirsizliğinin ardında doğanın yalnızca belirsiz göründüğü fakat aslında belirli olduğu, benzer bir gizli determinizm olabilir mi?

Einstein'ın düşüncesi bu yöndeydi. Bu konuda yanıldığı ortaya çıktı, fakat muhteşem bir şekilde. Neden böyle düşün-

düğünün, neden yanıldığının ve buna rağmen analizinin neden muhteşem olduğunun öyküsü ise şöyle.

1935'te Einstein ve meslektaşları Boris Podolsky ve Nathan Rosen (EPR) kuantum fiziğine dayanan bir tez yayımladılar; bu tez bir elektronun konumu ve sürati gibi kesin değerlerinin gerçek ve eşzamanlı var olduklarını kanıtlıyor ve dolayısıyla Heisenberg'in ilkesiyle çelişiyor gibi görünüyordu.[14] Çalışmaları bir elektronun hem konumunu hem de süratini sınırsız bir hassasiyetle ölçmek için Heisenberg'in ilkesini ihlal eden, geçerliliği kabul edilmiş kuantum ilkelerine dayalı bir prosedür tanımlar. Eğer doğruysa bu gerçek bir kuantum rastgeleliği olmadığına, tüm değişkenleri ölçememizden kaynaklanan, yalnızca görünürde bir rastgelelik olduğuna işaret eder. Bu kuantum fiziğinin öngörüsünde doğru olsa da, tamamlanmamış olduğu, çünkü gerçek dünyada var olan bazı özellikleri öngöremediği anlamına gelir. Bu kuantum ilkelerine o güne dek yapılmış en ciddi meydan okumaydı. Bunu anlatmak için 9. Bölüm'de daha etraflıca ele alacağımız, geniş kapsamlı bir fenomen olan *dolanıklığı* açıklamam gerekiyor.

İki zarın atılması gibi iki rastgele (öngörülemez) sonucun eğer birinin sonucu kısmen veya bütünüyle diğerinin sonucunu belirliyorsa *ilintili* oldukları söylenir. Örneğin iki zar sonuçlarının toplamı daima tek sayı olacak şekilde hileliyse, o zaman sonuçları karşılıklı olarak ilintilidir. Eğer biri çift sayı gelirse diğeri tek olmalıdır. Kuantum çiftlerini oldukça ilintili bir tarzda davranacakları şekilde hazırlamanın mümkün olduğu görülür. Bu durumda bunların *dolanık* oldukları söylenir. İdeal bir örnek için, Şekil 6.3'te gösterilenler gibi iki ayrı düzenek kullanan, iki elektronun ayrı düzenekten fakat aynı anda tek yarıktan geçtikleri deneyler varsayalım ve deneyden önce elektronların kendi görüntüleme ekranlarına çarpma

noktaları arasındaki farkın daima x_2-x_1 = 0,3 milimetre olması sağlanacak şekilde dolanık hale getirildiklerini farz edelim; burada x_1 birinci elektronun, ekranına çarpma noktası ve x_2 de *diğer uzak ekrandan gözlemlendiği şekliyle* ikinci elektronun çarpma noktasıdır. Bu takdirde elektronlardan birinin çarpma noktası *diğer* elektronun çarpma noktasından tahmin edilebilir. Örneğin eğer birinci elektron ekranına x_1 = 12,2 milimetrede çarpıyorsa, ikinci elektronun kendi ekranına x_2 = 12,5 milimetrede çarptığını tahmin edebiliriz. 9. Bölüm'de göreceğiniz gibi, gerçek dünyada benzer bir durum meydana gelir.

Son yıllarda yapılan deneyler kuantum dolanıklığının dolanık kuantumlar arasındaki mesafeden etkilenmediğini ve anlık etki ettiğini gösteriyor. Örneğin iki elektronumuz farklı kıtalarda olsa da bir elektronun çarpma noktası diğer elektronun çarpma noktasını belirleyecektir; iki çarpma da aynı anda olduğu ve iki konum da ölçümden önce oldukça belirsiz olduğu halde.

EPR bu tuhaf fenomeni kuantum teorisinin öngördüğünü fark etti ve iki elektron için de gerçek ve kesin bir konuma işaret ettiğini öne sürdü. EPR'ye göre bunun nedeni şuydu: Bir elektronun ölçümünün diğer elektronun gerçek fiziksel konumunu bir şekilde ânında değiştirebilmesi mantıksız görünür. Ne de olsa ne enerji ne de bilgi uzayda ışıktan daha hızlı iletilemez (5. Bölüm), dolayısıyla bir elektronun ölçümünün diğer elektronun gerçek durumunu ânında değiştirebilmesi olanaksız görünür. Bu nedenle EPR ilk elektronun konumunun fiilen ölçülmesinden bağımsız olarak ikinci elektronun kesin bir konuma *sahip olması* gerektiğini ileri sürdü.

Bu mantıklı bir argümandır. Örneğin, diyelim ben New York'tayım ve Amsterdam'daki Alice'e ve Pekin'deki Bob'a zarflar gönderiyorum; bunlardan birinde altın bir para, diğerinde de gümüş bir para olsun. Alice ve Bob'a önceden bunu bildiriyorum ve hangi parayı kimin alacağını söylemiyorum.

Eğer Alice zarfını aldığında paranın gümüş olduğunu görürse, ânında Pekin'deki Bob'un altın parayı aldığını anlar. Ancak besbelli Alice'in parasını gözlemlemesi Bob'un parasını altına dönüştürmez. Değişen tek şey paralardan birinin gerçek durumu yerine Alice'in bilgisidir.

Aynı şekilde EPR bir elektronun ölçümünün diğer elektronun gerçek durumunu değiştirmiş olamayacağını, bunun yalnızca deneyi yapanın önceki durumla ilgili bilgisini değiştirdiğini öne sürdü. Tıpkı altın ve gümüş paralar gibi, dolanık elektronların da gerçek ve kesin konumlara *sahip olmaları* gerektiğini ve deneyi yapan insanların bunu bilmediklerini öne sürdüler. Tamamlanmış bir teori bu kesin konumları sağlayarak kuantum teorisinin ötesine geçmelidir. EPR bu halihazırda ikna edici savın üzerine, iki dolanık kuantum için kesin süratlerin de var olduğunu kanıtlayan bir argüman daha sundu. Elektronların Heisenberg'in ilkesini ve bütün kuantum rastgeleliği kavramını ihlal eden, önceden mevcut, kesin konum ve süratlere sahip olmaları gerektiği sonucuna vardılar.

EPR'nin vardığı sonuca götüren mantıklı varsayım, *bir konumda meydana gelen fiziksel süreçlerin, başka bir konumdaki gerçek fiziksel durum üzerinde hiçbir anlık (ani) etkisinin olamayacağı* varsayımıydı. Einstein'in ifadesiyle, "uzaktan tekinsiz bir eylem olmazdı."[15]

Bu varsayım görelilik teorisinin ışık hızından daha hızlı bir nakli sınırlamasının ayrılmaz bir parçası gibi görünür. Einstein bir elektronun konumunun bir ölçümünün ânında uzaktaki diğer elektronun kesin bir konuma sahip olmasına neden olamayacağını, diğer elektronun halihazırda bu konumda olması gerektiğini öne sürdü. Bu Alice'in parasının altın olduğunu görmesinin Bob'un parasını ânında gümüşe çeviremeyeceğini söylemekle aynı şeydir. Bu makul kavrama *yerellik ilkesi* diyeceğim.

Bu önemli meydan okumaya rağmen kuantum fizikçileri bu teorik ve felsefi itirazlara fazla aldırış etmeden başarılı gelişimlerini sürdürdüler. Mevcut tutum herkesin "çenesini kapayıp hesaplama yapması gerektiği" yönündeydi.[16]

Bu 1935'teydi. Ancak 1964'te John Bell EPR argümanı üzerine yeni bir ışık tuttu. *Kuantum teorisinin aslında yerellik ilkesini ihlal ettiğini* gösterdi (9. Bölüm). Bell'in sonucunun geçerli olduğu durum türü tam olarak EPR argümanında tasavvur edilen durumdur: Aralarında mesafe olan iki dolanık kuantum. Bell kuantum fiziğine göre bir kuantumda yapılan bir ölçümün gerçekten de ânında uzaktaki dolanık kuantumun gerçek fiziksel durumunu değiştirebileceğini gösterdi! Belirli bir mesafe ötede cereyan eden böyle anlık bir fiziksel eyleme *yerbilmez* eylem denir. Bell'in teorik tahmini daha sonra deneysel olarak doğrulandı. Daha da şaşırtıcı olansa, daha sonraki deneylerin, Bell'in analiziyle birlikte, *kuantum fiziğinin doğruluğundan veya yanlışlığından bağımsız olarak, bizzat doğanın yerel olmadığını* göstermesidir.

Dolayısıyla, Einstein'ın görüşünün aksine, uzakta tekinsiz eylemler vardır. Bu tekinsizlik kuantum fiziğince öngörülür ve doğada bulunur.

Fakat bu durumda göreliliğin ışık hızını aşan seyahati menetmesi ne olacak? Göreliliğin ışıktan hızlı hareket hakkında söylediklerini hatırlayalım (5. Bölüm): Ne *enerji* ne de *bilgi* bir ışık demetinden daha hızlı hareket edemez. Burada şunlar ortaya çıkıyor: (1) Bell'in analiz ettiği ve deneyle test edilen yerel olmayan süreçlerde hiçbir enerji transferi olmaz ve (2) kuantum fiziğinin yapısındaki rastgelelik bu süreçleri öyle bir kamufle eder ki, hiçbir bilgi transferi olamaz. Dolayısıyla EPR'nin analizinin sezgiye dayanan temeli yanlıştı. Kuantum fiziği birilerinin tekinsiz olarak görebileceği uzaktaki eylemi tahmin etmesine rağmen, göreliliğin enerjinin veya bilginin ışıktan hızlı transferine koyduğu yasağı ihlal etmez.

Yerbilmezlik Einstein'a tekinsiz gelmişti, fakat aslında bunun sezgiye dayanan bir kuantum temeli vardır. 5. Bölüm'e göre kuantum tek bir birleşik şeydir. 9. Bölüm'de göreceğimiz gibi, dolanık kuantumlar birçok bakımdan tek bir birleşik kuantum gibi davranır. O yüzden birbirlerinden ayrı olsalar da, bir elektronun gerçek durumunun, ikinci bir dolanık fakat uzakta bulunan elektron değiştiğinde –Einstein'ın düşündüğünün aksine– *değişebilmesi* belki o kadar da şaşırtıcı değildir. Dolanık bir çiftin iki üyesinde de görülen değişimin anlık doğası kuantumun birliğinin bir sonucudur: Bir kuantum (veya dolanık bir kuantum çifti) bir şekilde değiştiğinde, yayılmış kuantumun tümü tek bir anda değişime uğrar.

EPR'nin çalışması dolanıklığın yerel olmayan çıkarımlarının keşfini imler ve her ne kadar altındaki varsayım –evrenin yerellik ilkesine uyduğu– yanlış olsa da bu bakımdan muhteşemdi. Bu yabana atılmayacak bir başarı ve Einstein'ın dehasının kanıtıydı.

David Bohm'un Deterministik Modeli

Kuantum fiziği tuhaf olduğu ve bazılarınca doğası gereği istikrarsız olduğu düşünüldüğü için, varsayılan paradoksları çözmek için kuantum fiziği üzerinde değişiklik yapan öneriler sunulmuştur. EPR bu tuhaf özelliklerden birini –yani kuantum rastgeleliğini– sorguladı ve daha tam ve deterministik bir teori öngördü. Öne çıkan deterministik bir alternatifin öyküsü şudur: David Bohm'un 1952 tarihli *pilot-dalga modeli*.

Kuantum fiziği her şeyin madde alanlarındaki ve ışıma alanlarındaki dalgaların bir sonucu olduğu bir evren tanımlar. Bohm'un görüşü ise şöyledir: Bu alanlara ilaveten, her kuantum (her dalga) için, dalgaların yönlendirdiği, yeri tam olarak belirli bir nokta parçacık vardır ve bu parçacıklar Şekil 5.1 ve 5.4'te gösterilenler gibi deneysel sonuçlarda doğrudan göz-

lemlediğimiz şeylerdir. Pilot-dalga modeline göre kuantum alanları da gerçekten mevcuttur, dolayısıyla evren hem yayılmış kuantum alanlarından hem de izole nokta parçacıklardan oluşur. Tüm sistem –alan artı parçacık– deterministiktir. Tüm alanların başlangıçtaki konfigürasyonu ve tüm parçacıkların başlangıçtaki konum ve süratleri göz önünde tutulursa, evrenin tüm gelecek ve geçmişi belirlidir. Bohm'un bu modeli tasarlamasının nedeni böyle deterministik bir evrendi.

Bohm'un modeli tek bir elektronun çift yarıktan geçtiği deneyde şöyle işler. Fiziksel olarak gerçek iki oluşum mevcuttur:

> 1. *Elektronun* daima belirli bir konumda bulunan, elektron kaynağı içindeki tek bir noktadan başlayan, yarıkların birinden (ikisinden birden değil) geçen tek bir yol boyunca hareket eden ve ekrana belirli bir noktada çarpan bir nokta parçacık olduğu varsayılır.
>
> 2. *Kuantum alanı* 5. Bölüm'de tanımlanan madde alanıdır. Bu, Schrödinger'in denklemi dahil kuantum kurallarına uyar. İki yarıktan da geçer ve Şekil 2.3'teki çift yarıklı örüntüde ekranda girişim yapar. Bu alan sadece elektron üzerindeki eylemi vasıtasıyla gözlemlenebilir. Alan tam olarak öngörülebilir bir şekilde elektronu belirli bir çarpma noktasına yönlendirir.

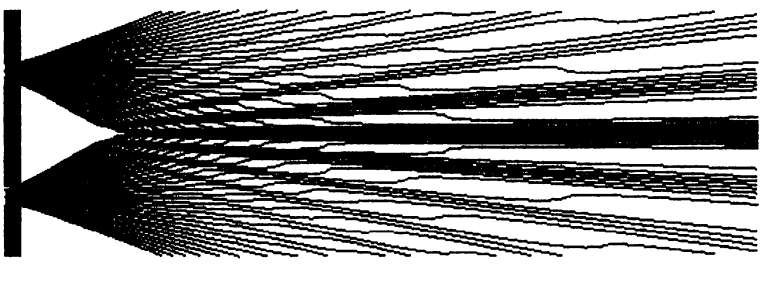
Şimdi elektronların her seferinde bir tane olmak üzere yarıklardan geçtiklerini varsayalım. Bohm'un modeline göre Şekil 5.4'ün deneysel sonucu bu çok sayıda elektronun çarpmasını gösterir; bunların her biri bir yarıktan geçen kesin bir yol izler ve iki yarıktan da geçen ve görüntüleme ekranının tümünde bir girişim örüntüsü oluşturan bir yayılmış alan

tarafından yönlendirilirler. Farklı elektronların farklı yerlere çarpmalarının tek nedeni her birinin farklı bir yerden başlamış olmalarıdır. Bu farklı başlangıç yerleri Bohm'un modelinin gizli değişkenleridir, bunlar bir yazı tura atışındaki ilave değişkenlere benzer; tıpkı onlar gibi hassasiyetle ölçülüp hesaplamaya dahil edilseler sonucu tahmin etmeyi sağlayabilirlerdi. Bu elektronları hazırlamanın deneysel prosedürü makroskobik bakış açımızdan tüm elektronlar için özdeş görünse de, Bohm'un modeli her birine farklı bir kesin başlangıç noktası ve sürati atar ve kuantum belirsizliğinden ziyade bu durum onların farklı yollarını ve farklı çarpma noktalarını açıklar. Bohm'a göre bu deneydeki çeşitli elektronların hepsinin kesin ve öngörülebilir konumları *vardır*, her ne kadar deneysel prosedürlerimiz bizim bunları *bilmemizi* engellese de.

Bohm modelini bu elektronların uzaysal başlangıçtaki (deneyin başlangıcındaki) dağılımları kuantum fiziğiyle *bağdaşıyorsa*, elektronların büyük rakamlarının istatistiği kuantum fiziğinin istatiksel öngörüleriyle bağdaşacak şekilde düzenledi. Dolayısıyla Bohm Şekil 5.4e'de gösterilen elektron çarpması dağılımını elde etmek için elektronların madde alanının başlangıçtaki durumuyla uyuşan bir başlangıç dağılımına sahip olduğunu (kaynakta) varsaymalıdır. Bohm'un elektronlarının her biri bir alan değil de belirli bir konumu ve sürati olan bir nokta parçacık olduğu için, bütün elektronları (örneğin) özdeş konum ve süratlerden (fakat farklı zamanlarda, böylece birbirleriyle etkileşmezler) başlatmamamız için hiçbir neden yok gibidir; bu durumda hepsi de aynı noktadan ekrana çarpardı. Şimdiye dek hiç kimse böyle bir şey gözlemlememiştir. Ancak Bohm gizli değişkenlerin bilinmeyen nedenlerden ötürü geleneksel kuantum fiziğine uygun biçimde dağıldığını varsayarak Heisenberg'in ilkesiyle ve kuantum fiziğinin tümüyle bağdaşan bir model yarattı.[17]

Şekil 6.4,[18] yarıklarda çift yarık kuantum halini yansıtan başlangıç durumlarını kullanan Bohm'un modelinden hesaplandığı şekliyle, bir çift yarık deneyinde birbirlerinden bağımsız olarak geçen yaklaşık 100 parçacığın teorik yollarını gösterir. Her bir elektron bir yarıktan belirli bir konum ve süratte başlar. Elektronlar sağa doğru hareket ettikçe yolları Şekil 2.3'teki standart girişim örüntüsü şeklinde ekrana çarpacak şekilde (gösterilmiyor) demetlenirler. Bohm'un teorisinde, Ψ madde alanının yönlendirmesi bu demetlenmeye yol açar: Elektronları madde alanı yönlendirir.

Bohm'un modelini etkileşen bir elektron sistemine –örneğin bir oksijen atomundaki sekiz elektrona– uyguladığımızda işler daha da ilginçleşir. Bu elektronlar birbirlerinin yanı sıra EM kuvvet vasıtasıyla (kendisini neredeyse yerinde sabit tutan büyük bir kütleye sahip) çekirdekle de etkileşirler. Bu tarz durumlarda Bohm'un modelinin öngördüğü hareketler oldukça kararsız ve hayli yerbilmezdir: Her bir elektronun hareketi güçlü bir biçimde ve anlık olarak sekiz elektronun tümünün konumlarına bağlıdır! Bohm'un modeli alabildi-



Şekil 6.4 100 adet nokta parçacığın Bohm'un modelinden hesaplanan çift yarık yolları. Bu modelde kuantum belirsizliği yoktur. Her bir parçacığın soldaki yarıklardan birinin içinde kesin bir başlangıç noktası (sadece yarıkların dar boyutları gösterilir), kesin ve öngörülebilir bir yolu ve kesin bir çarpma noktası vardır. Elektronları bu çarpma noktasına Ψ madde alanı yönlendirir.

ğine yerbilmezdir. Doğanın aslında yerbilmez olduğunu ve geleneksel kuantum fiziğinin de yerbilmez fenomenleri öngördüğünü görmüştünüz; dolayısıyla Bohm'un yerbilmezliği de ihlal eden bir durum değildir. Gelgelelim 9. Bölüm'de, standart kuantum fiziğine özgü yerbilmezliğin özel göreliliği ihlal etmediği halde, Bohm'un daha ekstrem yerbilmezliğinin özel görelilikle bağdaşmasının zor olduğunu göreceğiz. Günümüzdeki Higgs bozonunun, nötrinonun, karanlık maddenin ve diğer mikroskobik fenomenlerin teorileri özel görelilik ilkeleriyle kuantum fiziğinin tüm-alanlar görüşünü birleştiren, göreli kuantum alanı teorileridir. Örneğin her kuantum alanı teorisinin çarpıcı ve deneysel olarak doğrulanmış bir öngörüsü kuantumların oluşumu ve yok olmalarıdır, fakat Bohm'un modeli bu kadar yüksek göreli fenomenleri tanımlayamamıştır.[19]

"Bohm'un modelinin kendi hayranları olsa da asla geniş çapta fizikçiler tarafından kabul görmemiştir."[20] Bunun iyi bir nedeni özel görelilikle olan problemdir, fakat o kadar önemli olmayan başka bir neden de tarihte meydana gelen öngörülemez gelişimlerdir. De Broglie 1927'de Bohm'unkine benzer bir model öne sürmesine rağmen, teorinin gelişim dönemi (1925-1930) sırasında kuantum fiziğinin mutabakata varılan formülasyonu deterministik değildi, bu yüzden Bohm'un deterministik ve son derece yerbilmez modeli 1952'de oldukça radikal görünüyordu. Geleneksel kuantum fiziği bilinen bütün gözlemlerle bağdaştığı için fizikçiler bir alternatif hakkında fazla düşünmeye hevesli değillerdi.[21]

Bohm'un modelinin önemli olmasının nedeni, geleneksel göreli olmayan kuantum fiziğiyle bağdaşan deterministik bir teori elde etmek amacıyla, yeni değişkenlerin kuantum fiziğine *eklenebileceğini* göstermesidir. Bohm'un modelinden önce fizikçiler bunun olanaksız olduğunu düşünüyorlardı.

Bohm'un modeline karşı olan en etkili argümanlardan biri biçeme ilişkindir: Bu model bilhassa bu amaç için düzenlenmiştir ve kullanışsızdır. Standart kuantum fiziği sadece alanları kullanarak aynı deneysel öngörülerde bulunduğu halde, neden evrenin yayılmış kuantum alanları *artı* izole nokta parçacıklar gibi bu kadar farklı iki şeyden oluşması gerekiyor? Occam'ın usturası olgulara uyan en basit açıklamayı seçmemizi tavsiye eder.

Rastgelelik ve Hiçlik

Şöyle bir şey düşünelim: Tavana, ucuna demir bir top tutturulmuş spiral bir yay takılmış olsun. Top yayı topun hareketsiz kaldığı bir denge uzunluğuna kadar uzatır; bu noktada yayın topa uyguladığı yukarı doğru çekme kuvveti, yerçekiminin topa uyguladığı aşağı doğru çekme kuvvetiyle dengelenir. Eğer daha sonra topu birkaç santimetre çekerek hafifçe yayı uzatır ve bırakırsanız, top denge konumunun etrafında aşağı yukarı sallanır. Bu salınan sistem bir kuvvetin etkisi altındaki en basit hareket örneklerinden biridir.

Klasik fiziğe göre bu sistem herhangi bir büyüklükte –herhangi bir titreşim aralığında– titreşebilir. Ancak 2. Bölüm'deki kuantize salıncağımız gibi, mikroskobik salınım sistemleri kuantizedir; sadece bazı belirli enerji miktarlarıyla ve dolayısıyla bazı belirli büyüklüklerde (titreşim genişlikleri) salınabilirler. En ilginç de, Heisenberg'in ilkesinin *bir salıngaçın denge konumunda hareketsiz olamayacağını, daima bu konum etrafında salınması gerektiğini* belirtmesidir. Bunun nedeni, eğer hareketsiz olursa kesin süratinin (sıfır) ve kesin konumunun (denge konumu) Heisenberg'in ilkesini ihlal edecek olmasıdır.

Kuantum sistemleri asla hareketsiz kalamazlar. Bu basit ve tümüyle kuantum nitelikli kavramın kuantum alanlarıyla ilgili

önemli olası sonuçları vardır. Bildiğiniz gibi, bir su dalgası geçerken küçük bir mantarın suda yüzdürülmesi, dalga geçerken mantarın ve dolayısıyla suyun aşağı yukarı salındığını gösterir. Kuantum alanlarında da aynısı geçerlidir: Alandaki her bir noktada, bir kuantum (dalga) geçerken alan sabit bir değer etrafında salınır. Heisenberg'in ilkesi bu salınımlar için geçerlidir, *kuantum alanları her uzaysal noktada salınmalıdır. Alan hiçbir kuantumun olmadığı en düşük enerji yani "vakum" halinde olsa bile, her yerde rastgele titreşmelidir.*

Aslına bakarsanız, EM alan gibi belirli bir kuantum alanı en küçük şekilde mevcutsa, her yerde mevcut olmalıdır. EM alanın mevcut olmadığı herhangi bir bölge, içinde EM alanın tam olarak sıfır olduğu bir bölge olurdu. Heisenberg'in ilkesi ise buna izin vermez. Dolayısıyla belirli bir kuantum alanının mevcut olmadığı bir bölge var olamaz. Bunu başka bir şekilde ifade edecek olursak, eğer kuantum alanları bir bölgede aniden tümüyle yok olursa, o bölgenin kendisi de evrende yok olur.

Boş bir evren kuantum kurallarıyla çelişir. Uzayda yayılmış bir evren bir minimumda, tümüyle vakum kuantum alanlarıyla kaplı olmalıdır, çünkü gerçek boşluk Heisenberg'in ilkesini ihlal eder. Açıkçası bu durum filozofun neden hiçbir şeyin var olmaması yerine bir şeylerin var olduğu sorusunu tam olarak yanıtlamaz, fakat belki de yanıtın bir parçasıdır.[22]

7

Kuantum Halleri ve Hallerin Değişimleri

Nasıl ki siz bir koşma, merdivenlerden düşme veya kontrol edemediğiniz bir kıkırdama hali içinde olabilirseniz, elektron, foton, atom ve diğer kuantumlar da çeşitli *kuantum halleri* içinde olabilirler. Bir kuantum birçok farklı hareket hali içinde veya aynı anda birkaç hareket halinin süperpozisyonunda (8. Bölüm) olabilir. Bir kuantum yayılabilir veya daralabilir, o veya bu şekilde hareket edebilir, yüksek veya düşük enerjiye sahip olabilir, bu veya o nokta etrafında konumlanabilir, mikroskopla görülemeyecek kadar küçük veya devasa olabilir veya bunlardan herhangi birilerinin süperpozisyonunda olabilir.

1920'lerin sonlarında fizikçiler kuantumların matematiğini çözerek olası hallerini ve bu hallerin zaman içinde nasıl değişebildiğini tanımladılar. Bu bölümde elektron gibi temel kuantumların ve atom gibi birleşik kuantumların olası hallerinden bazılarını ve bu hallerin zaman içinde ne şekilde değişebildiklerini tanımlıyoruz. Zor bir soru soracağız: Kuantumlar ve fiziksel halleri gerçek mi (*ontolojik*) yoksa sadece deneylerin yararlı göstergeleri (*epistemolojik*) mi?

Temel Kuantum Halleri

5. Bölüm'de çift yarık deneyiyle bağlantılı olarak şunu belirttim: "Her bir foton ekrana yaklaştıkça, sönük çizgiler yerine parlak çizgilerde etkileşmesi gerektiğini 'bildiği' anlamında bütün girişim örüntüsünü bünyesinde barındırır"; buna rağmen, "fotonda, hangi atomun bunu absorbe etmesi gerektiğinin talimatı yoktur." Tüm bunlar fotonun kuantum halinin bir açıklamasıdır. Bir alan ne de olsa bir uzay durumu yani halidir ve bir foton veya başka bir kuantum da bir alan demetidir (veya kısmı, destesi veya parçası), dolayısıyla bir fotonun farklı halleri basitçe uzayın farklı durumlarıdır. Kuantum hali kavramı sadece alan kavramının bir uzantısıdır.

5. Bölüm'de şunu ileri sürdüm: Çift yarık deneyi her seferinde bir elektron olmak üzere (Şekil 5.4) yapıldığında, her bir elektronun girişim örüntüsünün tümünü kapsadığını kanıtlar. Ekrana yaklaşan elektron "çift yarık halindedir". Benzer şekilde, tek yarıktan geçen bir deneyde bir elektron "tek yarık halindedir" (Şekil 6.3).

Çift yarık halindeki bir elektron tek yarık halindeki bir elektrondan farklı davranır. Bu iki halin varlığına dair kanıt, iki yarıkta elektronun ekrana çarpması daima iki yarık örüntüsüyle tutarlı olduğu halde, tek yarıkta elektronun çarpmasının daima tek yarık örüntüsüyle tutarlı olmasıdır. Şekil 6.3 zaman içinde gelişen tek yarık halini gösterir. Şekil 6.3c ve d elektronu tek yarıktan geçerek tek yarık halinde "hazırlandıktan" hemen sonra gösterir.

Eğer iki elektron veya başka özdeş kuantumlar hakkında yapılabilen istatiksel tahminler farklıysa bunlar farklı hallerdedir. Bildiğiniz gibi, kuantum rastgeleliği nedeniyle *istatistik* kelimesi burada önemlidir. Örneğin tek bir çarpmadan her zaman bir elektronun o sırada (veya daha ziyade çarpmadan hemen önce) tek yarık halinde mi yoksa çift yarık halinde mi

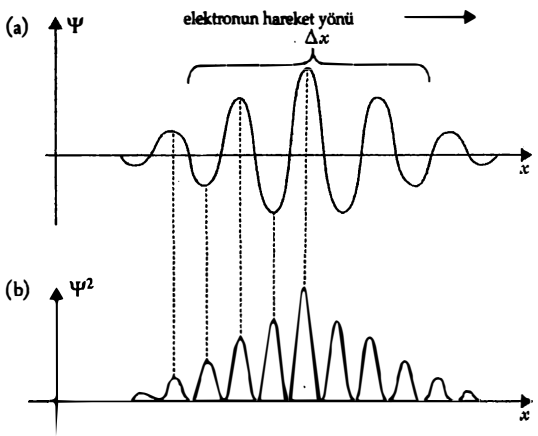
olduğunu söyleyemezsiniz; fakat Şekil 5.4'ün gösterdiği gibi, aynı çift yarık kuantum halinde özdeş olarak hazırlanmış zilyonlarca elektron çarpmasından söyleyebilirsiniz. Gelgelelim, tek bir çarpmanın farklı kuantum hallerini ayırabildiği durumlar vardır. Örneğin tek bir çarpma iki yarıklı girişim çizgileri arasındaki karanlık bir bölgede ortaya çıkarsa tek yarık ve iki yarık hallerini ayırabilir, çünkü bu durumda iki yarık örüntüsü bertaraf olur.[1]

Bir kuantumun hali teoride geleneksel olarak Yunanca Ψ harfiyle gösterilen ve genellikle *dalga fonksiyonu* (kullanmayı tercih etmeyeceğim, sıkıcı bir soyut matematiksel ifade) denen matematiksel bir nesneyle[2] belirtilir. Elektron bir madde alanındaki bir bozunum olduğu için, Ψ üç boyutlu bir *madde dalgasının* şeklini tanımlar. Örneğin Şekil 6.3, bir elektron tek yarıktan geçerken beş farklı zamandaki bir Ψ halini tasvir eder.

Şekil 7.1a, Şekil 6.3'teki tek bir andaki elektron gibi, tek bir kuantumun tipik halini daha detaylı bir şekilde gösterir. Bu tarz kısa, kompakt dalgaya *dalga paketi* denir. Bu dalga paketi tek bir elektronu tasvir ederken ulaşabileceğimiz en yakın şeydir. Bu dalganın aslında resimde gösterilmeyen, nokta benzeri ufak bir parçacığı temsil ettiğini düşünmeyin. Oradaki tek şey dalgadır.

Şekil 7.1a üç boyutlu elektronun x ile belirtilen tek bir boyutunu gösterir. Bu dalga paketi belirli bir mesafede (genellikle mikroskobik) yayılan ve x yönünde hareket eden bir dalga dizisidir. Ψ ile belirtilen diğer eksen, madde alanının (bozunum), her bir x noktasındaki kuvvetini yani değerini temsil eder. Şekil ayrıca elektronun x ekseni boyunca x konumundaki Δx belirsizliğini gösterir. Atomlardaki elektronların Δx konum belirsizlikleri genellikle 10^{-10} ila 10^{-6} aralığında yer alır, fakat dikkatli deneylerdeki elektronlar çok daha büyük olabilir.

Bu madde alanı grafiği ile deneyler arasındaki ilişki tam olarak nedir? Bunun hakkında daima tartışmalar olmuştur. 1920'lerde genel kuantum teorisine ışık tutan Erwin Schrödinger ve diğer bilim insanları Newton fiziğinden çok etkilenmişlerdi ki, bu fizik ufak, ayrı, yapısız parçacıklardan, belki de nokta parçacıklardan oluşan bir evren varsayıyordu. Bu fizikçiler kuantum deneylerinde beliren, Şekil 5.4'te gösterilene benzer dalga örüntülerini nasıl tahmin edeceklerini keşfettiler. Kuantumlar ayrı ayrı öngörülemez oldukları halde istatiksel olarak öngörülebilir oldukları için, Ψ dalga örüntüsünün söz konusu uzaysal nokta*da* nokta benzeri bir kuantum bulmanın deneysel olasılığını göstermesi gerektiğini varsaymak doğaldı.



Şekil 7.1 Tek bir anda bir elektronun tipik bir kuantum halinin grafiği. Ψ'nin sayısal değeri kuantum alanının yani madde dalgasının çeşitli x konumlarındaki kuvvetini temsil eder. Grafik bir elektronun üç uzaysal boyutundan sadece birini gösterir. (b) Bu elektronun farklı x konumlarında başka bir kuantumla etkileşime girmesinin olasılığı Ψ^2 (psi kare) ile temsil edilir. Kesikli çizgiler Ψ ve Ψ^2'nin çeşitli konumlarda nasıl ilişkili olduklarını gösterir.

Bazı fizikçiler hâlâ bu parçacık görüşünü destekleseler de, 5. Bölüm'ün ve göreli kuantum fiziği alanında çalışanların argümanları bize evrenin nokta parçacıklardan değil, uzayda yayılmış alanlardan oluştuğunu bildirir. Bu durumda, Şekil 5.4'te tasvir edilenlere benzer sonuçlar bir x noktasındaki Ψ değerinin elektronu bu belirli noktada bulma olasılığını değil, bu noktada *bir etkileşimin meydana gelme* olasılığını gösterir. Şekil 5.4'te bu etkileşim elektron ile görüntüleme ekranı arasındadır. Elektronun kendisinin belirli bir noktada "bulunma" olasılığına dair eski terminoloji şöyle bir yanlış bir kavramı akla getirir: Her bir kuantum tek bir uzaysal noktadadır fakat bunun hangi nokta olduğunu bilmiyoruz, dolayısıyla bilgisizliğimizi istatiksel bir dağılımla göstermeliyiz; tıpkı yazı tura atılmış fakat henüz ne olduğuna bakılmamış bir atışa %50 tura olasılığını atayabildiğimiz gibi. Bu kavram yanlıştır. Kuantumlar doğaları gereği uzayda yayılmıştır ve tek bir noktada oldukları söylenemez. Kuantum olasılıkları sadece bilgisizlik meselesi değil, daha ziyade elektronun yayılmış madde alanı içindeki belirli bir konumda etkileşmesine dair doğanın atanmış olasılığının çetelesidir. Daha önce değindiğimiz gibi, elektronu büyük bir balon ve tespit ekranını da bir çivili yatak olarak hayal etmelisiniz: Elektron birçok çivi üzerine yayılır fakat etkileşim sadece birinde meydana gelecektir. Kuantum hali her bir olası etkileşim noktasına bir olasılık atar.

Şekil 7.1a'daki grafik, Ψ'nin pozitif olduğu zirveler ile Ψ'nin negatif olduğu çukurların bulunduğu bir dalga paketini gösterir.[3] Deneysel açıdan, girişim fenomeni nedeniyle bir kuantum alanının hem pozitif hem de negatif değerleri olmalıdır. Girişim zirve ve çukurların hem yapıcı olarak (zirveler veya çukurlar birbirleriyle karşılaştıklarında) hem de yıkıcı olarak (zirveyle çukur karşılaştığında) birbirlerine karışmalarını gerektirir. Deneyler Ψ'nin bu dalga benzeri tarzda dav-

randığını gösterir. Gelgelelim olasılıklar göreli frekanslardır ve bunlar daima pozitiftir. Yanlış olan nedir?

Yanlış olan şey, herhangi bir dalganın fiziksel etkisinin yani "yoğunluğunun" –taşıdığı enerji miktarı– dalganın kuvvetinin yani değerinin *karesiyle* orantılı olduğunun ortaya çıkmasıdır. Negatif bir sayının karesi pozitif olduğu için bu yoğunluklar asla negatif olmaz. Bu nedenle, Ψ bir kuantum halini ifade etmesine rağmen, Ψ^2 (psi kare, Şekil 7.1b) kuantumun x noktasında başka bir sistemle etkileşme olasılığıyla ölçülen, dünya üzerindeki etki yoğunluğunu ifade eder.

Örneğin Şekil 5.4'teki ekranın küçük bir bölgesindeki elektron çarpmalarının sayısı o bölge içindeki Ψ^2'nin değeriyle orantılıdır, dolayısıyla Şekil 5.4e'ye baktığınızda, elektronların çeşitli noktalarda ekrana çarptığı Ψ^2 yoğunluğuna veya eşdeğer olarak tek bir elektronun ekranla çeşitli noktalarda etkileşme olasılıklarına bakıyorsunuz demektir. Şunu aklınızda tutun: Birçok özdeş kuantumun çarpma kaydına baktığınızda (Şekil 5.4e'de görüldüğü gibi), *tek bir* denemede *tek bir* kuantumun, çarpmadan hemen önceki kuantum alanının görüntüsüne bakıyorsunuz.

Başka bir örnekte, Şekil 6.3'ün sağ tarafındaki grafik, bir elektron görüntüleme ekranına yaklaşırken, elektron içindeki çeşitli x yanal konumları için Ψ^2'yi –herhangi tek bir elektronun x'te ekranla etkileşme olasılığını– temsil eder.

Işığın Kökeninin Öyküsü

Işığın kökeni nedir? Yanıt atomların ve kuantum hallerinin bu konuyla ilgili öyküsünden ortaya çıkar. Bunu en iyi, bir elektronun bir protona bağlı olduğu en basit atom olan H-1'den başlayarak anlatabiliriz.

Bir proton ile bir elektronu diğer cisimlerden izole ederseniz ve bunlar çok hızlı hareket ediyorlarsa, karşılıklı elektrik-

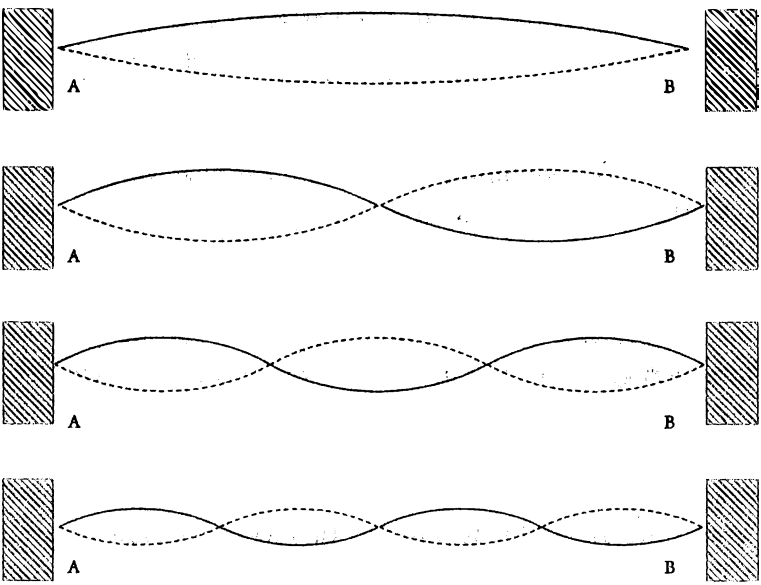
sel çekimleri bunları birbirlerine bağlar. İkisi de madde dalgalarıdır. Fakat protonun kütlesi aşağı yukarı 2.000 kat büyük olduğu için, Heisenberg'in ilkesi protonun belirsizliklerinin elektronunkinden 2.000 kat küçük olduğunu söyler. Dolayısıyla proton elektronla kıyaslandığında nispeten klasiktir ve protonu, etrafında elektronun madde alanının (yani elektron) bir bulut gibi yayıldığı, küçük, parçacık benzeri bir cisim olarak düşünmek iyi bir yaklaşım olur. Bunun üzerine Schrödinger'in denklemi bu elektron alanının konfigürasyonunu ve hareketini tanımlar.

Fizikçilerin bunun gibi dinamik (hareketle ilgili) durumlarda sordukları ilk soru şudur: Elektronun zaman içinde değişmeden süren halleri var mıdır? Fizikte genellikle dinamik sistemlerin bu tarz "durağan halleri" sistemin daha genel durumlardaki hareketini bulmanın bir anahtarıdır. Dalga hareketleri durumunda durağan hallere *duran dalgalar* denir.

Tamamen klasik bir örnek de, sabit uzunluktaki bir keman kirişini titreşim hareketine geçirmek için yay çekildiğinde üzerinde oluşan duran dalgadır. Şekil 7.2 iki sabit nokta olan A ve B arasında gerili bir kiriş üzerindeki dört farklı duran dalgayı tasvir eder. Kirişin tümünün tek bir anda düzenli bir dalga şekli vardır ve kiriş üzerindeki her bir nokta kesiksiz çizgiyle gösterilen şekil ile kesikli çizgiyle gösterilen şekil arasında ileri geri salınır. Şekil dört olası duran dalga gösterir. Bunların hepsi de kirişe düzgün bir biçimde "uyan" dalgalardır. Örneğin üstten ikinci halde, bir dalga boyunun tamamı yaya uyar; üçüncü halde, 1,5 dalga boyu uyar.

Üstteki ilk durağan halde kiriş tek bir kesimde titreşir, uçlar sabitlenmiştir. İkinci halde kiriş iki kesim, üçüncü ve dördüncü hallerde ise sırasıyla üç ve dört kesim halinde titreşir. Beş, altı vb. kesimli haller de mümkündür. Bu duran dalgaları yapmak için, kiriş için belirli frekanslar (titreşim oranları) se-

çilmelidir; kirişe düzgün bir biçimde uyan dalga boylarıyla sonuçlanacak frekanslar. Şöyle bir şey varsayalım: Örneğin 5 Hz'lik bir frekans (saniyede 5 titreşim), Şekil 7.2'deki dört halin birincisinde gösterildiği gibi, kirişe tam uyan bir yarım dalga boyunda titreşimlere neden olsun. İkinci hale neden olan frekansın birinci halin frekansının iki katı, yani örneğimizde 10 Hz olduğu görülür.[4] Üçüncü ve dördüncü halin frekansları sırasıyla 15 Hz ve 20 Hz (birinci frekansın üç ve dört katı) olur. Bu durağan hallerde kirişin gerçekte durağan (hareketsiz) olmadığına dikkat edin: Kiriş titreşir fakat genel titreşim örüntüsü değişmez, yani kiriş boyunca hareket etmez.



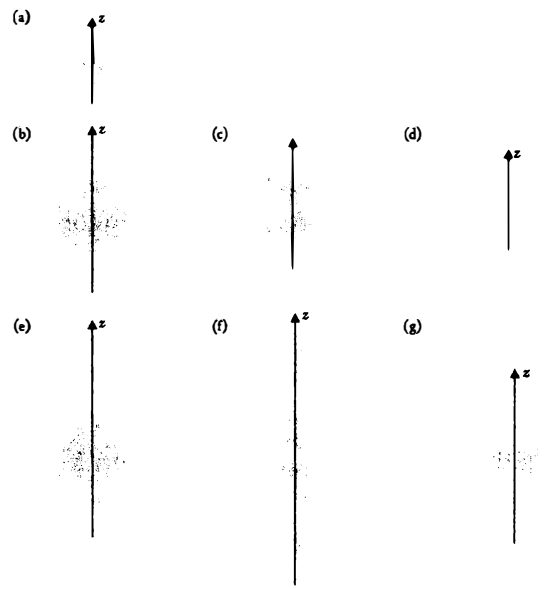
Şekil 7.2 A ve B sabit noktaları arasında farklı titreşim hallerinde bulunan bir kiriş. Her bir titreşim hali kirişin kesiksiz ve kesikli çizgilerle gösterilen dalga şekilleri arasında ileri geri salındığı bir "duran dalgadır". Gösterilen dört duran dalganın dalga boyları ve titreşim frekansları farklıdır.

Schrödinger'in denklemi H-1 çekirdeğini kuşatan elektron alanının bu tarz durağan hallerini öngörür. Bu haller Şekil 7.2'deki dalgaların durağan olmalarıyla aynı anlamda "durağandır": Madde dalgası her bir noktada titreşmesine rağmen bir yerden bir yere hareket etmez. Dolayısıyla hidrojen atomunun durağan halleri elektronun (çekirdeğin etrafında yayılmış bir alan olduğunu hatırlayalım) konumunu değiştirmediği durumları temsil eder. Bu hallerin doğrulanmış deneysel çıkarımları vardır ve hem Schrödinger'in denkleminin hem de kuantum alanının elektron ve diğer kuantumlara olan yaklaşımının başarısını gösterirler. Bir elektron, keman kirişlerindeki duran dalgalar gibi, diğer tüm dalga sistemlerinin durağan hallerine doğrudan benzer olan durağan hallere sahip olduğu halde, nasıl olur da bir alanda bir dalga olamaz?

Bununla birlikte bir elektronun duran madde dalgaları bir kirişteki duran dalgalardan daha karmaşıktır, çünkü bunlar üç boyutta meydana gelir. Şekil 7.3 bu durağan hallerin yedisinin genel şekillerinin iki boyutlu çizimlerini gösterir. Her bir görüntü bir hidrojen atomundaki elektronun farklı bir olası kuantum halidir. Bu yedi hali (a), (b), (c), (d), (e), (f) ve (g) şeklinde belirttim. Bunlar Şekil 6.3'teki beş "enstantanenin" veya bu resmin sağ tarafındaki grafikteki yayılmış bir kuantumun tasvirleri gibi, hidrojen içindeki elektronun benzer şekildeki tasvirleridir. Bu yedi duran madde dalgası Şekil 7.2'deki kirişin dört duran dalgasına benzerdir. Her çizim, her bir diyagramın merkezindeki bir proton (fakat gösterilmemiştir) etrafında durağan bir halde bulunan bir elektronu gösterir. Şekil Ψ^2'yi farklı konumlarda –elektronun mevcut olabilecek başka alanlarla, belirli bir konumda etkileşme olasılığını– gösterir. Daha yüksek olasılık (daha büyük Ψ^2) bölgeleri daha koyudur. Daha açık ve daha koyu arasındaki geçişler bu basitleştirilmiş diyagramda olduğu gibi ani değil de yumuşak bir

biçimde olmalıdır. Her halin tam üç boyutlu görüntüsü için zihninizde diyagramı z ekseni etrafında döndürün. Böylece (a), (b) ve (e) halleri küresel simetrik alanlar, (c) hali bir dambıl ve (d) hali de bir çörektir.

Elektronun güneşin yörüngesinde dönen bir gezegen gibi çekirdeğin etrafında dönmediğine dikkat edin. Sabit konumlar hareket etmez. Bu dalgalar, Şekil 7.2'deki duran dalgaların kirişe tam uymaları gibi, çekirdeğin etrafına tam uyarlar. Ψ^2 olasılıkları değişmese de, Ψ madde alanı her bir hal için uygun frekansta titreşir, tıpkı Şekil 7.2'deki kirişin titreştiği gibi.



Şekil 7.3 (a-g) Bir kuantumun tasvirleri. Bir hidrojen atomundaki elektronun olası birçok durağan halinden yedi tanesi tasvir edilmiştir. Her bir (a), (b) vb. diyagramı elektronun olası bir durağan halini tasvir eder. Şekil Ψ^2'yi, yani her uzaysal noktada elektronun mevcut olabilecek diğer alanlarla etkileşme olasılığını gösterir. Daha yüksek olasılık (daha büyük Ψ^2) bölgeleri daha koyudur. Tam üç boyutlu görüntü için her diyagramı zihninizde z ekseni etrafında döndürün.

Schrödinger'in hidrojen atomu analizi 1926'da yayımlandı. Bunun Niels Bohr'un hidrojen atomu teorisinden (4. Bölüm) daha doğru olduğu ortaya çıktı. Bohr'un modelinde elektron birçok olası dairesel, gezegen benzeri yörüngelerden birinde protonun etrafında döner ve daha yüksek bir enerji yörüngesinden daha düşük bir enerji yörüngesine ânında sıçrayarak ışık yayar. Hem Schrödinger hem de Bohr çalışmalarıyla Nobel Ödülü'nü kazandılar: Bohr 1922'de ve Schrödinger de 1933'te.

Bu durağan hallere yönlendiren matematiksel analiz atomun evrenin geri kalanından izole olduğunu varsayar. Enerjinin korunumu ilkesi (3. Bölüm) böyle bir sistemin enerjisinin değişmemesi gerektiğini söyler. Bu durumda şunu öğrenmek çok da şaşırtıcı olmaz: Her bir durağan halin zaman içinde değişmeyen belirli ve öngörülebilir bir enerjisi vardır, fakat bu elektronun konumunun veya süratinin öngörülebilir olduğu anlamına gelmez. Hatta Şekil 7.3 elektronun konum belirsizliğinin ölçüsünü gösterir.

Elektronun bu durağan hallerde hareketsiz olduğu gibi yanlış bir izlenime kapılmayın. Elektronun Ψ hali değişmese de (Ψ'nin, Şekil 7.2'deki sicimin dört halinin her birinin titreştiği şekilde titreşmesi dışında) elektronun hızı oldukça rastgeledir ve sıfıra yakın olması olası değildir. Genel şekli değişmeyen fakat suyu akıntı yönünde akan bir akarsu gibi, alanın uzayda her bir noktada değişmeyen bir yoğunluğu sürdürecek şekilde, hızlı hareket halinde olduğunu düşünün. Örneğin (a) halinde elektronun ortalama hızı saniyede 2.000 kilometredir, yani ışık hızının yaklaşık %1'idir. Elektron bu halde olduğunda protondan ortalama uzaklığı yaklaşık 5×10^{-11} m ve bu mesafedeki belirsizlik de yine 5×10^{-11} m'dir.

Ve gene de hız ve konumdaki büyük belirsizliklere rağmen elektronun enerjisi öngörülebilirdir ve değişmez. Bunun nedeni iki çeşit elektron enerjisi olmasıdır: Elektronun hareketinin kinetik enerjisi ve elektron üzerinde protonun uyguladığı EM kuvvetlerin neden olduğu elektrik enerjisi. Bu iki enerji, toplamları –toplam enerji– öngörülebilir ve değişmeden kalacak şekilde birbirlerini dengelerler.

Diyagramları inceleyerek bu enerjiler hakkında bir şeyler öğrenebiliriz. Bir yerçekimi kuvveti benzetmesi yararlı olur. Bir taşı yerden masaya kaldırdığınızda taşın iş yapma becerisini (enerjisini) artırırsınız, çünkü taş artık masadan düşüp, örneğin yerde hareketsiz duran büyük bir süngeri ezerek bu sırada iş yapabilir. Dolayısıyla kaldırılmış bir taşın yerdeki bir taştan daha çok enerjisi vardır ve taş dünyadan uzaklaştıkça yerçekimi enerjisi de daha fazla olur. Aynı şekilde protondan uzaklaştıkça elektronumuzun EM enerjisi de artar, çünkü elektron protona doğru, taşın dünyaya çekildiği şekilde çekilir. Dolayısıyla çekirdeğe daha yakın olan hallerin enerjisi *daha düşük* olmalıdır. Schrödinger'in denkleminin matematiksel analizi bu klasik benzetmeyi doğrular: En küçük hal olan (a) halinin enerjisi en düşüktür. Bu aynı zamanda en basit haldir: Dışa doğru yoğunluğu düşük (etkileşim olasılığı düşük) ve merkezde, protona en yakın durumda yoğunluğu yüksek basit bir küre. Diğer küresel haller olan (b) ve (e) daha büyüktür ve dolayısıyla enerjileri de daha yüksektir. (b) halinde protondan belirli bir dairesel uzaklıkta, ilginç bir küçük boşluk vardır; elektronun bu mesafenin içinde ve dışında etkileşme olasılığı yüksek olsa da bu mesafede etkileşme olasılığı yoktur. Bunun gibi bir boşluk Şekil 2.3 ve 6.2'deki karanlık çizgilere benzer bir dalga girişimi etkisidir.

(b), (c) ve (d) hallerinin enerjilerinin aynı olduğu görülür. Aralarındaki fark değişik açısal (yörüngesel) hareketlerden

kaynaklanır. (b) hali gibi küresel simetrik bir hal klasik olarak çekirdeğin etrafında dönmeyen fakat doğrudan çekirdekten geçen bir çizgide ileri geri hareket eden bir elektrona karşılık gelir (elektronlar güçlü çekirdek kuvvetine maruz kalmayan leptonlardır). Bu hareketin dik çizgili doğasına rağmen kuantum hali küresel simetriktir, çünkü bu olası dik çizgilerin yönelimi tamamen rastgeledir ve dolayısıyla olasılık dağılımı da küresel simetriktir.

(d) hali zıt ucu temsil eder, yani çokça açısal harekete sahip ve neredeyse dairesel bir yörüngede hareket eden bir elektronu. Bu çörek şeklindeki hal Bohr'un gezegensel atomundaki elektronun yörüngelerine benzerdir. Bu durumda (c) hali (b) ile (d) hali arasında yer alır ve oldukça eliptik bir gezegensel yörüngeye benzerdir. (e), (f) ve (g) halleri enerjileri aynı fakat açısal hareketleri farklı olan başka bir üç hal grubudur. (g) hali çift simit (*tek* bir elektron için!), (f) hali çift dambıl biçimindedir.

(a) haline en düşük enerjiye sahip durağan hal anlamında *taban hali* denir; bu dünya yüzeyinde bulunan ve buna göre yerçekimi enerjisi düşük olan bir taş gibidir. Şekil 7.2'deki, frekansı ve dolayısıyla titreşim enerjisi de en düşük olan üstteki çizimle kıyaslanabilir. Eğer izole atomumuz taban halindeyse kesinlikle orada kalacaktır, çünkü düşebileceği daha düşük enerji halleri yoktur ve kendisini daha yüksek bir enerji haline uyarabilecek bir dış enerji kaynağı da yoktur. Hatırlarsanız, elektronun çekirdeğe düşmesini engelleyerek atomların istikrarlı bir şekilde varlıklarını sürdürmelerini garanti eden işte böyle bir en düşük enerji halidir.

Diğer tüm enerji hallerinin enerjileri daha yüksektir ve bunlara *uyarılmış haller* denir. Eğer izole atomumuz uyarılmış bir haldeyse teorik olarak orada sonsuza dek kalmalıdır, çünkü Schrödinger'in denklemi durağan hallerin asla değişme-

diklerini öngörür. Gelgelelim *gerçek dünyada hiçbir sistem tam anlamıyla izole değildir*. Bunun nedeni her kuantum alanının vakum halinin evren boyunca yayılmasıdır. Dolayısıyla atomumuz gerçekte asla izole olamaz; aksine, evrenin bütün vakum alanlarıyla sürekli temas içinde olmalıdır! Özellikle EM alan atomları etkiler, çünkü atomlar elektrik yüklü kuantumlar içerir.

Uyarılmış bir hidrojen atomu ile vakum EM alan arasındaki olası etkileşimleri dahil ettiğimizde, kuantum teorisi uyarılmış hidrojen atomlarının eninde sonunda daha düşük enerji hallerine geçeceklerini öngörür (ve deneyler de bunu doğrular). Üstelik enerjinin korunması gerektiği için, yüksek enerjiden düşük enerji haline her geçişle birlikte, atomun geçişi sırasında kaybettiği enerjiyi taşıyan bir EM dalga –foton– şeklinde bir enerji salınımı olur.

Özet olarak, uyarılmış bir atomun vakumla etkileşmesi daha düşük bir enerji haline geçerek bir foton yaymasına neden olur. Bütün atomlar durağan atom halleri arasındaki bu geçiş süreci vasıtasıyla –kuantum sıçraması– fotonlar yaratır. Şimdi bu kuantum sıçramalarına daha yakından bakalım.

Kuantum Sıçramaları

Işığın kökenine dair az evvel ele aldığımız öykü, atom, molekül ve kimyayı ve dolayısıyla mühendislik, iletişim, tıp ve diğer sahalarla ilgili uygulamaları kavramamız açısından muazzam sonuçlar içerir. Hatırlarsanız (5. Bölüm), jul olarak ölçülen bir fotonun enerjisi daima Planck sabitiyle fotonun frekansının çarpımına eşittir. Enerjinin korunması için, bir atomik halden daha düşük enerjili bir hale geçişler, iki halin enerjileri arasındaki farka eşit enerjilere sahip fotonlar oluşturmalıdır. Fizikçiler Schrödinger'in denklemini kullanarak hidrojen atomunun durağan hallerinin enerjilerini hesapla-

yabilirler. Örneğin sadece Şekil 7.3'teki (b) halinin enerjisini daha yüksek enerjili (f) halinden çıkararak (f) halinden (b) haline geçişte yayılan fotonun enerjisi bulunabilir. Daha sonra da bu fotonun frekansı bulunabilir. Başka bir deyişle, hidrojenin bu hallerinin enerjilerinden hidrojen atomunun EM spektrumda mevcut olan frekansları tahmin edebiliriz.

Tahmin edilen bu spektrum hidrojen atomlarından oluşan seyreltik bir gazın yaydığı spektruma uymalıdır. Seyreltik gazda her bir atom komşularından nispeten uzaktadır. Öte yandan atomlar birbirlerine çok yakınsa her bir atomu komşuları saptırır ve atom bu sapmanın değiştirdiği bir spektrum yayar.

Seyreltilmiş gaz deneyi öğrenci fizik laboratuvarlarının favorisidir. Standart işlemde bir "tahliye borusu" (yaklaşık yarım metre uzunluğunda ince bir tüp) kullanılır; bu boru hidrojen gazıyla doludur ve iki ucundan dışarı uzanmış, kısa, metalik "elektrotlarla" kapatılmıştır. Elektrotlardan biri bir telle bir bataryanın pozitif kutbuna, diğeri de negatif kutbuna bağlanır; daha sonra bataryanın kimyasal kuvvetleri elektronları negatif telden negatif elektrotun üzerine iter ve pozitif elektrottaki elektronları çekerek pozitif tele verir. Bu yüklü elektrotlar gaz boyunca bir elektrik alanı (fakat henüz elektrik akımı yoktur) tesis ederler. Yeterince yüksek batarya voltajlarında bu elektrik alanı gazın atomlarından elektronları çekerek atomları iyonlara (yüklü atomlar) dönüştürecek ve bir elektrik akımı (elektron akışı) tesis edecek kadar güçlenir.[5]

Elektronlar daha sonra gaz boyunca yol alarak pozitif elektroda ulaşır, bataryadan geçerek (bataryanın kimyasal kuvvetlerince itilir) negatif elektroda ulaşır ve gaza geri dönerek devre boyunca ileri doğru yol alır. Akan elektronlar sürekli olarak H atomlarıyla çarpışarak onları daha yüksek çeşitli enerji hallerine uyarır. Her saniye bu uyarılmış H atom-

larından birçoğu kendiliklerinden daha düşük enerji hallerine geçerek H atomundaki birçok olası elektron geçişlerinin tüm frekanslarında fotonlar oluşturur. Dolayısıyla boru çok renkli bir ışık yayar. Aynı ilkeden yararlanan neon reklamları da hidrojen yerine neonu veya başka gazları kullanır. Bir prizma bu ışımanın farklı frekanslarını yönü farklı ışınlara ayırdığında atomların tüm spektrumunu gözlemleyebiliriz.

Fizikçiler bu tür deneyler yaptıklarında gözlemlenen spektrumların frekanslarının teorinin öngörüleriyle uyuşmaları Schrödinger'in denkleminin doğadaki gerçek bir şeyi tanımladığını gösterir. Teorik öngörüler ile çok sayıda deneyin uyuşması kuantum fiziği açısından azımsanmayacak bir başarıdır. 1. Bölüm'de belirtildiği gibi, bu uyuşmaların birçok rakama kadar doğru olması çoğu kez hayret vericidir.

Schrödinger'in denklemi bazı basitleştirici varsayımlar altında elde edildiği için, bu varsayımlar kaldırıldığında doğruluğu daha da artar. Varsayımlardan biri hidrojendeki elektronun göreli olmadığıdır; yani ışıktan o kadar yavaş hareket eder ki, Einstein'ın teorisinin etkilerini göz ardı edebiliriz. Gerçekte, taban halinde bile, elektronun ışık hızının yaklaşık %1'ine karşılık gelen bir hızda hareket etmesi küçük fakat tespit edilebilir bir görelilik düzeltmesi anlamına gelir. Başka bir varsayım da atomun hiçbir manyetik alana maruz kalmadığıdır. Gerçekte ise her atom, elektronların hareketlerinin ve çekirdeğin oluşturduğu manyetik alanlar içerir. Başka bir varsayım da atomun olası enerjilerinin sayısal değerlerinin hep mevcut olan EM alandan doğrudan etkilenmediğidir. Paul Dirac ile başka bilimciler Einstein'ın özel görelilik teorisini kapsayan ve tüm bu hataları düzelten bir kuantum teorisi ürettiler. Bu teorinin öngörüleri bilimdeki en doğru öngörüler arasındadır. Kuantum fiziğinin büyük ününün çoğu atomik ve başka spektrumları tahmin etmedeki doğruluktan kaynaklanır.

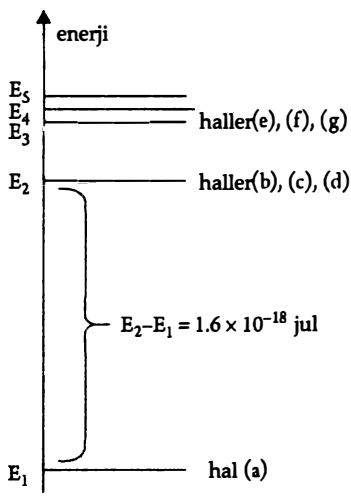
2. Bölüm'deki hayalî kuantize çocuk salıncağı gibi, bir H atomunun enerjisi izin verilen bir değer kümesiyle sınırlıdır. Bu kuantum fiziğinin sayısal doğasının orijinal bir örneğidir. Şekil 7.3 bu izin verilen değerlerin bazılarına karşılık gelen kuantum hallerini tasvir eder. Şekil 7.4 (belki de jul olarak niceliksel bir enerji ölçeğinde ölçülen) en düşük beş enerji seviyesini gösterir. En düşük iki enerji arasındaki enerji farkı 1,6 $\times 10^{-18}$ juldür ve diğer farklar daha da küçüktür.[6] Şekil 7.3'teki yedi halin enerjileri resimde gösterilmiştir. Her enerji farkı (yani, E_5'ten E_3'e) bu seviyeler arasında geçiş yapan bir hidrojen atomunun yaydığı fotonun taşıdığı enerjiyi temsil eder. Hidrojen atomu diğer durağan hallere karşılık gelen, çok sayıda kabul edilen başka enerji değerlerine sahiptir.

Şimdi daha yakından bakalım. Bir H atomunun E_2 enerjili (c) halinden E_1 enerjili (a) taban haline geçtiğini varsayalım. Kuantum belirsizliği nedeniyle bu sürecin rastgele olmasını bekleriz. Kuantum fiziği (Schrödinger'in denklemi) atomun (c) halinden başladığını varsayarak şunu öngörür: Atomun (c) halinde tespit edilme olasılığı başlangıç zamanında %100'den, sonraki zamanlarda derece derece daha düşük değerlere gerilerken, atomun taban halinde tespit edilme olasılığı sıfırdan başlayarak artar. Teori ayrıca taban haline geçişin, enerjisi E_2-E_1'e eşit olan bir fotonla birlikte meydana geldiğini öngörür. Geçiş zamanı öngörülebilir olmasa da, "ortalama ömür" gibi istatistikler öngörülebilirdir. Örneğin (c) veya (d) halinden taban haline geçişin ortalama ömrü 1,6 nano saniyedir (1,6 $\times 10^{-9}$ saniye). Bu atomun ortalama olarak uyarılmış halde kaldığı süredir. Bu tarz saniyenin milyarda biri kadar ("nano saniye") ömürler atomlarda tipiktir. Öte yandan, (b) halinin taban haline geçmeden önce saniyenin yaklaşık sekizde biri kadar bir ortalama ömrü vardır; (c)'den (a)'ya veya

(d)'den (a)'ya geçişlerden yüz milyon kat daha uzun. (b) gibi nispeten uzun ömürlü bir halin *yarı kararlı* olduğu söylenir.

(c) halinden geçişin $1,6 \times 10^{-9}$ saniye *boyunca* gerçekleştiği gibi yanlış bir fikre kapılmayın. Geçiş radyoaktif bozunmaya benzerdir; anlıktır (yani sıfır zamanda meydana gelir), fakat bu geçişin meydana geleceği zaman belirsizdir ve ortalama olarak 1,6 nano saniye uzunluğundadır. Atom ortalama olarak 1,6 nano saniye (c) halinde kalır ve (c)'den (a)'ya geçiş anlık bir kuantum sıçraması olarak meydana gelir. Birçok fizikçi açısından böyle anlık bir sıçrama şaşırtıcıdır. Peki, bunun anlık olduğunu nereden biliyoruz?

Atomlar içindeki anlık kuantum sıçramaları 1986'da üç bağımsız grup tarafından doğrulandı.[7] Her bir grup *tek bir* atom-



Şekil 7.4 Bir hidrojen atomundaki elektronun en düşük beş enerji seviyesi. Diyagramda ifade edilen (a)'dan (g)'ye kadar haller Şekil 7.3'te gösterilmiştir. Jul olarak asıl enerji miktarları verilmemiştir, çünkü konumuz açısından sadece göreli değerler önemlidir. Bir hidrojen atomu bu enerjiler arasında geçiş yaparak ışık yayar.

dan çıkan ışığı gözlemledi. Işığı atom *ya* birkaç nano saniyelik ömrü olan (daha önce sözü edilen (c)'den (a)'ya gibi) tipik bir uyarılmış halden *ya da* birkaç saniyelik ömrü olan (daha önce sözü edilen (b)'den (a)'ya gibi) tipik olmayan yarı kararlı bir uyarılmış halden taban haline geçerken gözlemlediler. Atomu sürekli olarak lazer ışığıyla uyardılar. Böylece atom taban haline geçer geçmez lazer atomu tekrar bu iki uyarılmış halden birine yükseltti. Atomun yarı kararlı hale geçiş yapıp çıkmasına kıyasla nano saniye haline geçiş yapıp çıkması olasılığı çok daha yüksekti. Tipik olarak atom saniyelerden oluşan bir süre içinde nano saniye haline zilyonlarca geçiş yapıp çıktı. Bu sürede o kadar hızlı titreşerek ışıldıyordu ki, (çünkü birbiri ardı sıra fotonlar yayıyordu) tüm bu süre boyunca aydınlık kalıyor gibi görünüyordu. Ara sıra yarı kararlı hale uyarılan atom birkaç saniye bu halde kalıyordu. Böyle bir yarı kararlı evre sırasında atom artık titreşerek ışıldamıyor, karanlık kalıyordu. Daha sonra rastgele taban haline sıçrıyor ve kaldığı yerden nano saniye haline geçiş yapıp çıkmaya devam ediyordu. Dolayısıyla atomdan çıkan ışık birkaç saniyeliğine açılıyor (fakat titrek halde), sonra birkaç saniyeliğine kapanıyor ve sonra tekrar açılıyordu. Açık ve kapalı arasındaki geçişler deneyi yapanların belirleyebildikleri kadarıyla anlıktı – bir durumdan diğerine dereceli bir geçiş belirtisi göstermiyordu.

Görünen o ki, *atomlardaki kuantum sıçramaları gerçek ve anlıktır*. Bununla birlikte şu da bilinmelidir ki, elektron bir konumdan diğer konuma ânında hareket etmez. Atomlar içindeki bu kuantum sıçramaları uzayda yayılmış bir madde alanının iki konfigürasyonu arasındaki geçişleri ifade eder. Madde alanı aniden Şekil 7.3'teki durağan hallerin birinden diğerine geçer. Daha önce gördüğümüz gibi (2., 5. ve 6. bölümler), kuantum sıçramalarının anlık yani süreksiz, sayısal yapısı uzayda yayılmış kuantumun bütünlüğünden kaynak-

lanır. Yayılmış kuantumun tümü her yerde, aynı anda olmak üzere değişmelidir.

Kuantumlar ve Halleri Gerçek midir?

Bu soru beni rahatsız ediyor. Bu kitap ne de olsa bir fizik kitabı ve fiziksel gerçeklikle ilgilenmesi gereken fiziğin yukarıdaki başlığı da lüzumsuz kılması gerekir. Ancak kuantum fiziği güç algılanan ve (bazılarına göre) paradoksal konularla ilgilenir. Kuantumlar çok ufak, anlık, değişebilir, kırılgan, öngörülemez, tuhaftır, görünmez alanlardan oluşurlar ve tek tek gözlemlenmeleri neredeyse olanaksızdır; o yüzden bunları öylece uydurduğumuz sonucuna varmak kolaydır. Bir atomu bir ayakkabıyı inceler gibi inceleyemezsiniz. Fizikçilerin ayakkabıların varlığından kuşkusu yoktur, fakat bazıları kuantumların görülemeyecek kadar küçük ve incelendiklerinde doğalarının değişecek kadar hassas olduklarından kuşkulanıyor.

Bu eski bir tartışmadır. Bir keresinde yemekli bir davette şüpheci biri 1911'de atom çekirdeğini keşfeden Ernest Rutherford'a atom çekirdeğinin gerçekten var olduğuna inanıp inanmadığını sordu. Rutherford'un yanıtı ise şöyleydi: "Yok; yok! Nasıl bu kaşığı görebiliyorsam önümdeki küçük, inanılması güç şeyleri de görebiliyorum!"[8] Ancak şüpheciler ısrarcıdır; o zaman da öyleydi, şimdi de öyle.

Bugünlerde çok az fizikçi atomların, elektronların, fotonların ve diğer kuantumların varlığından şüphe etmekle birlikte, bazı uzmanlar kuantuma dair özgül tanımlarımızın gerçekliğinden şüphe ediyor. Şüphelenmelerinin ise iki nedeni var.

İlki ölçüm meselesidir. Kuantumların bazı özellikleri yalnızca teknik becerisi olanlar tarafından gözlemlendiği yani "ölçüldüğü" zaman var olur gibidir. Örneğin bir elektron tek bir dar yarıktan geçerek bir görüntüleme ekranına yaklaşır,

çarpmadan hemen önce bütün ekrana yayılır ve çarptığında ise Şekil 6.3'te gösterildiği gibi aniden atomik boyutlara küçülür. Ekranla etkileşim elektrona –atomik boyutlar içinde– oldukça kesin bir konum kazandırır; bu çarpmadan önce sahip olmadığı bir şeydir. Benzer şekilde bir kuantumun süratini ölçmek kuantuma yaklaşık bir sürat kazandırır. Öyleyse konum ve sürat kuantumların gerçek özellikleri midir yoksa sadece ölçüm sürecinin uydurması mıdır?

Einstein gerçekçi kamptaydı. Şeylerin, gözlemlenmelerinden bağımsız olarak özellikleri olmasını istiyordu. Meslektaşı Abraham Pais onunla olan deneyimlerini şöyle aktarıyor: "Sık sık Einstein'ın nesnel gerçeklik hakkındaki görüşlerini tartışırdık. Hatırlıyorum, Einstein bir keresinde yürürken aniden durdu, bana baktı ve ayın sadece ben aya baktığımda var olduğuna gerçekten inanıp inanmadığımı sordu."[9] Sadece gözlemek gözlemlenen özellikleri yaratır mı ve o takdirde bu özellikler fiziksel olarak gerçek midir?

Gözlemin sahiden de bazı gözlemlenen özellikleri yarattığını gördünüz. Öte yandan ölçüm, insanların gözlemleriyle veya laboratuvarlarla ille de bir ilgisi olmayan nesnel bir faaliyettir. "Ölçüm" meselesinin kuantum fiziğinde 1920'lerin ortalarında, Niels Bohr ve Werner Heisenberg'in görüşleriyle başlayan, kuantum fiziğinin *Kopenhag yorumu* olarak tanınan, uzun bir geçmişi vardır (10. Bölüm). Bohr ve Heisenberg bir atomun konumu veya sürati gibi belirsiz kavramlar hakkında hata yapmamak için özellikle insanlar bu tarz miktarları ölçmeye kalktığında neler olduğu üzerinde yoğunlaştılar ve daha sonra tüm teori insan ölçümleri kavramıyla ilişkili hale geldi.

Ancak günümüzde şu açıktır: Kuantum ölçümü kuantum fenomenlerinin yaptığı makroskobik etkiyi ifade eden, tümüyle doğal bir süreçtir ve ille de insanların gözlemleriyle

ilgili değildir. Bir görüntüleme ekranına çarpan tek bir elektron, bir insanın olayı gözlemlemesinden veya kaydetmesinden bağımsız olarak elektron için daha kesin bir konum yaratır. 1. Bölüm'de belirtildiği gibi, kuantum fiziği ile insan bilinci arasındaki sözde bağlantıdan çokça sahte bilim uydurulmuştur,[10] ancak böyle bir bağlantıya dair hiçbir kanıt yoktur. İnsanlar var olmasaydı dahi kuantum evreni değişmezdi.

Birçok fizikçinin kuantum tanımlarımızın gerçekliğinden şüphe duymalarının ikinci bir nedeni de kuantum hallerinin "ontolojik" değil, salt "epistemik" oldukları fikridir (bunlar, sırasıyla "gerçeklikle ilgili" ve "bilgiyle ilgili" anlamına gelen felsefi terimlerdir). Bu ölçümle ilgili ilk argümanının bir çeşit genelleştirilmesidir. Bu fizikçiler kuantum hallerinin öngörülerde bulunmada yararlı olduğuna, fakat taş ve kaşığın gerçek olduğu şekilde gerçek olmadıklarına inanırlar.

Saygın bir bilimsel teori deneysel sonuçları tahmin edebilmelidir. Bir elektronu bir Ψ haline saptadığı söylenen, doğrudan gözlemlenebilir, makroskobik bir süreci dikkate aldığımızda, elektronun bu halinin bir sonucu olarak oluşan makroskobik (gözlemlenebilir) etkileri tahmin edebilmeliyiz. Epistemik görüş bu tarz makroskobik sonuçların bilebileceğimiz yegâne şeyler olduğunu ve gözlemlenebilir sonuçları tahmin etmede ne kadar yararlı olsalar da, "bir elektron" veya "Ψ kuantum halinin" vb. yalnızca teorisyenlerin zihinlerinde var olduğunu öne sürer. Ne var ki, epistemik görüş kuantum teorisini göz ardı etmez. Bütün fizikçiler kuantum hallerinin makroskobik olarak gözlemlenen deney sonuçlarını tahmin etmede elzem oldukları konusunda hemfikirdir. Epistemik görüş bu tarz hallerin gerçekte taş ve kaşığın var olduğu şekilde var olduklarının düşünülmemesi gerektiğini ileri sürer.

Tartışma Ψ kuantum hali üzerinde yoğunlaşır. Bu gerçekten var mıdır, yoksa matematiksel fizikçi Jeffrey Bub'ın iddia

ettiği gibi, "sadece bir itimat fonksiyonu, olasılıkların kaydını tutmada yararlanılan bir muhasebe yöntemi midir?"[11]

Fiziğin fiziksel gerçekliklerle ilgilendiği yönündeki tarihî iddiaya rağmen şaşırtıcı sayıda uzman kuantum fizikçisi epistemik görüşe eğilimlidir.[12] Örneğin, "Kuantum halleri gerçek midir?" sorusunu, kuantum uzmanı David Mermin *Physics Today*'deki 2009 tarihli makalesinde şöyle yanıtlıyor: "Kuantum halleri hesap aletleridir ve bir sistemin gerçek özellikleri değildir."[13] Mermin kuantum yerbilmezliği (9. Bölüm) ve ölçüm (10. Bölüm) gibi rahatsız edici meselelerin en iyi, kuantum hallerinin salt epistemik doğalarını kabul etmekle ele alınabileceğini ileri sürüyor ki, bu "kişiyi bu rahatsızlığın kaynaklarını daha nüanslı, daha az sansasyonel şekilde formülleştirmeye zorlar. Bu kuantum halleri görüşünü dikkate almak, 'uzaktaki tekinsiz eylemler' veya 'dalga fonksiyonunun çöküşünün' altında yatan bir 'mekanizmanın' teorik veya deneysel araştırmalarına –yaşamı olması gerekenden daha zorlaştıran araştırmalara– yönelik motivasyonu yok edebilir."

Mermin'in makalesinin geri kalanı bence bu görüşün bir tehlikesine örnek teşkil eder. Mermin daha sonra kuantum halleri basitçe kuantum alanlarının halleri olduğu için kuantum alanlarının gerçek olmadıklarını, sadece "yararlı matematiksel araçlar" olduklarını ileri sürer. Bu onun Maxwell ve Faraday'ın klasik EM alanın gerçekliğini de sorgulamasına yol açar ki, ne de olsa bu alan kuantize EM alanla aynı oluşumdur; tek farkı kuantumlamayı göz ardı ederek basitleştirilmiş olmasıdır. Mermin "klasik elektromanyetik alanların başka bir akıllı hesaplama aracı olduğu" sonucuna varır. Bununla birlikte çoğu fizikçi klasik alanları bizzat uzayın özellikleri olarak görür. Bu da Mermin'in, "uzay ve zamanın ... içinde yaşadığımız dünyanın özellikleri değil de, klasik olayları düzenlememize yardımcı olmaları için icat ettiğimiz kavramlar" oldukları sonucuna varmasına yol açar.

Uzay ve zaman gerçek değil mi? Anlaşılan kuantum oluşumlarının gerçek olmadıklarına dair herhangi bir argümanda kaygan bir zemin mevcut. Bu durumda gerçek *olan* oluşumlar bulmak zorlaşır, çünkü ne de olsa her şeyin nihayetinde kuantum olduğu farz edilir. Dolayısıyla kişi kısa sürede Rutherford'un kaşığının bile gerçek olduğundan şüphelenir ve Piskopos Berkeley'in öznel idealizmine geliriz (4 Bölüm) ki, bu dışarıda bir gerçeklik olmadığını ve taş, kaşık ve hatta dondurma dahil *her şeyin* insanların zihinlerinde var olduklarını varsayan bir felsefedir. Çoğumuz Samuel Johnson'ın gerçek olduğu farz edilen bir taşı tekmeleyerek yaptığı gibi, bunun gülünç olduğunu söylerdi. Fizikçilerin çoğu uzay, zaman ve alanların gerçek olduklarını kabul eder. Eğer kişi alanların gerçek olduğunu kabul ediyorsa, kuantize alanların gerçekliğini ve dolayısıyla bir kuantumun çeşitli hallerinin gerçekliğini nasıl reddedebildiğini anlamak zordur.

Önemli bir yeni iddia 2012'de ortaya çıktı. Matthew Pusey ve iki meslektaşı kuantum hallerinin epistemik yorumunun standart kuantum fiziğinin öngörüleriyle çelişen deneysel öngörülere işaret ettiğini kanıtladılar.[14] Bilim insanları kuantum öngörülerinin doğru olduklarında hemfikir oldukları için, bu öngörülerle çelişen bir yorumun değeri yoktur.

Pusey'in kanıtı standart kuantum ilkelerini baz alır ve hem realist hem de epistemik tarafların kabul etmeleri gereken basit bir gerçeklik varsayımına –her kuantum sisteminin gerçek bir fiziksel hale *sahip olduğu* varsayımına– dayanır; ancak hal bilinmiyor olabilir ve geleneksel kuantum fiziğinin belirlediği halden oldukça farklı olabilir. Başka bir deyişle, Pusey her bir elektronun örneğin bir çeşit esas fiziksel durumda olduğunu varsayar. Eğer elektronlar gerçekten varsa, bu güvenli bir varsayım olmalıdır. Gelgelelim, kuantumun kurucularından biri –Niels Bohr– aynı fikirde değil gibidir. Şu sözleri ünlüdür:

"Bir kuantum dünyası yok. Sadece soyut bir fiziksel tanım var. Fiziğin görevinin doğanın niteliğini keşfetmek olduğunu düşünmemiz yanlıştır. Fizik doğa hakkında söyleyebileceklerimizle ilgilidir."[15]

Bohr'un görüşü hiçbir biçimde kuantum hallerinin olmadığını iddia ederek epistemik tarafın realist olmayan görüşlerinin de ötesine geçer – aslına bakarsanız, "bir kuantum dünyası yok" ifadesi görünüşe göre elektron, foton, atom ve moleküllerin ve hallerinin hiçbir biçimde var olmadıklarını ima eder. Eğer Bohr'un kastettiği gerçekten buysa (ve Bohr fiziğin temelleriyle ilgili yorumlarında titiz olmasıyla ünlüdür) o zaman sanırım günümüzde çoğu fizikçinin onunla aynı fikirde olmadığını söylemek yerinde olur. Her halükârda, Pusey'in kanıtı hepsini olmasa da bazı realist olmayan yorumları bertaraf eder.

Pusey'in kanıtının detaylarının anlaşılması güç ve teknik olsalar da sonuç basittir: Pusey farklı "bilgi hallerine" sahip iki gözlemci özgül bir deneysel durumdaki belirli bir kuantum sistemine farklı kuantum halleri atarsa, bu takdirde bu iki halden en azından birinin yanlış (kuantum fiziğinin öngörüleriyle çelişen anlamında) fiziksel öngörülere yol açması gerektiğini gösterir. Dolayısıyla her kuantum sistemi, her zaman sistem üzerinde uygulanabilecek deneylerle uyuşan, gözlemcinin bilgisinin farklı halleri için farklı olmayan fakat farklı gerçeklik halleri için farklı olan, *eşsiz* bir kuantum haline sahip olmalıdır.

5. Bölüm örneğin çift yarık deneyinde yarıklardan kesinlikle bir şeyin çıktığını öne sürer. Aslında bu "bir şey" ortada sadece tek bir kuantum olduğunda bile iki yarıktan da çıkmalıdır, çünkü görüntüleme ekranında kendisiyle girişim yapar (yani ortaya çıkan girişim örüntüsünde karanlık çizgilerden kaçınır). Samuel Johnson'ın tekmelediği taş gibi, bu salt "epistemik" diye savılamayacak, deneysel bir olgudur. Bu tarz ol-

gular tekil kuantumların uzayda yayılan alanlar olduklarına ve kuantum hallerinin de bu alanların gerçek konfigürasyonları olduklarına işaret eder.

Benim görüşüme göre, klasik EM alanların gerçekliğine dair, EM ışımayı ve enerjinin korunumunu esas alan Maxwell ve Einstein'ın argümanları alanların gerçek olduklarını gösterir. Bu gerçeklik sırf alanların kuantize oldukları koşulunu eklemekle değişmez.

Tüm bu detayları gölgede bırakan ana kavram ise Carl Sagan'ın belirttiği gibi, "Olağandışı iddiaların olağandışı kanıtlar gerektirmesidir".[16] En temel teorimizin gerçekliği tanımlamadığı iddiası önceki tüm bilim tarihini hiçe sayar ve herhangi bir tanıma göre olağandışıdır. Çok kuvvetli kanıtlar olmadan realist olmayan görüşü benimsemeye cüret edemeyiz. Bu kitabın amaçlarından biri de bu tarz bir kanıt –kuantum fiziğinin gerçek, nesnel dünyanın tutarlı bir teorisinden başka bir şey olmadığına dair kanıt– olmadığını göstermektir.

Kuantum Halleri Nasıl Değişir

Bir kuantumun hali iki şekilde değişebilir. İkisi de bir elektronun tek bir yarıktan geçtiği deneyi gösteren Şekil 6.3'te örneklenir. Şekil 6.3a-d kaynağın yaydığı yumuşak bir şekilde değişmekte olan bir madde alanının yarığa doğru hareket ettiğini, yarıktan çıktığını ve ekrana doğru ilerlerken iyice yayıldığını gösterir. Görelilik dışı maddi kuantumlar için bu yumuşak gelişme Schrödinger'in denklemiyle tanımlanır. Daha sonra Şekil 6.3e'de farklı bir şey olur. Elektron ekranla etkileşirken ânında atomik boyutlara çöker. Bu öngörülemez değişim bir kuantum sıçramasıdır.

Schrödinger'in denklemi kuantum sıçramaları olmadığı müddetçe göreli olmayan maddi kuantumların hareketleri için geçerlidir. Bu hareket bir göldeki dalgacıkların yumuşak

hareketine benzer. Eğer deneyin başlangıcında elektronun hali Şekil 6.3a'da gösterildiği gibiyse, o takdirde Schrödinger'in denklemi daha sonra halin Şekil 6.3b-d'de gösterildiği gibi olacağına işaret eder. Bu gelişme (a) başlangıç durumunun kesinlikle (b), (c) ve (d) hallerine yol açtığı anlamında deterministiktir.[17]

Şekil 6.3e'de gösterilen, elektronun ekranla etkileşerek gözlemlenebilir bir işaret oluşturduğu çökme yani kuantum sıçraması Schrödinger'in denkleminin tanımladığı yumuşak değişimden oldukça farklıdır. Bu bir kuantum ölçümü –bir kuantumun makroskobik bir değişime neden olduğu bir süreç– yani görüntüleme ekranı üzerinde görünür bir ışıltıdır. Daha önce belirttiğimiz gibi, bu ölçümün mutlaka insanlarla veya insan gözlemleriyle bir ilgisi yoktur. Mikroskobik bir kuantum doğru türde bir katı maddeye çarptığında oluşan bu tarz görülebilir ışıltılar insanların yardımı olmaksızın, evrenin dört bir yanında daima meydana gelir.

Tartışmalı ölçüm sürecini 10. ve 11. bölümlerde açıklığa kavuşturmaya çalışacağım. Süreksiz kuantum sıçramalarının iki zorunlu koşuldan dolayı meydana geldiklerini göreceğiz. İlki, mikroskobik bir kuantumun başka bir kuantum sistemiyle "dolanık" hale gelmesinin gerekmesidir. Schrödinger kuantum dolanıklığının "kuantum mekaniğinin karakteristik bir özelliği" olduğunu söylemiştir. Benim görüşüme göre dolanıklığın tam önemi hâlâ büyük ölçüde keşfedilmemiştir. Dolanıklık kuantum dünyasının en tuhaf ve geniş kapsamlı fenomenlerinden birini gerektirir: Yerbilmezlik (9. Bölüm). 10. Bölüm'de göreceğimiz gibi, dolanıklık, yazı tura atılmış fakat henüz sonucuna bakılmamış duruma benzer şekilde, mikroskobik kuantumun halinin "kesin fakat belirsiz ve tersinir sonuçlar" sergilemelerine yol açar (bu daha sonra aydınlığa kavuşturacağım, önemli bir ifadedir).

İkinci olarak, diğer kuantum sistemi yeterince makroskobik olmalıdır ki, termodinamiğin ikinci yasası içinde meydana gelen süreçler için geçerli olarak dolanık halin tersinmez bir biçimde "eşfazlılığının kaybolmasına" (11. Bölüm'de açıklayacağım başka bir önemli ifade) izin versin ve böylece olası kesin sonuçlarından yalnızca birinin fiilen meydana gelmesini sağlasın.

Bu bölüm geçişlerde yayılan bir fotonun tespitine dayanarak atomlarda izin verilen bir atomik halden diğerine gerçekleşen anlık kuantum sıçramalarına dair deneysel kanıt sunmuştur. Elektron gibi tek bir kuantumun yumuşak, öngörülebilir Schrödinger yayılmasından farklı olarak, kuantum sıçraması bir sistem başka bir sistemle etkileştiğinde meydana gelen, sistemin kuantum halinin kesintili ve belirsiz değişimidir. Eğer sistemlerden biri makroskobik ise ve bu makroskobik sistemin kuantum halinin değişimi gözlemlenebilir bir parlama gibi makroskobik bir etkiyle sonuçlanırsa, etkileşim bir kuantum ölçümü haline gelir. Çökmeyi ve belirli bir sonucun rastgele seçimini içeren tüm ölçüm süreci kuantum fizikçileri için bir ihtilaf konusudur. 10. ve 11. bölümler bu ikileme bir çözüm sunuyor.

8

Süperpozisyonlar ve Makroskobik Kuantumlar

Hiç durgun suda birbirlerinin arasından geçen iki dalga setine dikkat ettiniz mi? Eğer etmediyseniz, iki su damlasını aralarında birkaç santim bırakarak durgun suyla dolu bir küvete bırakın ve izleyin. Bu deney *dalga süperpozisyonunu* gösterir: İki dalga aynı anda aynı su kütlesinde mevcut olabilir ve de birbirlerini bozmadan birbirlerinin içinden geçebilirler. Her bir dalga kümesi suyun olası bir halini temsil eder ve deney ikisinin süperpozisyonunun aynı zamanda suyun olası bir hali olduğunu da gösterir. Daha fazla damla kullanarak dalga setlerinin çeşitli sayılarda süperpozisyonunu görebilirsiniz.

Hemen hemen her dalga çeşidi süperpozisyon sergileyebilir.[1] Alanlardaki dalgalar olan kuantumlar da istisna değildir. Aslında kuantumlar şu süperpozisyon ilkesini sergiler: *Eğer bir kuantum birkaç farklı halin herhangi birinde olabiliyorsa, o zaman aynı anda hepsinde birden olabilir.* Örneğin bir hidrojen atomundaki elektron Şekil 7.3'te gösterilen yedi halden birinde olabileceği için, tek bir elektron bunların herhangi birinin veya hepsinin süperpozisyonunda da olabilir.

Bu basit dalga ilkesi bazı şaşırtıcı olasılıklara yol açar. Süperpozisyon su dalgaları ve diğer klasik dalgalar için doğal

olmasına rağmen, tekil bir kuantumun bir süperpozisyon olarak var olabileceği fikrinde bir tuhaflık vardır. Örneğin tek bir elektron, sola doğru hareket eden bir dalga paketiyle sağa doğru hareket eden bir dalga paketinin (Şekil 7.1a) süperpoze olduğu bir halde olabilir. Bu elektron aynı anda iki zıt yönde birden hareket ederdi! Bu durum su dalgaları için tuhaf olmasa da bir kuantum için tuhaftır, çünkü elektron gibi bir kuantum tekil –ve aslında oldukça birleşik– bir şeydir. Etrafımızdaki tekil şeyler de –kahve fincanım gibi– aynı anda iki yönde birden hareket etmezler. Öte yandan su dalgası bir "şey" olarak değil, suyun bir "şekli" olarak görülür, o yüzden aynı anda iki yönde birden hareket ettiğinde şaşırmayız. Fakat kuantum seviyesinde, kuantum alanlarındaki salt şekiller –dalgalar– şeylere dönüşür ve bu da sürprizlere sebep olur.

Süperpozisyon her kuantum için geçerlidir. Bir su molekülü aynı anda iki yönde birden hareket ederek iki farklı yere ulaşır. Bu günlük yaşamınızda gördüğünüz bir şey değildir. Beysbol toplarını veya masaları aynı anda iki yerde birden görmezsiniz. Peki neden? Bunu bu bölümde irdeleyecek ve 11. Bölüm'de daha detaylı bilgiler vereceğim.

Kuantum süperpozisyonu 1920'lerden bu yana biliniyor. Bu mantıksal olarak Maxwell'in denklemleri ile dalgaları öngören, su ve diğer sıvıların hareket denklemleri gibi diğer denklemlere benzer olan Schrödinger'in denkleminden çıkar. Aslında madde kuantumları ile ışıma kuantumları arasındaki benzerliklerden ötürü (Şekil 5.1 ve 5.4'ü kıyaslayın) Maxwell'in ışıma denklemlerinin süperpozisyona izin vermesi fakat Schrödinger'in madde denkleminin izin vermemesi tuhaf olurdu.

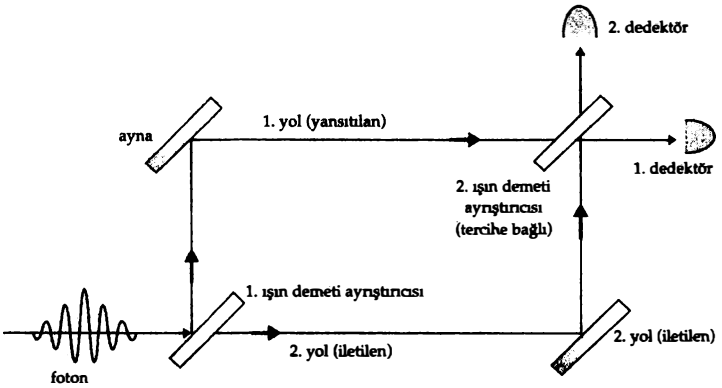
Öte yandan Isaac Newton'un parçacık odaklı fiziği bir süperpozisyon ilkesine uymaz.[2] Süperpozisyon evrensel bir dalga özelliği olduğu ve uzun zamandır kuantum hallerinin

süperpoze olduğu fakat klasik Newton hallerinin süperpoze olmadığı bilindiği için, kuantum fiziğinin kurucularının kuantumların dalga mı yoksa parçacık mı olduğunu çözmeye çalışmaları şaşırtıcıdır. Eğer süperpoze olurlarsa belli ki dalgadırlar.

Kuantum Süperpozisyonu: Aynı Anda İki Yerde Birden Olmak

İlk sayfalardaki vitrin camına dönelim ve interferometreyi yeniden ele alalım (Şekil 8.1). Birinci ışın demeti ayrıştırıcısına her defasında bir foton olmak üzere tek bir foton çarpar. Bu ayrıştırıcı yarı yansıtan, yarı ileten camın basitçe yeniden yerleştirilmiş bir versiyonudur. Eğer ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı yoksa, bu foton, her bir detektör için olasılık %50-%50 olmak üzere ya birinci detektöre ya da ikinci detektöre çarpmayı rastgele "seçer". Asla iki detektörde birden olmamak üzere, her seferinde iki detektörden birinde bir foton olarak tespit edilmesi, ışığın tam fotonlar halinde kuantize olduğunu (demetlendiğini) ve ışın demeti ayrıştırıcısı tarafından parçalara ayrılmadığını doğrular. Bu deneyin istatistiğinin mükemmel rastgeleliği kanıtladığını gördünüz (6. Bölüm). Zilyonlarca fotona genişletilmiş bu süreç, yansıtılan birinci yol vasıtasıyla Alice'in vitrin camında kendi görüntüsünü görmesini sağlarken, iletilen ikinci yol vasıtasıyla mağaza içindeki Bob'un Alice'in görüntüsünü görmesini sağlar. Burada süperpozisyona dair bir kanıt yoktur; en azından şimdilik.

Eğer ikinci bir ışın demeti ayrıştırıcısı yerleştirilirse farklı bir şey meydana gelir. Bu kitabın ilk sayfalarında gördüğümüz gibi iki yol şimdi tekrar birbirine karışır (bu iki ışının asla karşılaşmadığı bir vitrin camında meydana gelmez) ve fotonun hangi yola girdiğinden bağımsız olarak detektörlerden biri tıklayabilir. Artık detektörler fotonun hangi yola gir-



Şekil 8.1 Mach-Zehnder interferometresi

diğine dair veri sağlamazlar. Bu durumda beklenmedik bir şey olur: Birazdan göreceğimiz gibi, *deney fotonun her iki yola da girdiğini gösterir.*

Bu şaşırtıcı bir şeydir. Bunu şuradan biliyoruz. İkinci ışın demeti ayrıştırıcısının yerleştirilmesiyle birlikte, iki yoldan birini biraz uzatmak veya kısaltmak her bir detektöre çarpan göreli foton sayısını değiştirir; ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı mevcut olmadığında böyle bir şey meydana gelmez. Daha detaylı olarak ifade edeyim: Farz edelim ki deney başlangıcında birinci ve ikinci yol boyunca, birinci ışın demeti ayrıştırıcısından ikinciye olan mesafeler tam olarak eşit olsun. Bu takdirde, şaşırtıcı bir şekilde, deney sonucunda *bütün* fotonların birinci detektöre gittikleri ve *hiçbirinin* ikinci detektöre gitmediği görülür.[3] Başka sürprizler de vardır: Eğer yollardan biri fotonun dalga boyunun az bir kısmı kadar uzatılırsa, fotonların bir kısmı ikinci detektöre gider. Örneğin birinci yol (ikinci yolu değiştirmeden) biraz uzatılırsa, çoğu denemede birinci detektör tıklar ve denemelerin kalan az bir kısmında ikinci detektör tıklar. Birinci yol daha da uzatıldıkça birinci

detektöre çarpan foton oranı azalır ve ikinci detektöre çarpan foton oranı artar. Birinci yolun bir dalga boyunun bir çeyreği kadar uzatıldığı noktada ise (fotonların dalga boyu olduğunu hatırlayın) denemelerin %50'sinde her bir detektör tıklar. Şekil 8.2, birinci detektöre çarpan fotonların kesirli sayısının, birinci ve ikinci yol arasındaki uzunluk sıfırdan başlayarak ve bütün bir dalga boyuna (eğer görünür bir fotonsa bu yine de çok kısa bir mesafedir) yükselerek arttıkça değişimini gösterir.

Tahmin edilebileceği gibi deney kuantum rastgeleliğini sergiler: İki yol uzunluğu arasındaki farkın belirli bir düzenlemesinde, kuantum fiziği yalnızca Şekil 8.2'de gösterildiği gibi her bir detektördeki çarpmanın kesirli sayısını belirler, fakat tekil fotonlarla ilgili sonucu belirlemez. Süreç yazı tura atışı gibi rastgeledir ve kuantum fiziği resimde gösterildiği gibi yalnızca olasılıkları belirler.

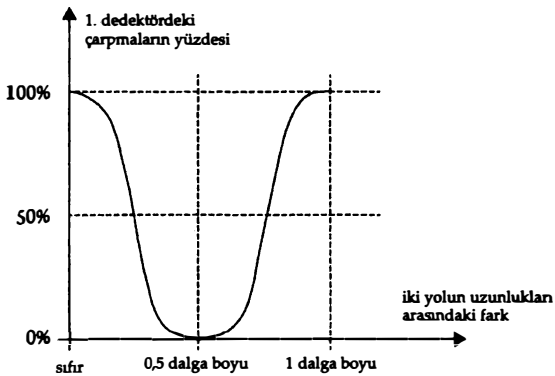
Anlaşılması açısından şunu da vurgulamakta fayda var: Şekil 8.2'deki grafiği deneysel olarak doğrulamak için yol uzunluğu farkının her bir düzenlemesinde çok sayıda (en azından birkaç onlu rakamlar) tekli foton denemesi yapılmalıdır, çünkü resim yalnızca olasılıkları gösterir. Bu tıpkı yazı tura atışı gibidir; olasılıkların gerçekten %50-%50 olduğunu göstermek için parayı birçok kez atmanız gerekir.

Birinci detektörde meydana gelen çarpmaların yüzdesi, sıfır, dalga boyu, iki yolun uzunlukları arasındaki fark

Bunların hepsi de oldukça tuhaftır. Ne kadar tuhaf olduğunu görmek için yol uzunlukları arasındaki farkın sıfır olduğu (böylece bütün fotonlar birinci detektöre çarpar) ve farkın 0,5 dalga boyu olduğu (böylece bütün fotonlar ikinci detektöre çarpar) iki durumu kıyaslayalım. Yol uzunlukları arasındaki farkın sıfırdan 0,5 dalga boyuna çıkması ancak ya *birinci yolu yarım dalga boyu uzatarak ya da ikinci yolu yarım dalga boyu kı-*

saltarak sağlanabilir. Böylece her foton ya birinci yoldaki ya da ikinci yoldaki değişikliklere karşılık verir. Dolayısıyla *her foton iki yol hakkında da veriler içermelidir*. Ne de olsa, fotonlardan herhangi biri iki yoldan yalnızca birini izlerse diğer yol değiştirildiğinde davranışını değiştirmeyecektir. Bu durumun tek makul açıklaması "her bir fotonun iki yoldan da gitmesidir." Her bir foton iki yolda da aynı anda olma süperpozisyonundadır.

Bu tuhaf duruma inanmak zor olabilir, fakat gözümüzde canlandırmak zor değildir. Şekil 8.1'de tasvir edilen fotonu interferometreye girmeden hemen önce, interferometre içinde birinci ve ikinci yol boyunca aynı anda giderken hayal edin; tıpkı iki süperpoze hareket yönüne ayrılan bir su dalgası gibi. Bunlara süperpozisyonun iki *dalı* ve ayrı ayrı da *birinci* ve *ikinci dal* diyeceğim.



Şekil 8.2 Şekil 8.1'de gösterilen, ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı yerleştirilmiş deneydeki kuantum süperpozisyonunun kanıtı. Birinci ve ikinci yol arasındaki çeşitli uzunluk farklılıklarında birinci detektöre çarpan fotonların kesirli sayısı. Bu kesirli sayı birinci detektörde tespit edilecek tek bir fotonun olasılığıdır. Aşağıda göreceğimiz gibi, bu grafik her bir fotonun iki yolda da giderek kendisiyle detektörlerde kesişim yaptığını gösterir.

Süperpozisyonu anlamak için kuantumları alanlardaki dalgalar olarak gözünüzde canlandırmalısınız. Kuantumların yaygın bir şekilde minik bilardo topları gibi ufak şeyler olarak betimlenmeleri süperpozisyonun kapsamlı deneysel kanıtlarıyla çelişir. Eğer bir kuantum bilardo topu gibi ise aynı anda iki dalda birden yol alamaz. Aslına bakarsanız, tek bir kuantumun aynı anda iki yerde birden olabileceği fikri, Einstein'ın 1927'de kuantum teorisine belki de tarihe geçmiş ilk itirazına neden oldu.[4] Eğer süperpoze bir kuantum iki dalından birinde bilfiil *tespit edilirse, diğer* daldan ânında kaybolmalıdır ki, bu dal kilometrelerce uzakta olabilir. Einstein bunun görelilik teorisinin belirli bir mesafedeki anlık eylemi yasaklamasını ihlal ettiğini ileri sürdü. Gelgelelim daha sonra (9. ve 10. bölümler) göreceksiniz ki, kuantum süperpozisyonu aslında görelilik teorisini ihlal etmez, çünkü görelilik ancak ışık hızından daha fazla olan hızlarda enerji veya bilgi iletimini yasaklar ve bir daldan kaybolan bir kuantumun aynı anda diğer dalda tespit edilmesi böyle bir iletim gerektirmez.

Kuantumun dalga olduğu kavramını kabul ettiğinizde interferometre deneyinin açıklaması basitleşir. Her bir kuantum yayılarak iki yoldan da gider, tıpkı bir su dalgasının aynı anda iki yönde de gidebilmesi gibi. Bu resme dayanarak Şekil 8.2'nin deneysel sonucunun açıklaması şöyledir: İki yol ikinci ışın demeti ayrıştırıcısında birbirlerine karıştıklarında girişim yaparlar, tıpkı su dalgalarının birbirleri içinden geçerken girişim yaptıkları gibi (Şekil 2.1). Yol uzunlukları farkı sıfır olduğunda iki dalganın yapıcı olarak birinci detektörde ve yıkıcı olarak ikinci detektörde girişim yaptıkları ve yol uzunlukları farkı 0,5 dalga boyu olduğunda yıkıcı olarak birinci detektörde ve yapıcı olarak ikinci detektörde girişim yaptıkları görü-

lür. Aradaki düzenlemelerde kısmi girişim elde ederiz. İnterferometrede her seferinde yalnızca bir foton olduğu için, *her bir foton yalnızca kendisiyle girişim yapar*. Fotonu küçük bir parçacık olarak düşünürseniz bu kafa karıştırıcı bir şeydir. Fakat dalga olarak düşünürseniz bir anlam ifade eder.

İkinci ışın demeti ayrıştırıcısı mevcut olduğunda, bu deney yarıklarda detektörün olmadığı çift yarık deneyine çok benzer. İki durumda da her bir kuantum her iki interferometre yolu boyunca iki detektöre veya her iki yarıktan da geçerek ekrandaki belirli bir noktaya gider (daha doğrusu bir alan olarak "yayılır"). İki durumda da bu süperpozisyonun iki dalının girişimini gözlemleriz; zirve zirveyle ve çukur çukurla karşılaştığında yapıcı ve zirve çukurla karşılaştığında yıkıcı girişim meydana gelir.

Kuantumları bir kum tanesiymiş, ama yalnızca daha küçüğüymüş gibi ufak fakat sıradan cisimler olarak düşünme eğilimi, kuantum bir atom veya başka bir birleşik maddi cisim olduğunda daha da fazladır. Ancak atomlar da dalgadır ve süperpoze olabilirler; ileride göreceğimiz gibi, büyük moleküller birçok atomdan oluşabilir.

Tüm bunlar ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı *mevcut olmadığında* neler olacağına dair yeni bir perspektif sağlar. Ne de olsa tek bir kuantum birinci ışın demeti ayrıştırıcısına ulaştığında, kuantumun ikinci ışın demeti ayrıştırıcısının mevcut olup olmadığına dair herhangi bir ön bilgiye nasıl sahip olabildiğini anlamak zordur, çünkü kuantum henüz o konuma ulaşmamıştır. İkinci ışın demeti ayrıştırıcısının mevcut olup olmamasından bağımsız olarak, kuantumun her iki yol boyunca da yayıldığı sonucuna varmak mantıklı olur.

Aslına bakarsanız, teori kuantize EM alanın (fotonlar durumunda) veya kuantize madde alanının (elektron, atom vb. durumunda) birinci ışın demeti ayrıştırıcısında bir süperpo-

zisyon olarak her iki yoldan da gittiğini öngörür. Bu da ikinci ışın demeti ayrıştırıcısı olmadığında kuantumun her iki yoldan da gittiğini, her iki detektöre de ulaştığını ve *daha sonra* her iki detektör yerine sadece biriyle etkileştiğinde çöktüğünü gösterir. Aslında atomlardaki enerji seviyeleri arasındaki sıçramalar gibi bütün kuantum sıçramalarının yalnızca makroskobik olarak test edildiklerinde meydana geldikleri hipotezi için doğrudan teorik destek vardır ve bu hipotezi doğrudan ve deneysel olarak test etmek için öneriler mevcuttur.[5]

Alice'in camdaki yansımasına dönersek, dışarıda Alice tarafından tespit edilen, yansıtılan her fotonun ve içeride Bob tarafından tespit edilen, iletilen her fotonun *bir süperpozisyon olarak her iki yoldan da gittiği* ve ancak Alice ve Bob'a ulaştığında tek bir konuma çöktüğü sonucu çıkar. İşte size gelecek sefer bir vitrinin önünden geçerken kafa yorabileceğiniz bir şey.

Büyük kuantum meselelerinin çoğunun bu günlük örnekle alakalı olmaları şaşırtıcı olsa da doğrudur. Bunların hepsi de kuantum fiziğinin, tuhaflığının çoğu dahil olmak üzere, dört bir yanımızda olduğunun kanıtıdır.

Makroskobik Kuantum Fenomenleri

1920'lerde Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born ve diğer bilim insanları tuhaf, yeni kuantum teorisinin ilk yaygın olarak kabul gören görüşünü oluşturdular.[6] Bu görüş daha sonra Bohr'un Kopenhag'daki enstitüsünün onuruna *Kopenhag yorumu* olarak tanındı. Gelgelelim Bohr ve meslektaşları bunu bir "yorum" olarak değil de sadece kuantum fiziği olarak görüyorlardı.[7] Aşikâr paradoksların diğer görüşlerin filizlenmelerine yol açtığı 1950'lere dek (10. Bölüm) Kopenhag kabul edilebilir tek kuantum yorumu varsayıldı. Kilit bir özelliği, Bohr'un, kuantum gözlemleri için daima klasik bir aygıt gerektiği, çünkü insanların sonucu makroskobik bir ay-

gıtta doğrudan gözlemleyebilmeleri gerektiği konusundaki ısrarıydı. Böyle bir yorum (ben dahil birçok fizikçinin görüşüne göre) uygunsuz bir şekilde insanları teorinin temellerine dahil etti. Bohr kuantum âleminin mikroskobik olduğunu ve dolayısıyla insanlar için sadece dolaylı olarak erişilebilir olduğunu düşünüyordu; onun düşüncesine göre bu kuantum âlemi klasik fiziğin geçerli olduğu, erişilebilir makroskobik âlemden ayrıydı. Bohr aslında bir kuantum-klasik ikilemi olduğunu ve kuantum kurallarının klasik âlemde geçerli olmadığını beyan etti.[8]

Ancak büyük şeyler küçük şeylerden oluştuğu için, kuantum fiziğinin etrafımızda gördüğümüz sıradan dünyayı tek başına açıklayabilmesini bekleyebiliriz (11. Bölüm). Fiziksel evrenin temelde kuantum olduğu, fizikçiler arasında benim de katıldığım, yaygın fakat evrensel olmayan bir görüştür. Eğer öyleyse, toz zerresinden yıldızlara dek etrafınızda gördüğünüz her şey makroskobik bir kuantum fenomenidir. Kuşkusuz, bilinen birçok kimyasal, biyolojik ve nükleer fenomenin bir kuantum kökeni vardır. Işık ile madde arasındaki etkileşimler; katı, sıvı ve gazlar arasındaki farklılıklar ve katı maddelerin istikrarlı yapısının tamamı kuantum fiziğine çıkar. Bu da bariz kuantum özellikleri sergileyen makroskobik fenomenleri keşfetmeyi umabileceğimiz anlamına gelir. Sonraki paragrafta ve izleyen iki bölümde bu tarz üç fenomenin öykülerini anlatacağım.

Eğer 4. Bölüm'deki önerime uyup da başparmağınız ile işaretparmağınızı dar bir yarık, iyi aydınlatılmış bir yüzeyi ışık kaynağı ve retinanızı da ekran olarak kullanarak tek yarıklı bir deney yaptıysanız, temel bir kuantum ilkesinden doğan makroskobik bir fenomeni, yani her bir fotonun dalga doğasını doğrudan gözlemlemişsiniz demektir. Bildiğiniz gibi, parmaklarınıza paralel olan dar girişim çizgileri, her

biri diğerinden bağımsız hareket eden ve yalnızca kendisiyle girişim yapan zilyonlarca fotondan oluşur. Girişim çizgileri kümesi her bir tekil fotonun kuantum halini yansıtır; bu her bir fotonun retinanızla etkileşmeden hemen önceki kuantum halinin bir tasviridir. Yarık ile yarığın retinanız üzerindeki görüntüsü aşağı yukarı bir milimetre genişliğindedir ve kesinlikle makroskobiktir. Deney milimetre genişliğindeki fotonları kanıtlar.

Lazerler

"Uyarılmış Işımanın Yayımı ile Işığın Güçlendirilmesi" (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) makroskobik kuantum fenomenleri için ikinci örneğimizdir. Lazerler (gerçekten önemli bir kısaltma olduğunu söyleyebilirsiniz, çünkü bu kelime günümüzde küçük harflerle yazılır) uzun ömürlü veya yarı kararlı ve uyarılmış halde atomlar içeren bir "lazer materyalinden" yapılır. Bir dış enerji kaynağı bu tarz atomların büyük bir kısmını bu hale uyarır. 1917'de Einstein uyarılmış bir enerji halindeki herhangi bir atomu yaydığı ışımaya uyan bir dalga boyundaki ışımaya tutarak enerjisini hızla yayacak şekilde uyarabileceğini öngördü. 1960'ta icat edilen lazerler bu ilkeden yararlandı. Dış enerji kaynağı lazer materyalinin uyarılmış yarı kararlı atomlarının sayısını, uyarılmış haldeki atomların sayısının uyarılmamış haldeki atomların sayısından daha fazla olduğu bir noktaya kadar çıkardığında, (buna *popülasyonun tersine dönmesi* denir) biriken yarı kararlı atomlar absorbe ettiklerinden daha fazla foton yaymaya başlar. Daha sonra hızla bir tür zincir reaksiyon meydana gelir. Yayılan fotonlar başka yarı kararlı atomları uyararak ışımalarını sağlar, onların fotonları da daha fazla atom uyarır ve lazerin tümü kısa sürede fotonlarla dolar. Fotonların hepsi özdeş atomik geçişlerden doğar. Alışılageldik şekliyle

lazer, bir ucunda tam olarak yansıtıcı bir ayna, diğer ucunda da kısmen ileten bir ayna bulunan, lazer materyaliyle dolu bir tüptür. Tüpün eksenine paralel hareket eden fotonlar birçok kez ileri geri yansır ve kısmen ileten uçtan kaçmadan önce diğer atomları uyararak ışımalarını sağlarlar. Kuantum fiziği *uyarılmış yayılımın, uyarılmış fotona her yönden özdeş, özdeş dalga boylarına, hareket yönlerine ve fazlara sahip fotonlar yaratacağını* öngörür. Özdeş fazlar fotonların zirve ve çukurlarının birbirleriyle uyum içerisinde oldukları, böylece yıkıcı olarak girişim yapmak yerine birbirlerini yapıcı olarak güçlendirdikleri anlamına gelir. Zilyonlarca özdeş fotonun (Şekil 7.1) hepsinin aynı yönde, tepe ve çukurları tamamen hizalı halde hareket ettiklerini düşünün.

Dolayısıyla lazer aracıyla yayılan zilyonlarca foton, makroskobik etkileri olan büyük bir dalga –tek bir dev foton gibi olan büyük bir kuantum hali– oluşturacak şekilde birlikte hareket eder. Fotonlar disiplinli bir ordu gibi uyum içerisinde hareket ederek tek bir fotonun etkilerine benzer fakat çok daha enerjik ve dolayısıyla gözlemlenebilir makroskobik etkiler yaratırlar. Normal bir elektrik feneri hızla yayılan farklı kuantum halleri içeren bir foton ışını yaratır ve mesafeyle birlikte ışının da yoğunluğu azalır. Bir lazerin fotonları tek bir kuantum halini paylaşır ve dolayısıyla büyük mesafelerde darlığını korur ki, bu en yararlı özelliklerinden biridir.[9]

Süperiletkenlik

Makroskobik kuantuma dair üçüncü öykümüz süperiletkenliktir. 5. Bölüm'de süperiletkenliğin düşük sıcaklıktaki bir metal yeni bir kuantum alanı türüne geçiş yaptığında meydana geldiğini öğrendik. Elektronlar bu alanda çiftler halini alırlar, bu çiftler EM kuvvetlere maruz kalmadan metal içinde serbestçe hareket edebilirler. Çiftlerin hiçbir elektrik direncine

maruz kalmamaları elektrik akımlarının bataryalar olmadan yıllarca sürmelerini sağlar; bu süperiletken elektromıknatıslar gibi uygulamalar için güçlü bir özelliktir. Gerçekte hiçbir şeyin sonsuza dek sürmediğini varsaysam da, kalıcı bir akımın ömrüne dair teorik tahminler evrenin 14 milyar yıllık yaşını aşabilir.[10] Bu yüksek derecede kuantum fenomeni nasıl işler?

Sıradan elektrik akımlarının metallerde ortaya çıkma nedeni atom başına bir iki elektronun metalin içinde serbestçe sürüklenebilmeleri, böylece küçük EM alanların (harici olarak bataryaların oluşturdukları) bu "iletim elektronlarını" etraftaki atom "örgüsü" (yani düzenli yapı) içinde kolayca akmaya zorlamalarıdır. Bunlar aktıkça, negatif yüklü elektronlar örgüyle elektriksel olarak etkileşerek enerjiyi elektronlardan örgünün doğal ısı titreşimlerine aktarır. Böylece metal ısınırken akımı sürdürecek bir batarya olmadığı müddetçe akım kesilir; bu fenomene *elektrik direnci* denir.

Atom örgüsü süperiletkenlikte hayati bir rol oynar. Atomlar arasında gerili minik yaylar gibi işlev gören atomlar arası kuvvetler örgüyü bir arada tutarak örgünün metal içinde ısı enerjisini ve sesi taşıyan mekanik titreşim dalgalarını desteklemesini sağlar. Örgüyü oluşturan atomların kuantum kurallarına uymaları gerektiğinden bu örgü titreşimleri kuantizedir. Bu kuantumlama *fonon* adı verilen kuantize titreşim enerjisi demetleriyle sonuçlanır. Fononlar örgü içinde hareket ederek elektronlarla etkileşirler. Dolayısıyla bir metaldeki elektronlar sadece kuantize EM alan titreşimlerinin fotonlarıyla değil, *kuantize örgü titreşimlerinin fononlarıyla da etkileşirler.*

Yeterince düşük sıcaklıklarda elektron-fonon etkileşimleri beklenmedik bir hal alır. Bu sıcaklıklarda elektron çiftlerinin toplam enerjilerinin, *tekil* atomların enerjilerinden daha düşük olduğu görülür. Doğa daima en düşük elverişli enerji haline "düşmeyi" tercih ettiği için (bayır aşağı kayan kayaları

düşünün) bu durumda elektronlar çiftler halinde bağlanır. Bu çiftler birleşik kuantumlardır; nasıl bir atom daha küçük kuantumların bileşimiyse, bunlar da öyle iki elektronun bileşimleridir. Tıpkı bir atomun bileşen kuantumlarından çok farklı özelliklere sahip olması gibi, *bu bileşik çiftler de çift olmayan elektronlardan esasen farklı özelliklere sahiptir*. Çift elektronlar arasındaki mesafe 100 nanometredir ki, bu şaşırtıcı derecede büyük bir rakamdır ve atomlar arasındaki mesafeden 500 kat daha büyüktür. Böylece çiftlerin kuantum halleri muazzam derecede örtüşür ve sıvı benzeri tek bir makroskobik hal oluşturur.[11]

Yeni özellikler en iyi, *bozon* ve *fermiyon* terimleriyle tanımlanır.[12] Bütün kuantumlar bu iki geniş ve tamamıyla farklı kategoride gruplanabilir. Aralarındaki ana fark, bozonların tek bir kuantum hali içinde toplanmayı tercih ederken, fermiyonların izole yalnızlığı tercih etmeleridir. Örneğin fotonlar bozondur ve işte bu sayede lazer yapılabilmiştir. Ancak *tekil* elektronlar fermiyondur, dolayısıyla bir lazerin fotonlarının ortak çalıştığı şekilde ortak çalışamazlar. Bu durum sıcaklık elektronların çift oluşturabileceği kadar düşük olduğunda tamamen değişir, çünkü *her bir elektron çifti bir bozondur*. Dolayısıyla bir metalin fiziği süperiletkenlik geçiş sıcaklığının altında tamamıyla değişir.

Bir metaldeki çift halinde olmayan bir iletim elektronunun yararlanabileceği sürekli bir enerji aralığına sahip olması, daha önce tanımlandığı gibi, örgüyle kolayca enerji değiş tokuşu yapmasını sağlayarak elektrik direncini oluşturur ve örgüyü ısıtır. Ancak iki elektron bağlandığında çiftin oldukça farklı bir enerji yapısı olur. Bir hidrojen atomundaki elektronun taban haline düşmesine benzer şekilde, çift en düşük enerjiye sahip bir kuantum taban haline düşer. Şekil 7.4'teki (a) haline benzer olan bu hal bir enerji aralığıyla daha yüksek

enerji hallerinden ayrılır. Ne var ki, 7.4'ün aksine bu aralık oldukça küçüktür. Üstelik bu aralığın yukarısındaki enerji halleri çift halindeki haller değil, normal iletken elektron halleridir. Dolayısıyla bu en düşük enerji hali hassastır. Eğer çifti belirli bir minimum enerjiden daha fazlasıyla uyarırsanız elektron çifti normal bir iletken hale "yükselir" ki, bu halde elektronlar örgüye hızla enerji verirler. Öte yandan çiftli hal çevreleyen örgüye enerji vermeye karşı son derece dayanıklıdır, çünkü (taban halindeki bir atom gibi) daha düşük bir enerji seviyesine inemez.

Metalin sıcaklığı geçiş sıcaklığının altına düştüğünde eşleşmiş elektronların yeni edindikleri bozon statüsü elektronların aynı kuantum haline düşmelerini sağlar; *bütün iletken elektronlar çift oluşturur ve aynı taban haline düşerler*. Bu çiftler örgüye enerji veremez, çünkü zaten taban hallerindedirler ve sıcaklık, rastgele ısı dalgalanmalarının onları normal iletken halden ayıran küçük enerji aralığını aşamayacakları kadar düşük kaldığı müddetçe örgüden enerji kazanamazlar. Dolayısıyla eşleşmiş elektronlar örgüyle hiçbir biçimde etkileşemez ve metal içinde sıfır dirençle hareket ederler.

Özet: Nasıl elektron madde alanı, kuantumları tekil elektronlar olan bir fermiyon alanı ise, süperiletken elektronlar da kuantumları elektron çiftleri olan bir bozon alanıdır. Düşük sıcaklıklarda bu çiftler enerji yönünden örgüden izole olur ve sıfır dirence maruz kalır. İşte süperiletkenlik böyle işler.

Süperiletkenlik oldukça özeldir. Bir lazer ışınındaki fotonlar gibi, her çift tam olarak aynı hareket ve enerjiyle tam olarak aynı kuantum haline kilitlenir. Her bir çiftin madde alanı geniş bir biçimde binlerce atoma yayılır; öyle ki, tüm çiftlerin toplam alanı, süperiletkenin tümünü tek bir makroskobik kuantum haliyle kaplayan tek bir makroskobik sıvı halini alır. Bu lazer ışığı gibidir; küçük dalgalar (tekil kuantumlar) bir

araya gelerek büyük bir dalga oluştururlar. Süperakımlar makroskobik olsalar da son derece kuantumdur, genellikle kilometrelerce uzunluktaki elektrik telinde hareket eden zilyonlarca çiftten oluşurlar.

Şaşırtıcı bir biçimde, kuantum cisimler mikroskobik boyutlarla sınırlı değildir.

Makroskobik Süperpozisyonlar

Günümüzde makroskobik kuantum fenomenlerini bulmak zor olmamakla birlikte, makroskobik kuantum *süperpozisyonunu* kanıtlamak zordur. Lazer ve süperakımlar makroskobik olsalar da süperpozisyon değildirler. Ne lazerin tekil fotonları ne de süperiletkenin tekil elektron çiftleri aynı anda makroskobik olarak ayırt edilebilir iki kuantum halinde değildir. Lazer ve süperakımların makroskobik doğaları mutlak özdeş hallerde çok sayıda kuantuma sahip olmalarından kaynaklanır.

Büyük ölçekli süperpozisyonlar oluşturma problemi önemlidir. Bunun pratik bir nedeni vardır: Gelecekteki kuantum bilgisayarların mutlaka, bir atomdan çok daha büyük mesafelere uzanan ve kendileri süperpozisyon hallerinde olacak, *kübit* adı verilen bilgisayar öğeleri gerektirecek karmaşık süperpozisyonlar içerecek olmaları. Günümüzdeki bilgisayarlar 0 ve 1 ("kapalı" ve "açık" olabilir) adı verilen iki hal içeren küçük elektrik akımları gibi "klasik bitler" kullanır. Her bir bit hallerden *ya* birinde *ya da* diğerindedir. Kuantum bilgisayarların *hem* 0 *hem de* 1 kuantum süperpozisyonlarında olabilen kübitler kullanacak olmaları bunlara belirli uygulamalar için olağanüstü hesaplama gücü kazandıracaktır.

Makroskobik süperpozisyon teorik olarak da önemlidir, çünkü bu ünlü kuantum ölçüm problemiyle ilgilidir. Bu probleme göre bir kuantum ölçümü Schrödinger'in kedisi

gibi makroskobik bir cismi canlı ve ölü gibi paradoksal olarak farklı haller süperpozisyonuna yerleştirebilir. 10. Bölüm bu muammayı tanımlıyor ve bir çözüm öneriyor.

Makroskobik süperpozisyonları kanıtlamanın üçüncü bir nedeni de hiçbir şekilde klasik olmayan çıkarımlarının, Bohr'un mikroskobik kuantum dünya ile makroskobik klasik dünya arasında önemli bir ayrım olduğu görüşüne karşı olmalarıdır. Günümüzde Bohr'un yanıldığına dair çok sayıda delil vardır. Bunu kesin biçimde çözmek kuantum temellerini açıklığa kavuşturmada yararlı olur.

Bu bölümün geri kalanında deneysel olarak başarılmış yaklaşık makroskobik süperpozisyonlara dair kayda değer dört öykü yer alıyor.

Aynı Anda İki Yönde Birden Sallanmak

2012 Fizik Nobel Ödülü, kuantum süperpozisyonuyla ilgili, biri David Wineland'in, diğeri de Serge Haroche'nin liderliğinde yapılan iki deneye verildi. İki deney de tekil kuantumların çapraşık manipülasyonunu kanıtlar. Burada tanımlanan Wineland'in deneyi elektrik yüklü atomları *–iyonları–* yakalayarak fotonlarla gözlemler ve kontrol eder. 11. Bölüm'de tanımlanan Haroche'nin deneyi ise zıt yaklaşımı benimser, yakalanan fotonları tuzağa atomları göndererek gözlemler ve kontrol eder. İki deney de ışık ve madde arasındaki temel etkileşimleri içerir ve kuantum ilkelerine dayalı süper hızlı bir bilgisayar yapmaya yönelik adımları gösterir. Ayrıca çalışmaları zamanın doğru olarak ölçülmesinde 100 kat iyileşme de sağlamıştır.[13]

Wineland'in, "bir atomun 'Schrödinger'in kedisi' süperpozisyonu"[14] adını verdiği deneyi bir berilyum iyonunu kullanır. Bu iyonun çekirdeğinde dört proton ile beş nötron ve çekirdeğin yörüngesinde üç elektron vardır ve elektronları

7. Bölüm'de ele alınan hidrojen atomundaki elektronun hallerine benzer hallerde bulunur. Bu iyonun net elektrik yükü iyonun EM alanlar tarafından kolayca manipüle edilmesini sağlar. İyon, manipüle etmek için lazerler ve zapt etmek için mıknatıslar kullanarak küçük bir bölge içine kıstırılabilir. Tuzak iyonun ileri geri titreşmesini (yani salınmasını) sağlamak için tasarlanmıştır. Bu hali sonraki paragrafta tanımlayacak ve daha sonra Wineland'in nasıl iyonun iki halin büyüleyici bir süperpozisyonuna girmesini sağladığını açıklayacağım.

İyon birleşik bir nesne olduğu için iyonun kuantum halinin iki ayrı yönü vardır. İlk olarak, *iyonun merkezi* tuzak içinde 80 nanometre uzunluğundaki bir yolda ileri geri salınır. İyonun merkezinin kuantum hali Şekil 7.1'de gösterilene benzer bir dalga paketidir ve yaklaşık 7 nanometre uzunluğundadır. Böylece iyonun merkezi 80 nanometrelik bir yolda ileri geri salınan, 7 nanometre uzunluğunda bir madde alanı oluşturur. İkinci olarak, *iyonun içindeki üç elektronun her birinin kendi "elektronik halleri" vardır*, bu hallerin her biri de bir hidrojen atomunun tekli-elektron hallerine benzerdir (Şekil 7.3). İyonun elektronik hali genel dalga paketinden çok daha küçüktür, yaklaşık 0,1 nanometre genişliğindedir (bir atomun tipik bir boyutu). Bunu başka bir şekilde ifade edecek olursak, elektronların, iyonun merkezine göre belirsizlikleri 0,1 nanometre olduğu halde, merkezin kendisinin belirsizliği 7 nanometredir ve bütün sistem 80 nanometrelik bir yol boyunca bir yandan öbür yana salınır.

Tıpkı hidrojen atomundaki bir elektronun bir dizi kuantize enerji seviyesinin olması gibi, iyonun hem salınım halinin hem de elektronik halinin de bir dizi kuantize enerji seviyesi vardır. Wineland lazerler kullanarak iyonu en düşük enerji salınımlarına ve elektronik taban haline geçecek şekilde yavaşlattı.

Wineland daha sonra karmaşık bir dört adım yürüttü. Bunların her biri iyonu kısa bir süre aydınlatan, zamanlaması ve ayarı tam olarak belirli bir göreve düzenlenmiş bir lazerden belirli bir kısa atım içeriyordu. Birinci adımda iyonun elektronik hali, bir dalın diğerinden daha yüksek bir elektronik enerji içerdiği, iki dalın bir süperpozisyonuna ayrılır. İkinci adım sadece daha yüksek enerji dalını etkileyen bir frekans içeren bir lazer atımı kullanır. Bu atım *yalnızca bu dala* salınım enerjisi sağlayarak dalın 80 nanometrelik yolun tamamı boyunca ileri geri titreşmesini sağlar. Üçüncü adımda tek bir lazer atımı iki süperpoze daldan enerjik olarak salınan dalı daha düşük enerjili bir elektronik hale ve minimal olarak salınan hali daha yüksek enerjili elektronik hale getirir. Dördüncü adımda, ikinci adımdaki atıma benzer bir atım minimal olarak salınan hali, diğer enerjik olarak salınan halle "faz dışı olan" enerjik salınımlara uyarır. Daha sonra düşük enerjili dal "ileri geri" sallanırken yüksek enerjili dal 80 nanometrelik yol boyunca "geri ileri" sallanır. İki süperpoze dal merkez boyunca geri salınırken birbirleri içinden geçerler (su dalgaları veya hayaletler gibi). Bu sanki babamın arka bahçemdeki salıncakta düşük enerjili bir Hobby'yi (ilkokuldaki takma adım) ileri geri iterken, aynı anda yüksek enerjili bir Hobby'yi de geri ileri itmesine benzer!

Wineland deneyin gerçekten de aynı anda iki zıt hareketi yürüten tek bir cismin süperpozisyonunu başardığını göstermek için daha sonra süperpozisyonun iki dalını bir araya getirdi ve tam da beklenen şekilde kesiştiklerini gösterdi; bu çift yarık deneyinde kendisiyle kesişen (girişim yapan) tek bir fotona veya elektrona benzerdir.

80 nanometre mesafedeki bu süperpoze hareket makroskobik olmaktan çok uzaktır, fakat bir atomdan bin kat büyüktür. Bu tür mesafeler genellikle *mezoskobik* olarak tanımlanır.

Bir Süperpoze SQUID

Daha önce süperiletkenliğin kesinlikle makroskobik bir kuantum fenomeni olabileceğini gördük, fakat bir sonraki öykümüzde anlatılan süperiletken süperpozisyonların uygun bir biçimde makroskobik olarak tanımlanıp tanımlanamayacakları kararını size bırakıyorum.

Süperiletken kuantum girişim cihazı (SQUID) süperiletken metalden yapılma (bir deneyde 0,14 milimetre çapında, yani insan saçı kalınlığında) ufak bir halkadan ibarettir. Böyle bir halka içinde milyarlarca elektron çiftinden oluşan süperiletken akımlar sirkülasyon yapar. Tüm bu çiftler ortak bir kuantum halindedir. Bu kuantum halinin dalga boyunun halkanın tümünün etrafına duran bir dalga oluşturacak şekilde tam olarak "uyması" halkanın çevresi etrafında bir, iki veya üç vb. tam dalga boyu olduğuna işaret eder. Her bir olasılık ayrı bir süperakım kuantum halini –güzel bir kuantumlama örneği– temsil eder. Bir süperakım böyle bir halkada oluştuğunda kuantum halini değiştirmek son derece zordur, çünkü dalga boyunu az bir miktar artırıp veya azaltıp da sonuçta uyan bir dalgaya sahip olmak mümkün değildir.

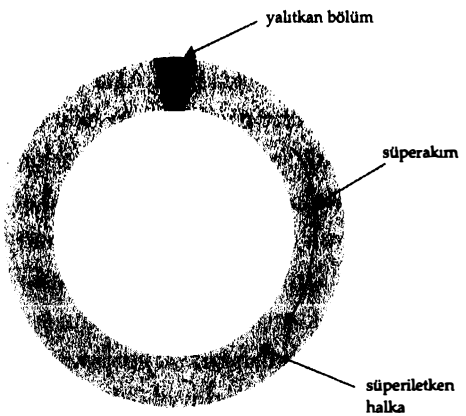
Ancak bu süperiletken halka henüz bir SQUID değildir. SQUID yapmak için halkanın küçük bir bölümünün yerine yalıtkan bir bölüm konur (Şekil 8.3). Alfa tünellemeye benzer bir süreç (6. Bölüm) elektron çiftlerinin böyle bir bariyerden tünel açmalarına olanak sağlar, böylece süperakım iletken olmayan bariyere rağmen devam edebilir. Fakat artık bariyer varken ve harici olarak oluşturulmuş bir manyetik alandan destek görürken hali, örneğin halkayı kuşatan beş dalgadan iki dalgaya değiştirmek mümkündür. Daha sonra halkayı bu tarz iki veya daha fazla halin bir süperpozisyonuna yerleştirerek farklı haller arasında girişim olasılığı sağlanabilir. Şimdi elimizde girişim etkilerine sahip bir SQUID'imiz var. Bu man-

yetik rezonans görüntüleme ve petrol arama için manyetik ölçümler yapmada kullanılabilir.

Aslında iki süperpoze öğenin biri saat yönünde, diğeri de saatin tersi yönünde olmak üzere, halkanın etrafında farklı yönlerde döndükleri, böyle bir süperpozisyon oluşturmak mümkündür. İki bağımsız araştırma grubu bunu 2000 yılında başardı.[15] Bu kayda değer bir ustalık gerektirir: İçinden bir milyar elektron çiftinden oluşan bir süperakım geçen tek bir kuantum halindeki bir halka etrafında, zıt yönlerde, aynı anda döner. Bu SQUID'lerin akımları ve milimetreden küçük boyutları makroskobik standartlara göre çok küçük fakat atomik standartlara göre muazzamdır.

Büyük Süperpoze Moleküller

Şimdi süperpoze mezoskobik moleküllerin bir öyküsünü anlatacağım. Viyana Üniversitesi'nden Anton Zeilinger'in liderliğindeki bir grup bilim insanı çift yarık girişim deneyini 1999'da C_{60} molekülleriyle ve 2002'de C_{70} molekülleriyle yapmayı başardı.[16] Her çift yarık deneyi süperpozisyonu kanıtlar, çünkü bir girişim örüntüsü oluşturmak için her bir kuantum



Şekil 8.3 Bir süperiletken kuantum girişim cihazının şematik diyagramı.

iki yarıktan da geçerek kendisiyle girişim yapmalı, böylelikle kuantum iki yarıktan da çıkma süperpozisyonunda olmalıdır.

C_{60} ve C_{70} moleküllerine genellikle *bucky küresi* denir, çünkü bunlar Buckminster Fuller'ın mimarisini hatırlatan karbon atomu yapılarından oluşan, futbol toplarına benzer, yarı küresel kabuklardır. 2002 yılındaki deneydeki her bir C_{70} molekülü binden fazla proton, nötron ve elektron içeren, oldukça büyük bir moleküldür. Hatırlarsanız, böyle büyük cisimlerin dalga boyları küçük cisimlere göre daha kısadır. C_{70} molekülünün dalga boyu sadece 1 pikometredir (metrenin trilyonda biri)[17]; bu ebat normal bir atomun boyutundan 100 kat daha küçüktür.

Bu kadar küçük bir dalga boyu bir problem teşkil eder, çünkü standart çift yarık deneyi yarıkların genişliğinin ve aralarındaki mesafenin araştırılan dalga boylarından çok büyük olmamalarını gerektirir. C_{70} moleküllerinin girişimini kanıtlamak için gerekli küçük yarıkları yapmak neredeyse olanaksız olurdu. Bu nedenle Zeilinger'in grubu Talbot-Lau etkisi[18] adı verilen, anlaşılması güç bir girişim fenomenine dayalı, dolaylı bir yöntem kullanarak yaklaşık 1 mikrometre (metrenin milyonda biri) genişliğinde yarıklar –daha pratik bir yarık boyutu– kullanan bir deney yaptı. Burada bu yöntemi anlatırsam konunun çok dışına çıkmış oluruz, fakat Zeilinger ikna edici bir biçimde C_{70} moleküllerinin birbirleriyle girişim yaptıklarını kanıtlar ve molekülün dalga boyunun teorik beklentilerle uyuştuğunu gösterir. Ustaca yapılmış Talbot-Lau interferometresi mezoskobik kütleye sahip cisimlerin ayırt edici özelliği olan çok küçük dalga boylarındaki girişimi ölçme becerimizin muazzam gelişimini gösterir.[19]

Daha büyük şeyler (kelimenin tam anlamıyla) mümkündür. 2011'de –bu defa Markus Arndt ile Almanya, Birleşik Devletler ve İsviçre'den bilim insanlarının liderliğindeki– bir Viyana

Üniversitesi ekibi kuantum girişim deneylerindeki yeni bir sıçramayı bildirdiler. Talbot-Lau etkisini kullanan ekip bazı büyük organik moleküllerin girişimlerini kanıtladı. Bunların içinde en büyüğünün kimyasal formülü $C_{168}H_{94}F_{152}O_8N_4S_4$'tü, 430 atom içeriyordu ve C_{70} molekülünden 8 kat daha kütleli ve 6 kat daha büyüktü.[20] Gelecekte bu tür deneyler protein molekülleri veya virüsler kullanılarak yapılabilir.

Zamanla kedilere gelecek miyiz? Muhtemelen olmaz, ama kim bilir?

Süperpoze Bir Tramplen

Bir süperpozisyonun aynı anda iki yolda birden hareket ettiğini çıplak gözle görebilir miyiz? Süperpoze kuantuma dair son öykümüz çok küçük fakat çıplak gözle görülebilir bir mekanik aygıtla ilgilidir. Bu aygıt trilyonlarca atomdan oluşur, belirli kuantize hareket hallerine ve böyle hallerin bir süperpozisyonuna yerleştirilebilir. Santa Barbara'daki California Üniversitesi'nden Aaron O'Connell ve Andrew Cleland liderliğindeki bir ekip bu aygıtı oluşturdu. Bu süperpozisyonu sergileyen mekanik hareketi içeren, ilk gözle görülür, insan yapımı aygıttır.[21] Birçok yönden tek bir atom gibi davranır.

40 mikrometre (0,04 milimetre) uzunluğundaki düz, ince bir metal şeritten yapılma, çok küçük bir tramplen hayal edin.[22] Bunun uzunluğu bir insan saçının kalınlığı kadardır ve benim çıplak gözüm kesinlikle bunu göremez ama belki sizinkiler görebilir. Santa Barbara ekibi bu şeridin titreşmesini sağladı, fakat tramplenlerin titreştiği gibi yukarı aşağı şeklinde değil. Bu genişleyip daralarak titreşir, nefes alıp verdiğinizde bedeninizin üst kısmının yaptığı gibi.

Şerit bir "piezoelektrik materyalden" yapılmadır. Bu şu anlama gelir: Buna bir alternatif elektrik akımı (ileri geri hızla salınan) verdiğinizde şerit akımın salınmasıyla aynı oranda

titreşir ("nefes alıp verir"). Üstelik eğer şerit bir elektrik devresine bağlıysa ve materyalin daha sonra mekanik olarak titreşmesi sağlanırsa, bir alternatif elektrik akımı devreden akar. Böylece şerit alternatif akımları mekanik titreşimlere dönüştürür ve tam tersini de yapar.

Bu şerit tabanından sabitlenmiştir (bir tramplen gibi) ve elektriksel olarak bir "kübite" –bilgisayar mühendislerinin 0 ve 1 olarak isimlendirdikleri iki kuantum halinden birinde olabilen bir aygıt– bağlıdır. Ekibin kübiti "0" ve "1" hallerinin süperiletken kuantum halleri olduğu bir SQUID'tir. Sıfır daha düşük ve 1 daha yüksek bir enerji halidir. Ekip bu SQUID hallerini kontrol edip ölçebilir. O halde deneyin stratejisi şeridi belirli kuantum hareket hallerine manipüle etmek için SQUID'i kullanmaktır.

Peki, bu zımbırtı nasıl çalışır? Titreşen mekanik sistemlerin, her biri belirli bir titreşim enerjisine sahip belirli kuantum halleri vardır. Heisenberg'in ilkesi sistemin bir hareketsizlik halinde olamayacağını bildirir, dolayısıyla sistem taban halinde bile titreşmelidir. Bütün sistemler enerjileri arttıkça giderek daha klasik hale gelirler, o yüzden güçlü kuantum etkilerini kanıtlamak istiyorsak bunları en düşük kuantum hallerine yerleştirmeliyiz.

Önceki deneylerde karşılaşılan büyük bir zorluk da bu tarz düşük enerjili kuantum hallerinin ekstrem soğutma gerektirmesiydi, çünkü aksi takdirde ısı titreşimleri sistemi daha yüksek enerjili kuantum hallerine uyarır ve kuantum etkileri daha az belirgin olur. Deneyi yapanlar taban halinin tipik ısı titreşimlerinden daha fazla enerjiye sahip olması için yüksek bir frekansta (ve dolayısıyla yüksek enerjide) salınan bir taban hali olan bir şerit istediler; böylece ısı titreşimleri şeridin halini değiştiremezdi. Ancak düz bir şeridin bilinen eğilme titreşimlerinin frekansları nispeten düşüktür, dolayısıyla ısı

titreşimleri bir problem teşkil eder. Santa Barbara ekibinin yaratıcılığı kısmen, ince bir metal şeritteki soluma tarzındaki titreşimlerin çok daha yüksek doğal frekanslarda ve dolayısıyla daha yüksek enerjilerde olduğunu anlamalarına dayanıyordu. Bu da ısı titreşimlerinin bu tarz bir problem olmadığı ve deneyin standart laboratuvar teknikleriyle erişilebilir olan soğutma seviyelerinde yürütülebileceği anlamına gelir. Bu nedenle ekip şeridi, mekanik titreşimin taban halinde olma olasılığı yüksek olan bir sıcaklığa soğutabildi.

Ekip şeridin ne zaman taban halinde olduğunu, ne zaman olmadığını nasıl biliyordu? İşte bu noktada SQUID devreye girdi. SQUID kübiti kuantum halleri içeren bir elektrikli cihazdır ve bu haller de algılanabilir farklı süperiletken akımlardır. 0 veya 1 olarak isimlendirilen kübit hali değişken bir dış manyetik alanla kontrol edilebilir ve ölçülebilir. SQUID elektriksel olarak şeride tutturulduğunda, ekip kuantumları (bir halinden sıfır haline düşüşün neden olduğu elektrik enerjisi patlamaları) SQUID'den şeridin içine besleyebilir ve şeritten kuantumları (şeridin uyarılmış halden taban haline düşmesinin neden olduğu titreşim enerjisi patlamaları) çekerek bunları SQUID'in içine besleyebilir. Göreceğiniz gibi, bu sayede ekip, şerit taban halinde olduğunda bu durumları doğrular.

İşte sistem bu şekilde işler. Son olarak sonuçlar şöyledir: Şeridi soğuttuktan sonra SQUID şeritten enerjinin bir kuantumunu çekecek şekilde ayarlandı. Ekip daha sonra zamanın %93'ünde SQUID'in şeritten kuantum çekmesinin olanaksız olduğunu keşfetti. Bu durum soğutmanın şeridi zamanın %93'ünde kuantum taban haline girmesini sağladığını doğruladı; bu kendi içinde büyük bir başarıdır.

Ekip daha sonra SQUID'in daha yüksek enerji haline girmesini sağladı ve SQUID'in enerji kuantumunu, titreşim

enerjisinin tek bir fononu olarak (mikrodalga enerji patlamalarını kullanarak) şeridin içine takas etti. Daha sonra ekibin SQUID'i ve şeridi manipüle ederek makroskobik bir cismin tek bir kuantum uyarımını bilfiil başardığını doğrulamak mümkün oldu; başka bir muazzam başarı.

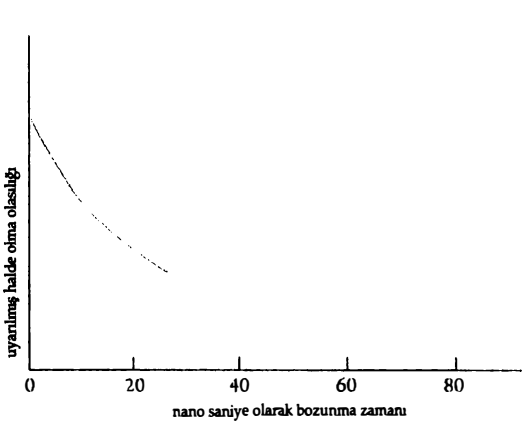
Ekip şeridin taban ve uyarılmış hallerinin bir *süperpozisyonunu* yaratarak deneyi daha da ilerletti ve süperpozisyonun taban haline derece derece "bozunmasını" gözlemleyerek bunu doğruladı. Bu ölçümler –ister radyoaktif bir çekirdeğin, ister mezoskobik bir metal şeridin bozunması olsun– kuantum bozunması sürecinin iyi bir kanıtıdır.

Bu şöyle işler: Ölçüm süreci daha önce tanımlandığı gibi şeridi uyarılmış haline getirmek için SQUID kullanımıyla başlar. Şerit bir atomun uyarılmış halde olması gibi uyarılmış haldedir; hal kararsızdır ve zamanla kendiliğinden taban haline bozunarak (geçişler) titreşim enerjisinin bir fononunu yayar. Kuantum teorisinin öngörüsüne göre, eğer uyarılmış hal kendi başına bırakılırsa taban halinin giderek daha fazlasını gerektiren bir süperpozisyona derece derece bozunur. Böyle bir süperpozisyon Şekil 1.1'deki interferometrenin iki yolunun ikisinden de geçen bir %50-%50 süperpozisyonundaki bir fotona benzerdir fakat olasılıklar şimdi mutlaka %50, %50 değildir. Şerit %100 olasılıklı uyarılmış halden başlayarak %99 olasılıklı uyarılmış hale (ve taban hali %1 olasılıklı) ve sonra %98 olasılıklı uyarılmış hale gelişir, vb. (fikri aldınız). Teorik olarak, bozunmanın "üstel bozunma eğrisini" izlemesi uyarılmış halde bulunma olasılığının ilk başta hızla, daha sonra giderek daha yavaş ve en sonunda sıfıra düştüğüne işaret eder (Şekil 8.4).

Ekip deneylerinin teoriye uyduğunu kanıtlamak için şeridin belirli zamanlarda Şekil 8.4'te gösterilen süperpozisyonda olduğunu gösterdi. Ekip, örneğin 10 nano saniyelik bir bo-

zunma zamanındaki öngörülen süperpozisyonu doğrulamak için, şeridi uyarılmış haline hazırladıktan sonra süperpoze kuantum halinin 10 nano saniyedeki bir "ölçümünü" yaptı. Bu da şu deneyin yüzlerce "denemesini" yaparak şeridi uyarılmış halde tutmanın olasılığını buldukları anlamına gelir: Şeridi uyarılmış halinde hazırla, 10 nano saniye bekle, daha sonra şeridin hâlâ uyarılmış halde mi olduğunu, yoksa taban haline mi bozunduğunu belirle. Bu durumda uyarılmış halde olma olasılığı, uyarılmış halde bulunduğu deneme sayısının, toplam deneme sayısına bölünmesiyle elde edilir. Bu ölçülen olasılıkların farklı bozunma zamanlarında Şekil 8.4'e uymaları bozunmanın kuantum öngörülerine uyduğunu kanıtladı.

Bu bir kuantum sisteminin bir süperpozisyon halinde olduğunu doğrulamanın ikinci bir yolunu gösterir. İlk yolu, çift yarık ve Mach-Zehnder interferometre deneylerinde olduğu gibi, süperpozisyonun dalları arasındaki girişimi gözlemlemektir. İkinci yolu da burada tanımlandığı şekliyle "kuantum



Şekil 8.4 Şeridin öngörülen üstel bozunma eğrisi çeşitli zamanlarda şeridin uyarılmış halde tespit edilme olasılığını gösterir. Deneyde şeridi uyarılmış veya taban halinde tespit etmenin ölçülen olasılığı çeşitli bozunma zamanları için bu eğriye uyuyordu. Bu uyuşma şeridin kuantum süperpozisyonunu doğruladı.

hali ölçümlerini" yapmaktır. Bu ölçümler sistemin olası ölçüm sonuçları için öngörülen olasılıkları içeren süperpozisyonun dallarında bulunduğunu gösterir.

9

Dolanık, Yerbilmez Bir Evren

Kuantumlama o kadar tuhaf bir fenomene yol açar ki, bu Einstein'ın kuantum fiziğini reddetmesine neden oldu, "çünkü bu fiziğin, uzaktaki tekinsiz eylemlerden muaf olarak, zaman ve uzaydaki bir gerçekliği temsil etmesi gerektiği fikriyle bağdaşamazdı".[1] Einstein "tekinsiz" sözüyle "hem burada hem de çok uzakta aynı anda" olma durumunu kastediyordu.

Einstein'ın düşündüğünün aksine, bu tarz "hem burada hem de çok uzakta aynı anda" olan eylemler kuantum fiziğince öngörülmekle kalmayıp, artık deneysel olarak da doğal dünyanın özellikleri olarak doğrulanıyor. Kuantum fiziğince öngörülen bu fenomenlerin, günün birinde kuantum fiziğinin yanlış olduğu keşfedilse bile var oldukları biliniyor. Bildiğiniz gibi (6. Bölüm), bu tarz eylemlere *yerbilmez* denir.

Kuantum yerbilmezliği kuantumun bütünlüğünün ve uzayda yayılımının doğrudan bir sonucudur. Eğer bir kuantum herhangi bir şekilde değişirse, değişim tüm kuantum boyunca aynı anda meydana gelmelidir, çünkü bir kuantum parçaları olmayan tek bir birleşmiş nesnedir. Ve Heisenberg'in ilkesi farklı konumlarda meydana gelen belirli olayların anlık bağlantılı olmalarını gerektirdiği için, gene de her bir kuantum uzaya yayılmış bir bölgeyi kaplar (daha doğrusu konum ve süratte bir aralığı).

Yerellik –cisimlerin sadece yakın çevrelerinden doğrudan etkilendikleri görüşü– son derece doğal bir kavramdır. Etrafımızdaki cisimler sadece yakın çevrelerinden doğrudan ve ânında etkilenir, uzaktaki cisimlerden etkilenmezler. Uzaktaki bir antenden gönderilen bir radyo sinyali veya yıldızdan gelen bir ışık dalgası bile kaynağın bizim konumumuza doğru yol alan bir dalga göndermesi ve daha sonra bu dalganın yerel olarak bir radyo alıcısıyla veya gözümüzle etkileşmesi anlamında yereldir. Bu kavram yerellik ilkesinde kodlanır. Bu ilkeye göre, *bir konumda meydana gelen fiziksel süreçlerin, başka bir konumdaki gerçek fiziksel durum üzerinde hiçbir anlık etkisinin olmaması gerekir.*

Bu bölüm, bu sağduyuya uygun kavramı ihlal eden deneyleri, bunun nasıl olabileceğini, ne anlama geldiğini ve yerbilmezliğin kuantum sıçramaları ve diğer fenomenlerle olan ilişkisini ele alıyor.

Yerbilmezlik ve Kuantum Hali Çökmesi

Kuantumlama doğrudan doğruya yerellik ilkesi hakkında sorular akla getirir. Bir kuantum düşünelim: Tek bir yarıktan geçip kırılarak yayılsın ve bir ekrana çarpsın (Şekil 6.3). Bildiğiniz gibi, resmin sağ tarafında gösterilen yoğunluk grafiği tek bir elektronun ekrandaki belirli bir x noktasıyla etkileşme olasılığını gösterir. Elektron farklı noktalardaki farklı etkileşim olasılıklarıyla birlikte, çarpmadan hemen önce bütün örüntüye yayılır. Ekranla etkileşmesi daha sonra elektronun atomik boyutlara çökmesine neden olur, çünkü ekran atomlardan oluşur ve elektron iki yerde birden tespit edilemeyen tek bir kuantumdur. Elektron rastgele seçilen tek bir ekran atomuyla etkileşerek çökmelidir, iki veya daha fazla atomla değil. Dolayısıyla çökme bütün ekran boyunca aynı anda meydana gelir ve elektron rastgele seçilmiş tek bir küçük böl-

geye çöker. 1927'de Einstein bu durumdan hoşnut değildi. Çökmenin görelilik teorisini ihlal ettiğini, çünkü bir mesafe boyunca anlık meydana geldiğini ve bunun görelilik ilkesinin ışıktan hızlı yol almayı yasaklamasını ihlal eder göründüğünü ileri sürdü.[2]

1930'da Heisenberg de kuantum halinin çökmesinin ortaya çıkardığı yerbilmezliğe dair soru işaretleri olduğunu kabul etti.[3] Bir ışın demeti ayrıştırıcısında iletme ve yansıtmanın 50-50 süperpozisyonunda olan bir foton tasavvur etti. Fotonun yansıtılan ve iletilen dalları büyük ölçüde ayrılabilmelerine rağmen, bir deney fotonu yansıtılan dalda tespit ettiğinde iletilen dalın ânında kaybolduğunu fark etti. Dolayısıyla yansıtılan dal uzaktaki iletilen dal üzerinde bir çeşit etki uygular. Eğer kuantum halleri gerçekse, o zaman bu fotonda gelişigüzel büyük bir mesafe boyunca anlık meydana gelen gerçek bir fiziksel değişimdir, dolayısıyla yerbilmezlik çökme süreci içinde yer alır.

Realist görüşü savunmayan biri, iletilen dalın kaybolmasının sadece bir bilgi güncellemesini gösterdiğini ve fiziksel olmadığını ileri sürerdi. Ancak bu kadar basit bir açıklamaya ne Einstein ne de Heisenberg inanıyordu; onların sezgisi fotonun kaybolduğu noktalarda gerçekten bir şeylerin meydana geldiği yönündeydi.

Bununla birlikte Heisenberg, "bu tür bir etkiden sinyallerin iletiminde asla yararlanılamayacağının, bu yüzden görelilik teorisinin postulatlarıyla da çelişkili olmadığının belli olduğunu" belirtti.[4] Bunun nedeni sonucun iki konumda da belirsiz olmasıdır. Örneğin uzayda merkezî bir konumda, bir foton kaynağı ile bir ışın demeti ayrıştırıcısı kullanan bir iletişim sistemi düşünün. Bu sistem her saniye tek bir süperpoze foton gönderir; dalın biri Mars'taki Alice'in detektörüne, diğer dal da dünyadaki Bob'un detektörüne gider. Telsizle

iletişim kurmak aşağı yukarı 15 dakika sürer. Alice kendi detektörünü bir şekilde Bob'a anlık bir mesaj göndermek için kullanabilir mi? Yanıt hayırdır, çünkü Bob'un bir foton tespit etme olasılığı Alice ne yaparsa yapsın değişmez; Bob, Alice ne yaparsa yapsın, her bir fotonu %50 olasılıkla tespit eder. Eğer Alice fotonun Bob'un konumu yerine kendi konumunda görünmesini veya görünmemesini sağlayabilirse, o zaman Bob'a, eğer Bob bir foton tespit ederse "Yankee'ler maçı kazandı" ve eğer Bob bir foton tespit etmezse "Yankee'ler maçı kazanamadı" gibi anlık bir mesaj gönderebilir (Alice ve Bob'un önceden bu "şifre" üzerinde anlaşmış olmaları gerekir). Ancak Alice böyle şeyler yapamaz, çünkü kuantum belirsizliğini kontrol edemez. Tek bir kuantumun anlık çöküşü ile görelilik teorisinin ışık hızını aşan iletişimi yasaklaması arasında bir çelişki yoktur. Görelilik ve kuantum fiziği bu bakımdan çelişmeden, birbirlerini incelikle dengeler.

Dolanıklık

Tek bir kuantum yerine *iki* kuantum olduğunda yerbilmez iletişim olasılıkları var mıdır? İki veya daha fazla kuantum etkileştiğinde birbirlerine karışabileceklerini yani dolanabileceklerini ve etkileşim tamamlandıktan sonra bile dolanık kalabileceklerini göreceğiz. Kuantum fiziği dolanık kuantumların büyük ölçüde ayrıldıktan sonra bile birbirlerini anında etkileyebileceklerini öngörür ve deneyler de bunu doğrular. Bu şaşırtıcı bir şeydir ve çok sayıda anlaşmazlığa neden olmuştur. Gelgelelim bu bir mesafe boyunca anlık etkinin özel görelilikle çelişmediğini, çünkü bunun bilgi veya enerji iletmede kullanılamayacağını göreceğiz. Yine görelilik ile kuantum fiziği arasında hassas bir denge mevcuttur.

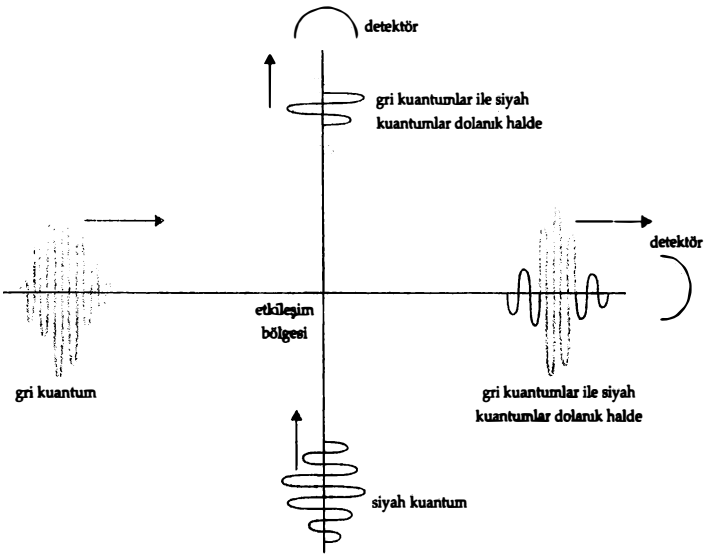
Şekil 9.1 iki dalga paketinin nasıl dolanık hale gelebileceğini şematik olarak gösterir. Başlangıçta sağa doğru hareket

eden gri kuantum ile yukarı doğru hareket eden siyah kuantum, diğerini etkilemeden birini değiştirebileceğiniz anlamında, ilk başta birbirlerinden bağımsızdır. Yolları daha sonra kesişerek geçici olarak etkileşmelerine (birbirleri üzerinde kuvvet uygulamalarına) ve daha sonra ayrılmalarına neden olur. Ancak kuantum teorisi bütünüyle ayrılmadıklarını öngörür. İki kuantum gerçekte etkileşimden çıkar, fakat her biri resimde gösterildiği gibi, diğerinin bir kısmını muhafaza eder. Gri kuantum da siyah kuantum gibi tek bir birleşik cisim olduğu için, etkileşimden sonra *iki* cisim *tek* bir birleşik bütün oluşturur. İki kuantum artık birleşik bir hali paylaşır ve "dolanık" oldukları *söylenir*.[5]

Nihai durum hem gri hem de siyah kuantumun iki farklı yönde, yukarı ve sağa doğru hareket ettikleri, dolanık bir süperpozisyondur. Süperpozisyon aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

> "Sağa doğru hareket eden siyah kuantum ile yukarı doğru hareket eden gri kuantum", "yukarı doğru hareket eden siyah kuantum ile sağa doğru hareket eden gri kuantumla" süperpozedir.

Bu iki kuantumlu süperpozisyonun olağanüstü olduğu görülür. Kuantumlardan ilki sağa doğru, diğeri yukarı doğru hareket eden iki kuantumlu bir sistem (Şekil 9.1'deki başlangıçtaki durum) olağanüstü değildir, fakat nihai dolanık halin makroskobik dünyamızdaki hiçbir şeye benzemediğini göreceğiz. Dolanıklık kuantumların dalga benzeri, süperpoze doğalarının doğal bir sonucudur. Yıllarca bilim insanlarının kafasını karıştıran bu anlaşılması güç durum ölçümün yani Schrödinger'in kedisi probleminin de esas nedenidir (10. Bölüm).



Şekil 9.1 İki kuantum etkileştikten sonra ayrıldıklarında normalde dolanık kalırlar. (Bu tür bir diyagram çizilmesine esin kaynağı olan Nick Herbert ve onun Quantum Reality [New York: Anchor Press, 1985] adlı eserine teşekkür borçluyuz.)

Kuantumların bir alandaki dalgalar olduklarını düşünürsek Şekil 9.1'de gösterilen dolanıklık şaşırtıcı değildir. İki dalga bir araya gelip ayrıldıktan sonra giren her bir dalganın bir parçası artık çıkan iki dalgada da görünür. İlk baştaki her bir kuantumun birleşik doğasını göz önüne aldığımızda, artık yerbilmez etkiler bulmayı bekleyebiliriz. *Birbirlerinden ne kadar uzakta olurlarsa olsunlar, nihai kuantumlardan birinde meydana gelen bir değişikliğin diğerinde de zorunlu olarak anlık değişikliğe yol açması gerektiği* tahmininde bulunabiliriz. Bu iyi bir tahmindir.

Bu, deneylerin kontrol edebileceği türde bir şeydir. Birkaç örnek verecek olursak, dolanıklık ile bununla ilişkili yerbilmez etkiler şu örneklerde kanıtlanmıştır: aralarında 144 km

olan iki foton arasında,[6] çeşitli atom ve foton sistemlerinde,[7] aralarında metre cinsinden mesafe bulunan iki atom arasında,[8] her biri 10^{16} atom içeren ve aralarında 15 cm olan iki küçük elmas arasında,[9] ve aralarında milimetre cinsinden mesafe bulunan iki gaz bulutu –her biri bir trilyon sezyum iyonundan oluşan– arasında.[10]

İki Kuantumlu Bir Deney

1990'da önemli bir deney, İngiltere'de John Rarity ve Paul Tapster ile onlardan bağımsız olarak, Birleşik Devletler'de Zhe-Yu Ou, Xingquan Zou, Lei Wang ve Leonard Mandel tarafından yapıldı.[11] Bu deneye –Rarity, Tapster ve Ou'ya istinaden– *RTO dolanıklık deneyi* adını vereceğim. Bu bölümde bu konu üzerinde biraz duracak ve 10. Bölüm'de tekrar ele alacağım. Thomas Young'ın 1801'de yaptığı çift yarık deneyi (2. Bölüm) –RTO deneyi bu deneyle yakından ilişkilidir– nasıl ışığın dalga doğasını aydınlattıysa, RTO deneyi de dolanıklığı aydınlatır. Şekil 9.2 bu güzel deneyi incelemenin bir yolunu gösterir. Bu zıt yönlü bir foton çifti olan A ve B ile başlar ki, bunlar burada detayları önemli olmayan *parametrik aşağı dönüşüm* adı verilen bir süreç vasıtasıyla *halihazırda* dolanık hale gelmişlerdir. Burada önemli olan kuantumların dolanık hale geldikten sonraki davranışlarıdır. Şekil 9.2'de A fotonunun bir çift yarık düzeneğinde sola doğru ve B fotonunun da ikinci bir çift yarık düzeneğinde sağa doğru hareket ettiği görülür. Dolanık hal aşağıdaki şekilde tanımlanır:

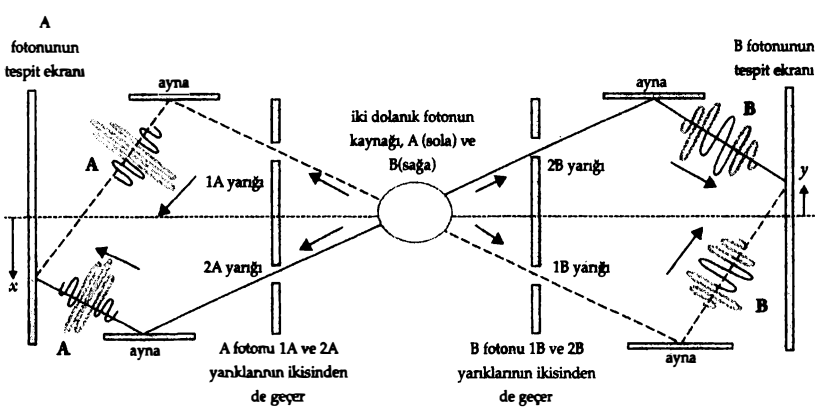
> "A fotonu 1A yarığından geçer ve B fotonu 1B yarığından geçer", "A fotonu 2A yarığından geçer ve B fotonu 2B yarığından geçer" ile süperpozedir.

Şuna dikkat edin: Süperpozisyonun her bir dalında kay-

naktan iki foton çıkar, dallardan biri 1A ve 1B yarıklarından geçerken, (Şekil 9.2'deki kesikli çizgi) diğer dal da 2A ve 2B yarıklarından (kesiksiz çizgi) geçer. Fotonlar kesikli ve kesiksiz *iki* süperpoze yol boyunca birbirlerinden uzağa doğru hareket eder. Dolanık çift aynı anda iki şeyi birden yapar; bu, dolanıklığı mükemmel biçimde kanıtlayan "son derece kuantum" bir durumdur.

Deney bir "ikili çift-yarık deneyi" olarak tanımlanabilir. A fotonu bir yarık çiftinden geçme süperpozisyonunda sola doğru ve B fotonu da ikinci bir yarık çiftinden sağa doğru hareket eder. Aynalar her bir fotonu tekrar bir araya getirerek kendi tespit ekranında kendisiyle girişim yapmasını sağlar.

Asıl deneyde çift yarık yerine Mach-Zehnder interferometreleri kullanıldı, fakat Şekil 9.2 mantıksal olarak RTO deneyine eşdeğerdir ve anlaşılması daha kolaydır. RTO binlerce dolanık çiftin ekranlarda oluşturdukları örüntüleri inceledi.



Şekil 9.2 "Çift çift-yarık deneyi" olarak görülen RTO foton dolanıklığı deneyi. İki dolanık foton, A ve B kaynakta yaratılır. Zıt yönlerde yol alırlar. Her bir foton bir çift yarık düzeneğinden geçer ve daha sonra bir tespit ekranında yeniden birleşirler. Kesikli ve kesiksiz çizgiler dolanıklığı gösterir: Kesikli 2-foton hali kesiksiz 2-foton haliyle süperpozedir.

Eğer çiftler dolanık olmasaydı, her bir tespit ekranı bilindik çift yarık girişim örüntüsünü gösterirdi (Şekil 2.3). Ancak şaşırtıcı bir biçimde, ekranlardan hiçbiri en ufak bir girişim belirtisi göstermez. Binlerce çift kendi ekranlarına çarptıktan sonra, noktamsı çarpmaların, hiçbir parlak ve karanlık girişim çizgileri olmaksızın, her bir ekranda oldukça rastgele bir biçimde dağıldıkları görüldü! Peki, neler oluyordu?

Bir girişim örüntüsünün olduğu fakat verilerin derinine gömülü olduğu görülür. Örüntü her bir foton çiftinin çarpma noktaları arasındaki ilintilerde bulunur. Bu şu anlama gelir: Hatırlarsanız (6. Bölüm), iki rastgele sonuçtan birinin bilgisi diğerinin sonucunu tahmin etmeye yardımcı oluyorsa bunlar "ilintilidir". Kaynaktan ekrana olan mesafenin iki foton için de aynı olduğunu varsayarsak, her bir çiftin iki fotonu da aşağı yukarı aynı anda çarpmalıdır.[12] Dolayısıyla deney ekipleri çarpmaları dikkatle zamanlayarak (saniyede birkaç yüz çarpma vardı), A fotonunun soldaki ekran üzerindeki her bir x çarpma noktasını, A'nın dolanık B fotonunun sağdaki ekran üzerinde karşılık gelen her bir y çarpma noktasıyla eşleştirebildi. Bundan sonraki veriler x ve y çarpma noktaları çiftlerinin bir dizisinden oluştu.

Fiziği anlamak için, gerçekte bazı dolanıklık deneylerinde olduğu gibi, aralarında çok mesafe olan ekranlar ile her bir ekranda bir gözlemci tasavvur etmek yararlı olur. Bazı yeni kelimeler yararlıdır: Tek başına A fotonunun veya tek başına B fotonunun eşleşmemiş verilerine *yerel veri* denir, çünkü veriler sadece bir ekranı gözlemleyen *yerel bir gözlemci* tarafından çarpmayla birlikte ânında toplanabilir. Eşli verilere ise *küresel veri* denir, çünkü bunlar çarpma ânında ancak *iki* yerel gözlemci tarafından toplanabilirler; gözlemciler daha sonra notlarını karşılaştırmalıdır (eğer birbirlerinden çok uzaklarsa bunu bir ışın demeti vasıtasıyla iletişim kurarak yapmalıdırlar).

Az evvel belirttiğimiz gibi, yerel veriler şaşırtıcı bir biçimde A fotonunun hiçbir girişim belirtisi göstermeden, ekran boyunca rastgele çarptığını gösterir ve aynısı B fotonu için de geçerlidir. Küresel veriler de aynı şekilde şaşırtıcıdır. Eğer bir kişi, diyelim hepsi de sağdaki ekranda *aynı* y çarpma noktasını, fakat soldaki ekran üzerinde *rastgele değişen* x değerlerini içeren 1.000 küresel çifti incelerse, 1.000 çarpma noktasının soldaki ekran üzerinde bir *girişim örüntüsü oluşturduğunu* ve bu örüntünün merkezinin, *diğer* fotonun sağdaki ekrana çarptığı y konumuna tam olarak eşit olan bir x noktasında olduğunu bulur! Yani, $X = y$'dir (x ekseninin aşağı, y ekseninin ise yukarı doğru yöneldiğine dikkat edin).

Örneğin B fotonu ekranına *sağdaki* ekran üzerine $y = 3$ mm olacak şekilde çarptığında, eşli A fotonunun kuantum hali *soldaki* ekran üzerinde merkezi $x = 3$ mm noktası olan bir girişim örüntüsü oluşturur; A'nın çarpma noktası bu örüntüyle uyumlu olmalıdır.

Bu tuhaf bir şeydir. B fotonu diyelim y'nin 3 milimetre olduğu, tamamen rastgele bir noktaya çarptığında *gelişigüzel uzaklıktaki* A fotonu bir şekilde ânında merkezi $x = 3$ milimetre olan bir girişim örüntüsüne uyan bir x noktasına çarpması gerektiğini "bilir". B'nin çarpma noktası çarpma meydana gelinceye kadar belirsiz olduğu için, nasıl olur da bir A fotonu ânında B fotonunun nereye çarpacağını bilebilir? Ve tabii ki bu aksi durumda da geçerlidir. Diyelim A fotonu $x = 5{,}3$ milimetreye çarptığında, B fotonu merkezi $y = 5{,}3$ milimetre olan bir girişim örüntüsüne uyan bir noktaya çarpması gerektiğini ânında bilir. *Bir girişim örüntüsü vardır fakat bu yalnızca küresel verilerdeki ilintilerde ortaya çıkar*. Yerel verilerde ortaya çıkmaz. Bunun, ölçüm probleminin çözümünde kilit nokta olduğunu göreceğiz (10. Bölüm).

Tekli fotonların olduğu, sıradan çift yarık deneyinde her

bir fotonun hali iki yarıktan da çıkmanın bir süperpozisyonudur; foton bu iki dal arasındaki yol farkı hakkında veri taşır ve ekrana çarptığında kendisiyle uygun bir şekilde girişim yapar. RTO deneyinde ise her bir foton *diğer* fotonun konumu hakkında veri taşır ve çarpma noktasını buna göre ayarlar.[13] Her bir foton *diğer* fotonla ânında ve gelişigüzel bir mesafe boyunca girişim yapar! Prensipte iki foton farklı galaksilerdeki ekranlara çarpabilir ve yine de bu sonuçlar değişmezdi.

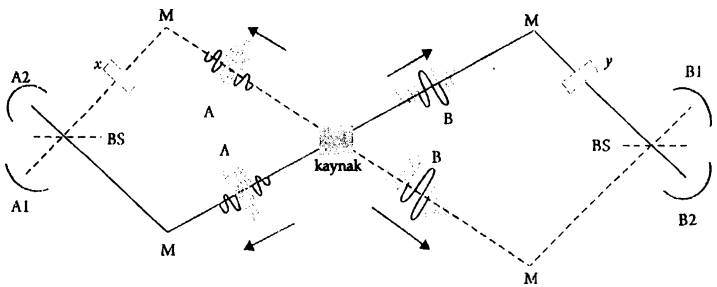
Bu kesinlikle yerbilmez gibi görünür. Birazdan göreceğiniz gibi, cisimlerin yalnızca yakın çevrelerinden doğrudan etkilenmeleri gerektiğini bildiren yerellik ilkesini kesinlikle ihlal eder.

RTO deneyi aslında Mach-Zehnder interferometreleriyle yapılır, her bir foton için bir tane kullanılır (Şekil 9.3; başlıkta açıklandığı şekliyle Şekil 1.1'le kıyaslayın), fakat deneyin mantığı Şekil 9.2'de çift yarık deneyininkiyle aynıdır. İki interferometrenin de detektörlerde yolları birbirine karıştıran ışın demeti ayrıştırıcıları vardır. Her bir interferometrenin, bir yol uzunluğunu değiştiren, resimde x ve y olarak gösterilmiş bir "faz değiştiricisi" vardır; x A fotonu için iki yol arasındaki farkı ayarlar ve y de aynı şeyi B fotonu için yapar. Şekil 9.2'deki eşdeğer deneyle ilgili olarak bu faz değiştiriciler iki ekran üzerindeki x ve y gözlem noktalarını ayarlar. İnterferometrelerin yararı ise deneyi yapanların özellikle seçilmiş x ve y noktalarındaki çarpmalar arasındaki ilişkiyi inceleyebilmeleri ve *bu değerlerin hızla değiştirilebilmeleridir*. Bu deneyin yerbilmez yönlerini anlayabilmek için Alice ve Bob'un faz değiştiricileri x ve y'nin birbirlerinden oldukça uzak olduklarını düşünün.

Sonuçlar: Alice'in A1 ve A2 detektörlerindeki yerel verileri ile Bob'un B1 ve B2'deki yerel verileri hiçbir girişim, dolanıklık veya süperpozisyon belirtisi göstermez. A1 ve A2 detek-

törlerinin her biri, *x* ve *y* faz ayarlamaları *nasıl olursa olsun*, zamanın rastgele %50'sinde tıklar ve aynısı için B1 ve B2 detektörleri için de geçerlidir. Bu tekli foton süperpozisyonunun tam tersidir (Şekil 8.1) ki, bu süperpozisyonda yol uzunluğu farkındaki değişimler Şekil 8.2'deki girişim örüntüsünü verir.

Küresel veriler dolanıklığı açığa çıkarır. *x* veya *y* değiştikçe, A ve B'deki sonuçlar *arasındaki ilintiler* bazı ayarlamalarda "mükemmel ilinti", bazı ayarlamalarda "ilintisizlik" ve yine bazı ayarlamalarda "mükemmel anti ilinti" şeklinde farklılık gösterecektir. Burada *mükemmel ilinti* iki sonucun uyuştuğu anlamına gelir; ya ikisi de "1"dir (kesikli yollar, A1 ve B1 detektörleri) ya da ikisi de "2"dir (kesiksiz yollar, A2 ve B2 detektörleri). *Mükemmel anti ilinti* iki sonucun uyuşmadığı anlamına gelir (ya A1 ve B2 ya da A2 ve B1). *Sıfır ilinti* ise iki sonucun denemelerin yarısında uyuştukları, diğer yarısında



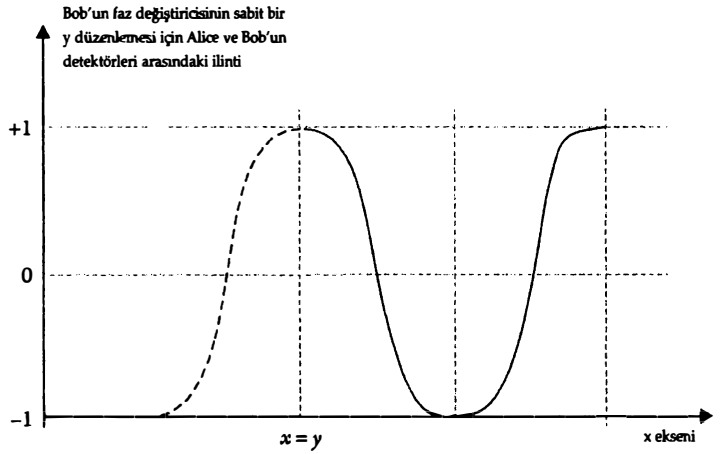
Şekil 9.3 Önceki resimdeki gibi çift yarık yerine Mach-Zehnder interferometrelerinin kullanıldığı RTO deneyi. A ve B dolanık fotonlarının her biri, Şekil 1.1'deki tekli-foton interferometresinin iki yoluna benzer iki yol boyunca (kesikli ve kesiksiz çizgiler) kaynaktan çıkar. "M" ayna, "BS" ışın demeti ayrıştırıcısı anlamına gelir, A1 ve A2, B1 ve B2 gibi foton detektörleridir. x ve y olarak belirtilen kutular yerel gözlemciler Alice ve Bob'un yol uzunluklarından birini değiştirmelerini sağlayan "faz değiştiricileridir"; Şekil 9.2'deki gözlem noktaları x ve y'yi değiştirmeye karşılık gelir. Şekil 9.2'de olduğu gibi, kesikli çizgi dolanık süperpozisyonun bir dalını ve kesiksiz çizgi de diğer dalını gösterir.

uyuşmadıkları, böylece bir sonucu diğerinden tahmin etmenin mümkün olmadığı anlamına gelir.

Burada şaşırtıcı olan ise her bir fotonun birinci detektör veya ikinci detektör "seçiminin" tamamen rastgele olmasıdır, gene de her bir foton daima seçimini *diğer* fotonla uygun biçimde ilintilendirir. Seçim rastgele olmasına ve iki çarpışma da fiilen meydana gelinceye kadar yapılmamasına rağmen bir foton diğer fotonun seçimini nasıl biliyor? Ve diyelim A fotonu nasıl B fotonunun faz değiştiricisindeki ayarlamayı ve buradan hareketle uygun ilinti derecesini nasıl biliyor? Her bir fotonun geleceği tümüyle tahmin edilemezdir, yine de her bir foton *diğer* fotonun ne yapmakta olduğunu "bilir". Gene bu kesinlikle yerbilmez görünür, tıpkı bu deneyin çift yarık versiyonunun (Şekil 9.2) yerbilmez göründüğü gibi.

Şekil 9.4, Alice ve Bob'un fotonları arasındaki ilintinin derecesini, Bob'un faz değiştiricisinin sabit bir y değeri ve Alice'in faz değiştiricisinin bir dizi değeri üzerinden gösterir. Grafiğin kesiksiz kısmı grafiğin tekli-foton girişimine özdeştir (Şekil 8.2); farklılıkları ise $x = 0$ yerine $x = y$ noktasında başlaması ve grafiğin, tek bir fotonun halinin *yoğunlukları* yerine Alice ve Bob'un fotonları arasındaki *ilintileri* göstermesidir. Grafiğin, Şekil 8.1 ve 8.2'de olduğu gibi *tek bir fotonun hallerinin bir girişimi* yerine *iki foton arasındaki ilintilerin bir girişimini* gösterdiğini söyleyebiliriz (bunun hakkında daha çok bilgi 10. Bölüm'de).

İnterferometre düzeneğinin iyi yönlerinden biri, iki foton havadayken Alice'in x'i, Bob'un da y'yi değiştirebilmesidir. RTO deneyinde bu fiilen yapılmasa da, diğer benzer deneylerde yapılmıştır (daha sonra tanımlanan Aspect'in deneyine bakınız). Sonuçların –ilintilerin– daha sonra anlık değişerek faz değiştiricilerin yeni düzenlemeleriyle uyuşmaları tuhaf fakat doğrudur. Dolayısıyla iki foton arasında anlaşılması güç bir işbirliği formu varsa, Alice ve Bob farklı galaksilerde



Şekil 9.4 İlintilerin girişimi. +1 ve -1 ilintileri mükemmel ilintiyi ve mükemmel anti ilintiyi gösterir. Grafik, Alice x faz değiştiricisini, Bob'un faz değiştiricisinin sabit bir y düzenlemesi için değiştirdikçe ikisinin sonuçları arasındaki ilintiyi gösterir. Alice'in fotonu Bob'un y düzenlemesini nasıl "biliyor"? Alice'in fotonu y değerine ânında uyum gösterir.

bulunsalar bile bu Alice ya da Bob tarafından yerel olarak ve ânında değiştirilebilir.

RTO deneyinin analizi deney sonuçlarının kuantum fiziğinin öngörüleriyle tam olarak uyuştuklarını gösterir.[14] Dolayısıyla bu deneyde ortaya çıkarılan herhangi bir yerbilmezlik kuantum fiziğinin ayrılmaz bir parçasıdır.

Şimdi bu deneyin göründüğü kadar yerbilmez olduğunu göreceğiz.

John Bell'in Yerellik Testi

Sıklıkla birbirlerinden uzaktaki iki kuantum arasındaki bu anlık işbirliğinin sadece görünüşte yerbilmez olduğu, ancak aslında sırasıyla Amsterdam ve Pekin'deki Alice'e ve Bob'a gönderilen altın ve gümüş paralara benzer şekilde (6. Bö-

lüm), geçmişte tamamen yerel süreçlerden kaynaklanan ilintinin bir sonucu olduğu ileri sürülür. RTO'nun birbirlerinden uzaktaki kuantumlar arasındaki görünürdeki işbirliği keşfedilmemiş tekin süreçlerin bir sonucu mudur?

1964'te John Bell bu tarz soruları yanıtlamak için standart olasılık yöntemlerini kullanarak RTO türündeki dolanıklık deneylerine uygulanabilir matematiksel bir sonuç elde etti. Bell *yerelliği* şu anlamda tanımladı: Örneğin Alice'in A1 ve A2 sonucuyla ilişkili olasılıklar yalnızca Alice'in deney ekipmanı ayarlamalarına, Alice'in özgül sonucuna ve hem Alice'in hem de Bob'un sonuçlarını etkilemiş olan, geçmişteki "ortak-neden" faktörlerine bağlıdır. Eğer bu tarz tüm yerel ve ortak-neden faktörlerini hesaba kattıktan sonra bile hâlâ ilintinin derecesini açıklamak için Bob'un uzaktaki B1 ve B2 sonucunu hesaba katmak gerekliyse, bu takdirde gözlemler bir konumdaki fiziksel süreçlerin başka bir konumdaki fiziksel süreç üzerinde hiçbir anlık etkisinin olmaması gerektiğini bildiren yerellik ilkesini ihlal eder.

Bell yerelliğin Alice ve Bob'un sonuçları arasındaki ilinti derecesi üzerinde belirli bir sayısal limit anlamına geldiğini gösterdi. Genellikle *Bell teoremi* veya *Bell eşitsizliği* olarak adlandırılan bu limitin tam formu bu kitabın amaçları açısından önemli değildir.[15] Ben buna *Bell'in yerellik koşulu* adını vereceğim. Bell'in sonucunun ille de kuantum fiziği ile bir ilgisi yoktur; tümüyle normal olasılık değerlendirmelerinden elde edilir. Bu kadar önemli olmasının nedenlerinden biri *RTO türündeki deneylerin kuantum tahminlerinin Bell'in yerellik koşulunu ihlal etmesidir*.[16] Sorun şu ki, x ve y faz ayarlamalarının çoğu değeri için kuantum tahminleri sadece yerel nedenlerin bir sonucu olamayacak kadar güçlü bir ilinti içindedir; ayrıca diğer gözlemcinin uzaktaki istasyonunda aynı anda elde edilen sonuç da çok önemli bir rol oynuyor olmalıdır. Örneğin belirli x ve y faz ayarlamalarında, kuantum fiziğinin öngörülerine

ve deneyin gösterdiğine göre, Bell'in yerellik koşulu %0 ve +%50 arasında bulunan ilintilere işaret ettiği halde, +%71'lik bir ilinti vardır. Dolayısıyla bu faz ayarlamalarında, eğer Bob *y* faz ayarlamasını değiştirirse, –deney sonuçlarını açıklamak için– Alice'in fotonunun fiziksel halini yeniden ayarladığını *varsaymalıyız*. Üstelik Bob fotonlar havadayken *y*'yi hızla değiştirebildiği için Alice'in fotonunun yeniden ayarlanması Bob'un faz değiştiricisinin değiştirilmesiyle aynı anda –veya en azından Bob'un faz değiştiricisinden çıkan bir ışık demetinin Alice'in fotonuna ulaşması için gereken zamandan daha kısa süre içinde– meydana gelmelidir.

144 kilometre gibi büyük mesafelerde yürütülen deneylerde bile bu tarz yerbilmez eylemler meydana gelir. Bell'in yerellik koşulu RTO'nunki gibi deneylerin nicel olarak gerçekten yerbilmezliği kanıtladığını ve kuantum fiziğinin gerçekten doğanın yerbilmez olduğunu öngördüğünü gösterir.

Bell'in yerellik koşulunun arkasındaki mantığın tümüyle standart olasılıklara dayandığını ve kuantum fiziğinin hiçbir ilkesini varsaymadığını dikkate almamız önemlidir. Bu, RTO gibi deneylerin, *kuantum fiziğinin doğru olup olmamasından bağımsız olarak, evrenin yerbilmez olduğunu* doğrudan gösterdiği anlamına gelir. RTO'nunki gibi deneyler bütün yerel teorileri bertaraf eder ve *herhangi* bir doğru teorinin yerbilmezliği içermesi gerektiğine işaret eder. Takdire şayan bir şekilde, standart kuantum fiziği deneyle uyumlu olarak yerbilmezliği öngörür.[17]

Bu kuantum teorisi açısından baş döndürücü bir zaferdir.

Aspect'in Deneyi: Belli Bir Mesafeden Işık Hızını Aşan Eylemin Kanıtı

RTO'nun dolanıklık deneyi kuantumun uzak ilintiler için öngörüleriyle uyuşur ve Bell'in analizi de bu ilintilerin, altın ve gümüş para örneği gibi bir ortak-neden düzenlemesinin so-

nucu olamayacağını gösterir. Peki, bu tarz ilintiler gerçekten sabit midir ve ânında uzaktan değiştirilir mi? Belki bir EM sinyal veya başka bir normal yerel iletişim şekli Bob'un faz değiştiricisi ayarlaması hakkında Alice'in fotonuna bilgi taşıyor olabilir. EM sinyal *yerel* bir mekanizmadır, çünkü dalga olarak uzaydaki bir noktadan diğerine yol alır ve uzayın her bir küçük bölgesi belirli bir mesafeden doğrudan ve anlık etki etmek yerine sadece bitişik bölgelere etki eder. Bu deneysel boşluk –anlık bir yerbilmez neden yerine sadece normal yerel neden-sonucun olma olasılığı– *yerellik boşluğu* olarak bilinir. Bu boşluğu bertaraf etmenin yolu Alice ve Bob'un istasyonları arasındaki mesafeyi yeterince büyük ve faz değiştiricisi değişimini yeterince hızlı kılmaktır ki, böylece *Bob iki dolanık foton havadayken faz değiştiricisini değiştirebilsin*. Bu durumda yine de (Bell'in yerellik koşulunu ihlal eden) yerbilmez ilintiler elde edersek, bunlar fotonlar havadayken ve bir EM sinyalin veya başka yerel bir mekanizmanın iki yer arasında iletişim sağlayabileceğinden daha hızlı oluşmuş olmalıdır.

1972'de dolanıklığın yerbilmez etkilerini ilk kez deneysel olarak tespit eden, Berkeley'deki California Üniversitesi'nden Stuart Freedman'la birlikte çalışan John Clauser olmuştur. Ekip daha sonraki RTO deneyine benzer şekilde, bunu dolanık foton çiftlerinin ilintilerinde Bell'in yerellik koşulunun ihlal edilmelerini gözlemleyerek başardı.[18] Bu büyük bir bilimsel buluştu. Clauser için de bu büyük bir sürpriz oldu, çünkü deneyi dünyanın nihayetinde yerel olduğu, yani Bell'in yerellik koşuluna *uyulacağı* ve yerbilmez kuantum öngörülerinin *yanlışlanacağı* kanısıyla yapmaya motive olmuştu. Kendisinin ve diğer birçok fizikçinin beklentilerinin aksine, veriler Bell'in koşullarını ihlal etti ve kuantum fiziğiyle uyuştu.[19] Bu kuantum fiziği için büyük bir zafer ve bilimin temel değerine güzel bir örnekti: Sonuçlar önyargılı inançlar yerine kanıt ve mantık

temeli üzerinde oluşturulmalıdır. Clauser'in ilk inancının aksine, keşfedilmesine yardımcı olduğu deneysel olgular evrenin yerbilmez olduğunu gösterdi.

Gelgelelim Clauser'in deneyinde, inandırıcı olmasa bile olası bir boşluk, yani daha önce sözü geçen yerellik boşluğu problemi vardı: Görünürdeki yerbilmezliğin nedeni sadece iki foton arasında yol alan EM dalgalar veya başka bir yerel mekanizma olabilirdi. Clauser'in faz değiştiricilerinin sadece 100 saniyelik aralıklarda çalışması foton hazırlığı sırasında gözlemlenen ilintilerin oluşması için ve yine Alice'in faz ayarlaması hakkındaki bilginin normal bir yerel formda Bob'un detektörlerine (birkaç metre ötedeydiler) bir şekilde sızması için çok zaman sağlıyordu.

Paris Üniversitesi'nden Alain Aspect ve meslektaşları 1982'de yerellik boşluğunu çözdüler.[20] Hem Aspect hem de Clauser deneylerini RTO deneyinde olduğu gibi dolanık dalga paketleri yerine dolanık foton "polarizasyon halleri" –derinlerine girmeyeceğimiz bir kuantum özelliği– kullanarak yaptılar. Aspect'in deneyinin yerbilmez nitelikli olası sonuçları, artık kapatılan yerellik boşluğu hariç, RTO deneyinin olası sonuçlarıyla aynıdır. Bu büyük bir başarıydı. İki detektör seti arasındaki 12 metrelik mesafeyi ışık sadece 40 nano saniyede –bir saniyenin 0,04 milyonda biri– kat ediyordu. İlintilerin ışık hızını aşan hızlarda tesis edildiğinin kanıtlanması için her bir foton çiftinin hazırlanmaları ve faz ayarlarının değiştirilmesi bundan daha kısa sürede meydana gelmek zorundaydı. Deneyde 5 nano saniyelik bir hazırlık zamanının ve 10 nano saniyelik faz ayar değişimlerinin başarılması yerbilmez ilintilerin ışık hızını aştığını kanıtladı.

Ancak deneyin yerbilmez nitelikli olası sonuçlarının tuhaflığı ve önemi (eğer doğruysa) nedeniyle fizikçilerin şüpheciliği devam etti. Devrim niteliğindeki yeni sonuçlara muha-

fazakâr bir bakış açısıyla bakılması güvenilir bilgi aralığımızı genişletmede bilimin başarısı açısından çok önemlidir. Bilimi halka sevdiren büyük gezegen astronomu Carl Sagan'ın ifade ettiği gibi, "Olağandışı iddialar olağandışı kanıtlar gerektirir".[21]

Belki de tuhaf sonuçları açıklayabilen başka boşluklar vardı. Örneğin Alice ve Bob'un faz ayarı seçimlerinde, iki faz değiştiricinin davranışlarını normal, yerel bir şekilde koordine etmelerini sağlayan deterministik bir örüntü olabilir. 1998'de Anton Zeilinger ve başka bilim insanları bir deneyle bu boşluk problemini çözdüler. Bu deneyde Avusturya'daki Innsbruck Üniversitesi'nin kampusunda iki konum arasında 400 metre mesafe bırakılarak ışığın 1,3 mikro saniyede –1.300 nano saniye– yol alması sağlandı. Her bir istasyona optik fiberler vasıtasıyla foton çiftleri gönderildi. Her bir denemenin süresi 1,3 mikro saniyeden çok daha azdı, fotonlar havadayken her bir çift için faz değiştiriciler tekrar ayarlanıyordu. Faz değiştirici ayarlarının önceden belirli bir kalıp yerine foton demeti ayrıştırıcılarının kuantum rastgeleliğine dayalı bir aygıt tarafından seçilmeleri faz değiştiriciler arasındaki arzu edilmeyen herhangi bir işbirliğini bertaraf etti.[22]

Gene başka bir mantıksız ama olası boşluk da *tespit boşluğu* olarak bilinir. Bu boşluğun ortaya çıkma nedeni normalde bu deneyde oluşturulan foton çiftlerinin yalnızca küçük bir oranının fiilen tespit edilmeleridir. Belki de tespit edilen çiftler özellikle Bell'in yerellik koşullarını ihlal etmeye eğilimlidir ve bu da araştırmacıları, oluşturulan tüm çiftlerin tam bir çetelesi yerelliği doğruladığında deneyin yerelliği ihlal ettiğine inanmaya yöneltir. 2013'te yapılan iki deney, "tespit verimlilikleri" önemli ölçüde daha yüksek olduğu için çiftlerin daha büyük bir kesiminin tespitini sağlayan yeni detektör çeşitleri kullanarak tespit boşluğuna son verdi.[23]

2007'deki başka bir deneyde Zeilinger'in grubu uzun mesafeli dolanıklıkta yeni bir rekor tesis etti. Her zaman olduğu gibi dolanıklık Bell'in yerellik koşulunun ihlal edilmesiyle doğrulandı. İki istasyon arasında 144 kilometre mesafe vardı. Her bir foton çifti Afrika'nın batı kıyıları açığındaki Kanarya Adaları'ndan birinde oluşturuldu. Fotonlardan biri aynı adadaki "Alice'e" ve diğeri de uzaydan başka bir Kanarya Adası'na gönderildi. Burada fotonu 1 metre çapındaki bir teleskop aldıktan sonra "Bob'un" foton detektörü üzerine odakladı.[24]

Son olarak 2015'in sonundaki üç yeni deneyin sonucu herhangi bir önemli boşluk olmaksızın Bell'in yerellik koşullarının ihlal edildiğini doğruladı. Ocak 2015 itibariyle, yegâne önemli boşluk doğrusu istenirse inandırıcı değildi. Belki de, diye iddia edildi, doğa ancak ihlallerden biri *diğer* ihlal meydana geldiğinde meydana gelecek şekilde *hem* yerellik boşluğunu *hem de* tespit boşluğunu ihlal etmeyi planlar. Bu durumda, bu iki boşluktan yalnızca birini test eden önceki deneyler doğanın yerbilmez olmadığı halde öyle olduğunu düşünmemize yol açacak şekilde yanılmamıza neden olabilirdi. Birbirlerinden bağımsız olarak yürütülen bu üç deney fotonlar havadayken (yerbilmezlik boşluğunu test etmek için) faz değiştiricilerin rastgele değişmelerini *ve* (tespit boşluğunu test etmek için) fotonları yüksek verimlilikle tespit etmeyi düzenleyerek bu birleşik boşluk hipotezini test etti.

Üç deney Ekim ve Aralık 2015'te yayımlandı.[25] Alain Aspect'e göre, "üç takım aynı anda iki ana boşluk problemini çözerek birbirlerinden bağımsız olarak yerel realizmden (cisimlerin ancak yakın çevrelerinden etkilendiği fikrinden) kesinlikle vazgeçmemiz gerektiğini doğrulamışlardır. Her ne kadar bulguları bir anlamda sürpriz olmasa da, on yıllara dayanan deneysel çabaların meyvesidir".[26]

Deneyler olası boşlukları test etmeye devam etmelerine ve bazı fizikçiler hâlâ aynı fikirde olmamalarına rağmen, genel mutabakat *doğanın yerbilmez olduğu* yönündedir: Cisimler uzaktaki olaylardan doğrudan etkilenebilir.

Yerbilmezlik Her Yerde mi Mevcuttur?

Dolanıklık kuantum fiziğinin en temel özelliklerinden biridir. Schrödinger bunu "Ben buna (dolanıklık) kuantum mekaniğinin *bir* özelliği değil, karakteristik özelliği, klasik düşünce çizgilerinden tamamen ayrılmayı dayatan özelliği derdim" (vurgu orijinalinde) sözleriyle vurguluyordu.[27] Bu takdirde sadece kuantum çiftlerinin dolanabilmeleri şaşırtıcı olurdu. Üç veya daha fazla kuantum dolanık olabilir mi? Tek bir kuantum bir şekilde dolanık olabilir mi ve olursa ne ile dolanık olur? Görecek olduğumuz gibi, birinci sorunun yanıtı "evet", ikinci sorunun yanıtı da "evet, kuantum vakumuyla"dır. Aslına bakarsanız bu tarz çok sayıda dolanıklık fenomeni teorik olarak tasavvur edilmiş ve deneylerle kanıtlanmıştır.

1992'den bu yana bilinen o ki, kuantum fiziğine göre tüm dolanık haller –Şekil 9.1'de olduğu gibi, şimdiki veya geçmiş etkileşimleri birbirlerinin kuantum hallerini paylaşmalarına neden olan bütün kuantum derlemeleri– farklı kuantumların birbirlerini uzaktan anlık etkiledikleri, yerbilmez davranışlar sergiler.[28] Bu sadece kuantum çiftlerini değil, üç veya daha fazla kuantum içeren ve şaşırtıcı bir biçimde tek bir kuantum içeren sistemleri de kapsar.

Dolanıklık ve yerbilmezliğin bütün evrende yaygın olduğu hemen hemen kesindir. Bilinen bir örnek de, bir atomun kendiliğinden (yardımsız) bir foton yayma sürecinin bir atom-foton dolanıklığı yaratmasıdır. Eğer atom galaksiler arası uzayda izole halde bulunan zilyonlarca hidrojen atomu arasındaysa, atom ve foton milyonlarca veya milyarlarca yıl boyunca diğer cisimlerle etkileşmeden, izole halde kalabilir.

Gözlemlenebilir evrenin çoğu boyunca ayrı kalabilseler de, (nihayet foton bir detektörle veya başka bir kuantumla etkileşimi yoluyla "tespit edildiğinde" veya "ölçüldüğünde") kuantum fiziği dolanık yerbilmez ilişkilerinin süreceğini öngörür.[29] Doğrusu istenirse, geniş çapta.

Fizikçiler makroskobik cisim çiftlerini dolanık hale getirmişlerdir. 2011'de Ka Chung Lee ve meslektaşları, her biri ince, kenarları 3 milimetre olan düz kare biçiminde, 10^{16} karbon atomu içeren ve aralarında 15 santimetre mesafe olan iki elmasın titreşim hallerini dolanık hale getirdiler.[30]

Bunun yapılış öyküsü çok enteresan ve öğreticidir. Elmas düzenli aralıklı örgü noktalarında bulunan karbon atomlarından oluşur. Deneyin başında iki küçük elmas düzensiz titreşim hallerindeydi. Oda sıcaklığındaki atomların hepsi düzensiz bir şekilde tek tek titreşmelerine rağmen, hiç fonon (düzenli titreşim enerjisinin kuantize demetleri [8. Bölüm]) yoktu. Ekip daha sonra bir ışın demeti ayrıştırıcısından tek bir *foton* göndererek fotonu uzayda iki ayrı yol yani "ışın" süperpozisyonuna yerleştirdi ve ışınlardan birini bir elmasa ve diğerini de diğer elmasa gönderdi. İki ışın her iki elmasın diğer tarafından çıktığında, ortaya çıkan foton hâlâ bir süperpozisyon halindeydi yani iki elmastan da aynı anda çıkmıştı, fakat enerjisi daha düşüktü (düşük frekans). Dolayısıyla tek foton, enerjisinin bir kısmını iki elmasa da bırakan bir süperpozisyon halindeydi. Bu, iki elmasın her birinin kuantize *fonon* hallerinin birbirleriyle dolanık hale gelmiş olduğunu gösteriyordu! Bu dolanık hal aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

> "A elmasının bir fononunun olması ve B elmasının hiç fononunun olmaması", "A elmasının hiç fononunun olmaması ve B elmasının 1 fononunun olmasıyla" süperpoze oldu.

Her ne kadar Lee'nin ekibi Bell'in yerellik koşulunun ihlal edildiğini deneysel olarak göstererek yerbilmezliği doğrudan doğrulamaya çalışmasa da, bu tam olarak John Bell'in incelediği türde dolanık kuantum halidir.

Bu *tek* bir kuantumun dolanıklığıyla ilişkilidir. Tek başına bir kuantum, başka bir kuantumla dolanık olmadığında bile dolanık olabilir mi? Einstein ve Heisenberg'in, foton gibi tek bir kuantumun halinin çökebileceği kavramından rahatsız olduklarını görmüştük. İkisi de fotonun *kaybolduğu* birçok konumda aslında bir şeyin meydana geldiğini düşünüyordu, fakat bu konuda içleri rahat değildi; çünkü bu durum görelilikle bağdaşmaz gibidir. Göreceğimiz gibi, ilk iddialarında haklılardı; fotonun kaybolduğu noktalarda bir şey meydana gelir. Ancak bildiğimiz gibi, bu tür bir kayboluş, göreliliği ihlal etmez, çünkü bu etkiyi kullanarak mesajlar gönderilemez.

Tekil-foton dolanıklığı ilk olarak 1991'de Sze Tan ve meslektaşları tarafından tanımlandı.[31] Tek bir fotonu, yansıtılan ve iletilen ışınların çıktığı bir ışın demeti ayrıştırıcısından, birbirlerinden herhangi bir uzaklıkta olabilen ve kendi ışın demeti ayrıştırıcıları ve foton detektörleri olan "Alice" ve "Bob"a göndermeyi önerdiler. Yani bir foton Şekil 1.1'de olduğu gibi bir ışın demeti ayrıştırıcısından geçer, fakat ışın 1 ve 2 ikinci bir ışın demeti ayrıştırıcısı veya ayrı detektörler yerine Alice ve Bob'a gider. Bunların ikisinin de kendi ışın demeti ayrıştırıcıları foton detektörü çiftleriyle donatılmıştır. Dolayısıyla yol 1 ve 2 asla birbirine karışmaz, Alice ve Bob'a giderler ki, onlar da farklı gezegenlerde olabilir. Gelgelelim şunu da biliyoruz ki, aslında bu gözlemcilerden sadece biri bu tek fotonu yakalayabilir.

Bu fotonun dolanık olduğunu göreceğiz. Ancak sadece bir foton varsa bu neyle dolanıktır? Yanıt: kuantum vakumuyla.

Yol 1 ya da yol 2 boyunca hareket eden foton aşağıdaki dolanık süperpozisyondadır:

> "Yol 1 fotonu içerir ve yol 2 vakumu içerir" durumu, "yol 1 vakumu içerir ve yol 2 fotonu içerir" durumuyla süperpozedir.

Bu tam olarak daha önce tanımladığımız iki elmasın dolanık haline benzerdir; tek farkı, burada fonon yerine foton olmasıdır! Hem Alice hem de Bob aslında kendi ışın demeti ayrıştırıcıları ve detektör çiftleriyle gerçek bir şey yakalarlar. Biri bir foton (EM alanın uyarılmış bir hali) ve diğeri de vakum (EM alanın uyarılmamış bir hali) yakalar. Bu sihirbazlık gibi gelir, çünkü "vakumu" –hiçbir kuantum olmaması– "hiçbir şey" olarak düşünmek alışılmış bir şeydir; bu yüzden bunu almak sihirbazlığa benzer. Ancak kuantum vakumu tamamen gerçektir (5. Bölüm) ve "hiçbir şey" değildir. Tan'ın ekibi Alice ve Bob'un gözlemleri arasındaki ilintilerin Bell'in tamamen yerel bir açıklamaya yönelik koşullarını ihlal edeceğini ve dolayısıyla tek bir kuantumun yerbilmezliğini kanıtlayacağını öngördü. Bu doğrudan Einstein ve Heisenberg'in anlık kuantum hali çökmesi hakkındaki endişelerine hitap eder. Tan, Einstein'ın ve Heisenberg'in, hal çökmesinin tuhaf bir biçimde yerbilmez olduğu idraklerinin ötesine geçti ve bu yerbilmezliğin Bell'in yerellik koşulunu kullanarak tespit edilip doğrulanabileceğini öngördü.

Tan'ın çalışmasının ardından tekil-foton yerbilmezliğinin fiziksel olarak gerçek olup olmadığına dair hatırı sayılır ölçüde fikir çatışması yaşandı ve bu görüşün deneylerle test edilmesi için daha başka öneriler sunuldu. 2002'de[32] dolaylı ve 2004'te[33] dolaysız bir test yapıldı. Sonuçlar Alice ve Bob'un verileri arasındaki yerbilmez ilişkinin açıkça Bell'in yerellik koşulunu ihlal ettiğini kanıtlayarak bir foton ile vakum ara-

sındaki dolanıklığın gerçek yerbilmez etkileri olduğunu gösterdi.

Dolayısıyla bir kuantum çöktüğünde sadece çöktüğü konumda değil, kaybolduğu konumlarda da bir şey meydana gelir. Kaybolduğu yerlerde bir alan uyarımı olasılığı yerine kuantum vakumu geçer. Tan'ın analizi ve deneyler bunun iki konum arasında gerçek bir yerbilmez hareket olduğunu gösterir.[34]

Sadece iki kuantumun birbirleriyle değil, tek bir kuantumun da kuantum vakumuyla dolanık olabileceğini gördük. Üç, dört veya daha fazla kuantum içeren ve çok kütleli *sistemler* adı verilen daha büyük sistemler de dolanık olabilirler. Üç kütleli bir sistem iki-kütleli bir dolanıklığı üç şekilde içerebilir (kuantum 1 ile 2'nin veya kuantum 2 ile 3'ün veya kuantum 3 ile 1'in dolanıklığı) ve ayrıca her bir kuantumun diğer ikisinin haline katıldığı üç-kütleli bir dolanıklık da içerebilir; bu, dört farklı dolanıklığın toplamı olur.

Dört kütle durumu üzerinde kafa yoracak olursanız (bir diyagram çizmek yararlı olur), 11 farklı dolanıklık olduğunu (6 iki-kütleli, 4 üç-kütleli ve 1 dört-kütleli) ve olası farklı dolanıklıkların sayısının kuantum sayısı arttıkça hızla artması gerektiğini görürsünüz. Dolayısıyla işler karmaşıklaşır.

Üç veya daha fazla kuantumdan oluşan her sistemin her dolanık halinin bir dereceye kadar yerbilmezlik içerdiği öngörülür. Bu sistemlerde ortaya çıkabilecek çeşitli dolanıklıklar için Bell türü yerellik koşulları hesaplanmıştır fakat RTO, Aspect ve diğerlerinin iki kütleli sistemleri araştırdığı şekilde bu sistemleri deneysel olarak araştırmak zordur, dolayısıyla yerbilmezliklerini doğrulamak da zordur.[35]

Çoğu atom türü üç veya daha fazla kuantum içeren, çok kütleli sistemlerdir ve atomların standart kuantum teorisi hepsinin içsel olarak oldukça dolanık olduklarına işaret eder.[36] Örneğin nötr karbon-12 atomu, 12 dolanık proton ve nötrona ilaveten 6 dolanık elektron da içerir. Dolayısıyla dolanıklık ve yerbilmezlik atomlar içinde her yerde mevcuttur, işte bu nedenle bir atom birçok yönden tek bir birleşik kuantum gibi davranır; örneğin kendisiyle girişim yapabilir. Her çok dolanık sistem, dolanık sistemin, tek bir kuantumun, "ya hep ya da hiç" tarzında birleşik davranması anlamında, tekil haldeki atomlara benzer. Bu anlamda RTO deneyinin dolanık foton çifti (Şekil 9.2 ve 9.3) bir "ışık atomudur".

Evren hangi anlamda dolanık bir sistem olabilir? Bize erken evrenden gelen kozmik arka plan fotonları (fotonların neredeyse boş uzayda dolaşabilecek şekilde ilk olarak özgür kaldıkları, büyük patlamadan sonraki 400.000 yıl) daha önceki evrenin maddesi ile dolanık olabilir mi? Dolanık sistemler dolanık hallerini gerçekten de sonsuza dek ve mesafeden bağımsız olarak koruyabilirler mi? Dolanıklığın kozmolojik (büyük ölçekli evren) olası sonuçları nelerdir? Bu tarz sorularla ilgili çok bilimsel tartışma yapıldığını duymadım.

Gelgelelim yakın tarihli genel bir sonuç bizi biraz aydınlatıyor. Matematikçi Stanislaw Szarek'e göre, "(büyük) kuantum sistemleri içindeki büyük alt grupların dolanık olduklarına dair belirtiler vardır. Bizim işimiz dolanıklığın tam olarak ne zaman yaygınlaştığını bulmaktır."[37] Szarek ve meslektaşları en az yüzlerce kuantum içeren etkileşen sistemlerde, dahili dolanıklıkların, içlerindeki iki büyük alt sistemin neredeyse kesinlikle birbirleriyle dolanık oldukları anlamında yaygın olduklarını teorik olarak buldular.[38] Örneğin 1.000 kuantum içeren bir sistemde 200 veya daha fazla kuantum içeren iki ayrı grubun birbirleriyle dolanık olma olasılıkları oldukça

yüksektir. Bu sonuç makroskobik dünyanın son derece dolanık olduğunu gösterir.

Dolayısıyla öyle görünüyor ki, bu kitap gibi sıradan cisimlerin öğeleri arasında çoklu dahili kuantum dolanıklıkları vardır ve farklı cisimlerin birbirleriyle dolanık olmaları olasıdır. Çok kütleli sistemlerde detaylı dolanıklığa ilişkin araştırmalar başlayalı daha birkaç yıl olmakla birlikte, dünya son derece dolanık görünüyor. Kuantum bilgisayarları gibi dolanıklıkla bağlantılı teknolojiler ve kuantum dünyanın önemli yeni özelliklerini araştırma olasılıkları dolanıklık çalışmalarında sürekli kaydedilen büyük gelişmelerin göstergesidir. Benim tahminimce, bazıları evren anlayışımızda oldukça önemli olan birçok dolanık kuantum öyküsü keşfedilmeyi bekliyor.

Yerbilmezlik ve Gerçeklik

Dolanık sistemlerin yerbilmezliğini doğrulayan tüm teorik ve deneysel çalışmalara rağmen, yerbilmezliğin fiziksel olarak gerçek olup olmadığına ilişkin ihtilaflar daima olmuştur. Uzman görüşünün eğilimi yakın zamanda bunun gerçekliği yönünde olmakla birlikte, buna henüz bir mutabakat denemez.[39]

Yerbilmezliğin gerçekliğinden şüphelenen birçokları Bell'in yerellik koşulunun aslında sadece yerelliği değil, şüphecilerin "realizm" adını verdikleri ikinci bir koşulu da varsaydığını ve Bell'in yerellik koşulunun ihlalinin, bir yerellik ihlali yerine bir realizm ihlaline işaret ettiğini ileri sürerler. Daha genel olarak, şüpheciler kuantum fiziğinin gerçek dünyayla değil, sadece gerçek dünya hakkındaki bilgimizle ilgili olduğunu ileri sürerler. Bizzat John Bell bu eleştiriye katılmıyordu ve "(Bell'in yerellik koşulunun) kanıtının yerellikten başka varsayımlar gerektirdiği önerileri karşısında son derece bozulmuştu".[40] Dahası, Bell'in ispatı incelendiğinde, Bell'in

çalışmasının tamamen "fiziksel gerçekliğin öğeleri" hakkında olan Einstein-Podolsky-Rosen paradoksuna bir yanıt olmasına rağmen realizmle ilgili tek bir söz bile etmediği görülür."[41]

Realizm ve yerbilmezlik hakkındaki bu argüman, kuantum hallerinin gerçekliği temsil etmediği, sadece kendi bilgimizi temsil eden muhasebe araçları olduğu görüşüyle bağlantılıdır (7. Bölüm). Bu realist olmayan görüş, bir kuantum bir görüntüleme ekranına çarptığında neden kuantum hallerinin ânında çöktüğünü (çünkü gözlemcinin bilgisi aniden değişir) ve birbirlerinden oldukça uzakta bulunan dolanık bir kuantum çifti arasındaki ilintilerin neden ânında değişebildiğini (aynı neden) açıklamayı kolaylaştırır; belki de fazla kolaylaştırır.

7. Bölüm'de öne sürdüğüm gibi, bu realist olmayan argüman geçmişte bilimsel olarak değerlendirilen şeylerin sınırını aşar. Üstelik realist olmayan savı benimsemek için ne teorik ne de deneysel neden mevcuttur, çünkü tuhaf görünse de yerbilmezlik ve bununla ilgili kuantum halinin çökmesi kavramı deneylerle ve özel göreliliğin ışık hızını aşan iletişimi yasaklaması gibi genel ilkelerle uyumlu görünür. Görünüşe göre problem yerbilmezliğin düpedüz tuhaf olmasıdır. Ancak zamanla bilimsel mutabakat kazanmış birçok tuhaf teori olmuştur. Burada düzeltilmesi gereken kendi önyargılarımızdır.

Kuantum fiziğinin realist bir yorumu uzayda yayılmış kuantumların gerçekte tüm konfigürasyonlarını ânında değiştirilebilmelerini şart koşar. Bir elektronun yayılmış kuantum alanı bir görüntüleme ekranıyla etkileşime girdiğinde alan (yani elektron) "tüm ekran üzerinde bulunmaktan" ânında "atom boyutunda bir bölge içinde bulunmaya" çöker. Ve Şekil 9.2'deki iki dolanık foton ekranlarına doğru hareket ettikçe, tekil konumları ekrana göre değil, sadece birbirlerine göredir. Çiftin bir üyesi görüntüleme ekranına çarptığında uzaktaki

diğer kuantum ilk kuantumun çarpma noktası hakkındaki verilerini korur ve kendi çarpma noktasını hemen buna göre ayarlar. Bu anlık yerbilmez değişimlerin nedeni kuantumun bütünlüğüdür: Bir kuantumun sadece bir parçasını değiştiremezsiniz. Bu daima ya hep ya hiçtir. RTO deneyinin iki fotonu, kapsamı Şekil 9.2 ve 9.3'ün kesikli ve kesiksiz çizgileriyle gösterilen tek bir iki-kütleli kuantum halinde dolanıktır. Bu iki kuantumlu sistem tek bir birleşik kuantum gibi hareket eder. Galaksimizi kaplayabilir, buna rağmen kendini yeniden yapılandırabilen yani ânında "çökebilen" tek bir cisimdir. Bu tekinsiz görünebilir, fakat bu deneylerin fiziksel olarak realist yorumudur.

Yerbilmezlik Özel Görelilikle Çelişir mi?

Bilim insanlarının yerbilmezlikle ilgili rahatsızlıklarının nedenlerinden biri, ışık hızını aşan bilgi transferi için bir kanal sağlayarak özel göreliliği ihlal eder görünmesidir. Bunun böyle olup olmadığını anlamak için RTO deneyini göz önüne alalım: Hem Alice hem de Bob kendi detektörlerinde hiçbir bilgi iletmeyen, rastgele çarpmalar görürler. Görmüş olduğumuz gibi, girişim örüntüsü yalnızca iki kuantum *arasındaki ilintilerde* bulunur ve bu ilintiler ancak daha sonra hem Alice hem de Bob'dan veri toplayarak (ışık hızını aşan değil normal hızlarda) ve bunları kıyaslayarak "gözlemlenebilir". Dolayısıyla *ilintilerin anlık değişimleri iletişim için kullanılamaz* ve değişimin anlık doğası ancak geçmişe bakıldığında keşfedilebilir.

Bu argümanı sağlamlaştırmak için, Şekil 9.3'ün düzeneğinde Alice ve Bob'un her ikisinin de rastgele 1 ve 2'leri şu 10'luk dizi halinde aldığını varsayalım: 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2. Aynı diziyi aldıkları için iki mesaj kümesi de görünüşte pozitif ilintilidir. Diyelim Alice faz değiştiricisini, Bob'un mesajları kendisininkilerle ters ilintili olarak alacağı şekilde

ayarlamış olsun. Bu durumda Bob 2, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1 şeklinde mesajlar alırdı. Yerel olarak Bob aradaki farkı bilemez; iki durumda da, rastgele bir mesaj dizisi alır. Bob değişiklikleri ancak *Alice'in* verilerini alıp bunları kendisininkilerle kıyasladıktan sonra tespit edebilir. *Yerel gözlemciler yerbilmez ilintilerdeki değişiklikleri tespit edemezler.* Dolayısıyla Alice, Bob'a bilgi göndermek için bu tarz ilintileri kullanamaz.

Kuantum fiziği herhangi bir mesafe boyunca anlık değiştirilebilen, yerbilmez ilintileri sağlarken, özel göreliliğin ışık hızını aşan bilgi transferini yasaklamasını da dikkatle korur. Brian Greene'in *Evrenin Dokusu* adlı kitabında belirttiği gibi, Einstein'ın özel göreliliği "varlığını kıl payı farkla sürdürür".[42] Ancak belki de bu o kadar şaşırtıcı değildir. Düşük enerjili durumlarda bile, görelilik kuantum fiziğinin ayrılmaz bir parçasıdır.[43] Eğer öyleyse, o zaman kuantum fiziği özel görelilikle çelişemez.

Kuantum Sıçramaları ve Detektör Etkisi

7. Bölüm'de iki tür kuantum dinamiğini ele aldık: Schrödinger'in denkleminin tanımladığı yumuşak değişimler ile Şekil 6.3'teki elektron, görüntüleme ekranına çarptığında oluşanlara benzer anlık kuantum sıçramaları. Görüntüleme ekranına bir elektronun çarpması 2. Bölüm'de tanımlanan "ölçümün" bir örneğidir; bu bir kuantum sürecinin (elektronun ekranın atomlarıyla etkileşimi) neden olduğu herhangi bir makroskobik olay (ekranda parlama) olabilir. Bu bölümde ölçüm, dolanıklık ve kuantum sıçramaları arasındaki ilişkiyi araştırıyoruz.

Çift yarık deneyine dönelim[44] ve (a) ve (b) adını vereceğim, daha önce sunulan iki düzenek ve (c) adını vereceğim üçüncü bir düzeneğin sonuçlarını kıyaslayalım. (a)'da sadece bir yarık açıktır. Bildiğiniz gibi, bu durumda ekran üzerindeki çarpmalar girişim olmaksızın, yarığın arkasında merkezlen-

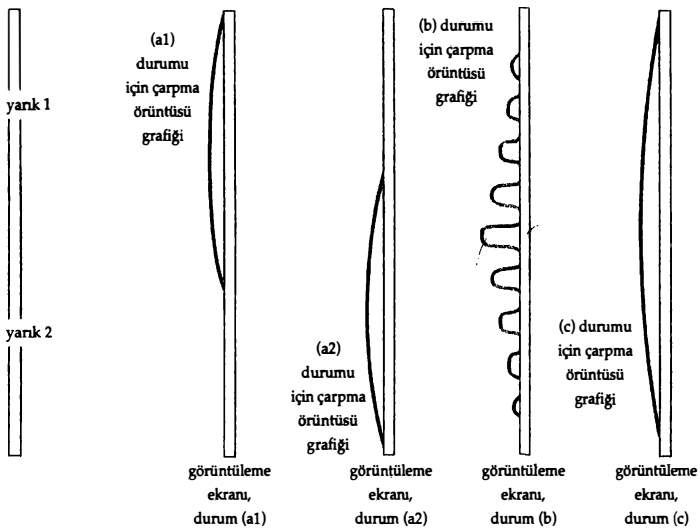
miş, geniş bir bölge boyunca, belki kenarlardaki girişim saçaklarıyla, rastgele meydana gelir. Yarık çok dar olduğu için merkezî bölgenin tüm ekrana yayıldığını varsayalım. (b)'de iki yarık da açıktır. Bildiğiniz gibi, bu durumda çarpmalar ekran boyunca bir girişim örüntüsü içinde dağılır. (c)'de iki yarık gene açıktır, fakat "hangi-yol detektörünün" mevcut olduğu yarıklarda. Bunu kuantumun ekrana doğru bozulmadan ilerlemesi için kuantumu önemli ölçüde bozmadan her birinin (yani elektronun) hangi yarıktan geçeceğini belirleyebilen bir aygıt olarak tanımlayacağım. Böyle "ideal" (yani "bozmayan") bir detektör yapılabilir, en azından arzu edilir bir yakınlıkta.[45]

Bu düzeneği tanımlamak bile bir bilmece ortaya çıkarıyor gibidir, çünkü bildiğiniz gibi böyle bir detektör olmadığında her bir kuantum *iki* yarıktan da aynı anda geçer (5. Bölüm). Kuantumların algılaması güçtür. Bu detektörün çalışması deney sonuçlarını etkileyecek mi ve etkileyecekse nasıl etkileyecek?

Şekil 9.5 üç düzeneği ve sonuçları gösterir. (a) düzeneğinin sonuçlarını zaten biliyorsunuz: Şekilde (a1) olarak gösterilende sadece yarık 1'in açık olduğu ve (a2) olarak gösterilende yalnızca yarık 2'nin açık olduğu varsayılır. Ayrıca (b) düzeneğinde ortaya çıkan girişim örüntüsünü de biliyorsunuz. Gelgelelim (c) düzeneğinin sonucu sürpriz olabilir. Her iki yarık da açık olmakla birlikte, *yarıklarda bir detektörün çalışması ekran üzerindeki sonucu büyük ölçüde değiştirerek (b) düzeneği durumunda gözlemlenen girişim örüntüsünü yok eder*. Kuantumu "bozmamak" için gösterilen bütün çabalara rağmen detektör tespit edilen kuantumu muazzam ölçüde değiştirir. (b) örüntüsünden (c) örüntüsüne olan bu değişime *detektör etkisi* adını vereceğim. (c) örüntüsünde çarpmalar bütün ekrana rastgele yayılır ve (a1) ve (a2) olarak gösterilen iki tek-yarıklı dağı-

lımın toplamıdır. *Bu da her bir kuantumun, iki yarıktan da bir süperpozisyon olarak geçmek yerine artık yarıkların birinden rastgele geçtiğinin kanıtıdır.* Görünüşe göre hangi-yol detektörünü açmak kuantumun iki yerine sadece bir yarıktan geçmesine neden olur.

Detektör etkisi yarık detektörünü açar açmaz hızla ve görünüşe göre ânında meydana gelir. Bu radikal değişime neden olan nedir? Bu detektörün kuantum üzerinde uyguladığı atomlar arası kuvvetlerin bir sonucu mudur? Böyle bir açıklamada problemler söz konusudur. Deneyi yapanlar –örneğin detektörü yarıklardan uzaklaştırarak– bu tarz kuvvetleri



Şekil 9.5 Detektör etkisi. Durum (a1) sadece yarık 1'in açık olduğu bir çift yarık düzeneğinden geçen tekil kuantumların çarpmalarının dağılımı. Durum (a2) aynısı, ancak şimdi yarık 2 açık. Durum (b) iki yarık da açık olduğunda çarpmaların girişim örüntüsü. Her bir kuantum iki yarıktan da çıkar. Durum (c) Detektör etkisi: İki yarık da açık ve "hangi-yol detektörü" (gösterilmeyen) mevcut olduğunda, girişim örüntüsü girişim içermeyen bir dağılıma sıçrar. Detektör her bir kuantumun iki yarıktan değil, ya yarık 1'den ya da yarık 2'den çıkmasına neden olur.

azaltabilirler, ancak çarpma örüntüsündeki devasa değişim en ufak bir değişikliğe uğramaz. Daha detaylı açıklayacak olursak, iki yarıktan sadece *birine* odaklanmış tek bir detektör değişime neden olmaya yeter; *tespit edilmeyen yarıktan çıkan kuantumlar detektörden kaynaklanan kuvvetlere maruz kalmasalar bile*! Bu tespit edilmeyen kuantumlar detektör açıldığında çarpma noktalarını değiştirirler; örneğin girişim örüntüsünün yıkıcı girişim bölgelerinden (koyu çizgiler) artık kaçınmazlar. Üstelik iki yarık arasındaki mesafe arttıkça tespit edilmeyen kuantumların üzerindeki etki azalmaz. Burada bir çeşit uzun mesafeli etki söz konusudur; her kuantum detektörün çalışmakta olduğunu "bilir", detektörden etkilenmiyor gibi görünen kuantumlar bile.

Tespit sürecine yakından bakalım. Detektör yarıklardan geçen kuantumlara, "yarık 1" veya "yarık 2" olarak kaydederek makroskobik şekilde tepki vermelidir. Dolayısıyla kuantum seviyesinde çalışmalı ve tespiti makroskobik seviyeye getirmek için bir büyütme mekanizması içermelidir. Bu makroskobik bir değişime neden olan bir kuantum süreci olarak "kuantum ölçümü" tanımımızı tam olarak karşılar. Detektörün özü kuantumla mikroskobik etkileşimidir; etkileşimden sonra detektörün iki koşulundan biriyle sonuçlanması gereken bir süreç. Detektörün bu koşullarına, yarık 1 veya yarık 2'den çıkan kuantumun tespitine karşılık gelen, *D1* ve *D2 hali* diyelim. Makroskobik detektör besbelli tek bir kuantum *olmamasına* rağmen, detektör bir kuantum fonksiyonunu yerine getirdiği için D1 ve D2 kuantum halleri olarak görülmelidir. Detektörün her ölçümden önce "hangi-yarık" ölçümünü yapmaya hazırlandığı üçüncü bir kuantum hali, bir "hazır hali" olmalıdır. Bu üç kuantum hali detektörün özüdür.

Detektör bir kuantum geçtiğinde hazırdan D1 veya D2 haline geçmelidir. Daha önce belirttiğimiz gibi, bu takdirde çarpmalar hiçbir girişim örüntüsü göstermez, ekran boyunca

rastgele yayılır. Modern elektronik teknolojisinin yardımıyla, tekil çarpmalarla, belirli bir kuantumun detektör okuması ilintilenebilir. Bu durumda yarık 1'den geçen kuantumların yaptığı örüntünün Şekil 9.5'teki (a1) durumuyla ve yarık 2'den geçen kuantumların yaptığı örüntünün de (a2) durumuyla özdeş olduğu görülür. Bu da hangi-yol detektörünün, kuantumların her iki yarıktan değil, yarıklardan birinden geçmesine *neden olduğunu* doğrular. Görünüşe göre detektör her bir kuantumun çift yarık girişim halinden tek yarık hallerinden birine hızla sıçramasına yol açar. Kuantumun bu tek yarık hallerine *Q1* ve *Q2 halleri* diyelim.

Hem detektörü hem de kuantumu kapsayan birleşik sistem hallerini nasıl tanımlamalıyız? Sadece yarık 1 açık olduğunda, birleşik sistemin bariz tanımı "kuantumun Q1 halinde ve detektörün D1 halinde olduğudur" ve sadece yarık 2 açık olduğunda da benzer şekildedir. Bu haller kuantum yarıklardan birinden geçip de ekrana çarpmadan önceki durum için geçerlidir.

Peki ya iki yarık da açıksa? Süperpozisyon ilkesini hatırlayın: Bir kuantum iki halden birinde olabilirse, o zaman aynı anda iki halde birden olabilir. Bu da iki yarığın da açık olduğu birleşik sistemin halinin, daha önce tanımlanan tek yarıklı hallerin her ikisinin bir süperpozisyonu olduğunu akla getirir. Bu süperpozisyon halini aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz:

> "Q1 halindeki kuantum ve D1 halindeki detektör" durumu, "Q2 halindeki kuantum ve D2 halindeki detektör" durumuyla süperpozedir."

Süperpozisyon ilkesi bize bunun birleşik sistemin olası bir hali olduğunu söyler ve kuantum teorisinin matematiği de bunun aslında iki yarığın da açık olduğu birleşik sistemin hali olduğunu doğrular.[46]

Birleşik sistemin ölçüm hali adını vereceğim bu süperpozisyon hali kuantum fiziğinin ve 10. ve 11. bölümlerdeki ölçüm problemi değerlendirmemizin merkezinde yer alır. Bu, Şekil 9.1 ve 9.2'deki dolanık haller gibi bir dolanık haldir. Çok önemli olan nokta ise *tespit veya ölçümlerin, makroskobik bir detektör bir kuantumla dolanık hale geldiğinde meydana gelmesidir*.

Hangi-yarık detektörü kuantum hangi yarıktan geçerse geçsin kuantumu bozmayacak şekilde tasarlanmasına rağmen, detektör etkisi detektörün süperpoze kuantumu iki yarıktan da geçme durumundan, yarık 1 veya yarık 2'den rastgele geçme durumuna getirdiğini gösterir. Detektör kapatıldığında tek bir kuantum iki yarığa da yayılarak ekran üzerindeki tekil çarpmaları belirli bir yarıkla ilişkilendirmeyi olanaksız hale getirir. Yayılmış kuantum iki yarıkta da bulunan, tek bir bölünmemiş "bütündür". Ancak detektör açıldığında, *deneyi yapan* kuantumları her seferinde bir tane olmak üzere yarıklara göndererek ve her bir çarpmaya eşlik eden detektör okumasını gözlemleyerek *ekrandaki her bir çarpmayı yarıklardan biriyle ilişkilendirebilir. Hangi-yol detektörü kuantumun iki yarıktan da geçmek yerine yarıklardan birinden geçecek şekilde radikal bir biçimde değişmesine, "çökmesine" neden olur*. Kuantum artık iki yarıkta birden bulunan tek bir bölünmez bütün değildir.

Kuantumun iki (veya daha fazla) farklı kuantum halinden birinin veya diğerinin özelliklerini rastgele sergilediği bu duruma *karışım* denir.[47] Karışım süperpozisyondan biraz ama kritik şekilde farklıdır. Bu, iki halde aynı anda olma (*süperpozisyon* denir) ile iki halden birinde olma arasındaki gri bir bölgededir. Bir kuantum bir karışımda olduğunda iki halden biriyle ilişkili kesin özellikleri vardır, fakat bu kesin özellikler belirsizdir. Çift yarık deneyinde süperpoze kuantumun iki yarıktan da çıkan tek bir cisim olarak *uyuştuğunu* ve detektörün bu tek cismi yalnızca bir yarıktan rastgele çıkan bir cis-

me *uyumsuzlaştırdığını* söyleriz. Bir süperpoze kuantum, hal içindeki farklı uzaysal alt bölgeleri (yani farklı yarıklar) farklı deneysel sonuçlarla ilişkilendirmenin prensipte bile olanaksız olduğu anlamında birleşik yani *bağdaşıktır*. Uyumsuzlaştırılmış kuantum (detektör açık olduğunda) tek bir yarıktan geçtiği (ve dolayısıyla iki yarık boyunca tek bir uyumlu cisim olmadığı) fakat yarık seçiminin detektör "seçilen" yarığı kaydedene dek belirsiz olduğu anlamında "bağıntısızdır".

Detektörlerin ilginç etkilerinin bir özeti şöyledir: Tespit edilmeyen kuantum bir süperpozisyon olarak iki yarıktan da aynı anda ve tutarlı bir şekilde çıkar. Bir hangi-yol detektörüyle dolanık olma bu hali kuantumun yarıklardan birinden rastgele (mükemmel bir kuantum belirsizliğiyle) çıktığı "bağıntısız" bir karışım durumuna getirir. Bu ölçümlerin süperpoze kuantumları nasıl etkilediğine dair mükemmel bir örnek ve Schrödinger'in kedisinin gizemini çözmenin ilk adımıdır.

KISIM 3

NORMAL DÜNYAYA GERİ DÖNÜŞ

|| 10 ||

Schrödinger'in Kedisi ve "Ölçüm"

Kuantumun kalbinde gizlenen bir hayalet var. *Kuantum ölçümü problemi* olarak bilinen bu şey bildiğiniz gibi laboratuvar ölçümlerinden çok daha fazlasıyla ilgilidir.

Bölüm başlığındaki "ölçüm" kelimesini tırnak içine aldım, çünkü yaygın kullanılan bu terim yanıltıcı olabilir. Kuantum ölçümü kavramı kelimenin işaret eder göründüğü laboratuvar esaslı süreçten çok daha geniştir. Ölçüm –bir kuantum sürecinin neden olduğu makroskobik bir değişim– dışarıda laboratuvarın içinde olduğundan çok daha sıklıkla meydana gelir. Ölçüm her yerdedir; kuantum ile makroskobik dünya arasındaki bağdır.[1]

Ölçümlerle ilgili çokça kafa karışıklığı söz konusudur. Gerçek bir problem teşkil edip etmediğine ve bunu gerçek bir problem olarak görenler için çözülüp çözülmediğine ve eğer çözülmüşse nasıl çözüldüğüne ilişkin bir mutabakat yoktur. Notlarda kuantum uzmanları arasında kısa zaman önce yapılmış anketlerin özetlerini göreceksiniz.[2] Bunlar çok sayıda görüş sergilese de uzmanların çoğu üç savdan birini savunuyor: Ölçüm problemi gerçektir ve geleneksel kuantum fiziği içinde çözülemez; ölçüm problemi gerçektir ve geleneksel kuantum fiziği içinde çözülebilir; çözüm problemi sahte bir

problemden başka bir şey değildir, çünkü kuantum fiziği gerçeklik yerine salt bilgi ve enformasyonla ilgilidir.

Kuantum ölçümü bilmecesinin genellikle *kesin sonuçlar problemi*, namı diğer Schrödinger'in kedisi ile *tersinmezlik problemi* adı verilen iki ayrı öğesi vardır. Bu bölüm ünlü Schrödinger'in kedisi gizemini araştırıyor ve yerbilmez niteliklerine dayalı bir çözüm öneriyor. 11. Bölüm tersinmezlik problemini inceliyor ve *dekoherans* (*uyumsuzlaşma*) adı verilen bir sürecin bunu çözdüğünü ileri sürüyor. Bazı fizikçiler dekoheransın aynı zamanda sonuçlar problemini çözdüğü yönünde görüş belirtseler de bu hatalı gibidir.[3] Bu bölümde sunulan çözüm veya başka herhangi bir çözüm hakkında kuantum fizikçileri arasında bir fikir birliği olmadığını dikkate almamız önemlidir.

Kuantum teorisinin ölçüm hakkında söylediklerini çözmek kolay değildir. *Birçok uzmanın analizlerine göre, kuantum teorisi ölçümlerin kesin sonuçları içermediğine, sadece bazı olası sonuçların bir süperpozisyonunu verdiğine işaret ediyor*. Eğer doğruysa, bu kuantum fiziğinin özünde anlamsızlık olduğunu ima eder. Bazı uzmanların neden böyle söylediklerini göreceğiz ve daha sonra neden bu uzmanların yanılmış olabileceklerini anlatacağım.

Sağduyunun yanı sıra deneylerden de biliyoruz ki, kuantum ölçümleri "bu foton detektörü tıkladı" gibi kesin, tekil sonuçlar verir. Bir dizi özdeş denemede, kuantum rastgeleliği belirli bir detektörün bazı denemelerde tıklayıp bazılarında tıklamayabileceğine işaret eder, fakat ölçümler tek bir deneme sırasında tıklayan ve tıklamayan detektörlerin belirsiz süperpozisyonlarını asla vermez. Öngörülemez sonuç meydana gelirse, bu sonuç kesindir, iki veya daha fazla sonucun belirsiz bir süperpozisyonu değildir. Bu bölümün ilk kısmında kesin sonuçlar problemi detaylı olarak açıklanıyor ve ikinci kısım-

da bu ikilem için Erwin Schrödinger'in metaforu sunuluyor.

Kısacası, şöyle bir problem var: (1) Ya standart kuantum teorisinin ilkelerinin düzeltilmesi gerek (2) ya da standart teori doğru fakat farklı bir yorum gerekli (3) veya standart teoriye dayalı hatalı öngörüye yol açan analizin kendisi hatalı. Bu bölümün üçüncü kısmında teorinin düzeltilmesine veya yeniden yorumlanmasına yönelik en çok tartışılan önerilerden bazıları sunuluyor. Hepsinin de destekçileri ve karşı çıkanları var; hiçbiri üzerinde bilgiye dayalı bilimsel görüşe dair bir mutabakat elde edilemedi.

Bu bölümün son yarısında, standart analizin hatalı olduğunu ileri sürüyor ve ölçüm probleminin *yerel hal çözümü* adını vereceğim çözümünü –standart kuantum teorisine dayalı bir çözüm– sunuyorum. Ana fikri dolanıklık ve yerbilmezlikle bağıntılı olan bu çözüm ilk kez 1968'de Josef Jauch tarafından sunuldu ve ben dahil başkaları tarafından sıklıkla yeniden keşfedildi.[4] Şaşırtıcı bir biçimde, yerbilmezlik fenomeni bütün kuantum ölçümlerinde belli olmasına rağmen, ölçümün önceki analizlerinin çoğu yerbilmezliği tam anlamıyla dahil etmemiştir. Olağandışı yorumlar gerektirmeyen yerel hal çözümü standart teoride yalnızca ufak bir düzeltme gerektirir. Geçmişte ileri sürülmüş olmasına rağmen bu çözüm için yeni argümanlar sunuyorum.

Ölçüm Gizemi: Kuantum Dünyayı Keşfetmek

Kuantum ölçümü meselesi acı verici ölçüde soyut olabildiği için, bu bölümü belirli örneklere bağlıyorum. Yarıklarda bir hangi-yol detektörünün mevcut olduğu ve olmadığı çift yarık deneyini hatırlayın. Detektör kapalı olduğunda her bir kuantum iki yarıktan da bağdaşık bir süperpozisyonda yayılır, ancak detektör açık olduğunda yayılmış kuantumun tümünün halinde görünüşe göre anlık bir değişim meydana gelir.

Bu, birleşik sistemi (detektör artı kuantum) aşağıdaki dolanık hale yerleştirir:

> "Kuantum ilk delikten çıkar ve detektör ilk yarığı gösterir" durumu, "kuantum ikinci yarıktan çıkar ve detektör ikinci yarığı gösterir" durumuyla süperpozedir.

Bu ölçüm hali kuantumun detektörle olan bir dolanıklığıdır. 9. Bölüm'de dolanıklığın ânında girişimi yok ettiğini, yerine iki tek yarıklı örüntülerin basit bir toplamının geçtiğini gördük. Detektör açık olduğunda yarıklardan diyelim tek tek 1.000 kuantum gönderdikten sonra, yaklaşık 500 tanesinin yarık 1'den ve 500 tanesinin de yarık 2'den geçtiği görülecektir. Kuantumlar –süperpozisyon halinde değil– karışım halinde yarık 1 veya yarık 2'den çıkıp ekrana çarpar.

Bir karışımdaki bir kuantum yazı tura atılmış fakat henüz sonucuna bakılmamış bir duruma benzer, fakat arada çok önemli farklar vardır. Yazı tura atışında olduğu gibi gözlemci sonucun ne olacağını bilmez. Büyük bir fark da yazı tura atışındaki öngörülebilir belirsizlik, prensipte paranın başlangıçtaki kesin hali, hava direnci, sıçramanın esnekliği vb. hakkında yeterli bilgi toplanmasıyla bertaraf edilebildiği halde, kuantum belirsizliğinin temel ilke olmasıdır. Yakında başka bir farkı da göreceksiniz: Bir kuantum karışımı dolanıklık tarafından oluşturulduğunda ölçüm gizemini çözmede kilit bir ipucu olan, anlaşılması güç, yerbilmez ilişkileri sürdürür.

Hangi-yarık ölçümü genel durumu sergiler: *Bir detektör bir kuantumla dolanık hale geldiğinde, kuantum bunun olası kesin sonuçlarının bir karışımına sıçrar.* Ancak teorik tahmin –yani ölçüm hali– deneysel olarak gözlemlenen karışımdan anlamsız bir şekilde farklı görünür. Daha önce belirtildiği gibi, ölçüm hali *karışım* değil, *süperpozisyondur.* Bu teorik süperpozisyon

gözlemlenen karışımla nasıl uyuşabilir? İki halin bir süperpozisyonu iki halin de aynı anda mevcut olması anlamına gelir. Teori şunu söyler gibidir: Detektörün yarık 1'i ve aynı zamanda yarık 2'yi gösterdiği bir makroskobik süperpozisyonumuzun olması ölçümün kesin bir sonucu olmadığına işaret eder! Ancak sağduyunun yanı sıra deney de detektörün iki yarığı birden değil, ya yarık 1'i ya da yarık 2'yi işaret ettiğini gösterir.

Bu ölçüm gizeminin en önemli noktasıdır. Ölçüm hali teorinin özünde anlamsızlık olduğunu akla getirir.

Başka ölçümler de aynı ikilemle karşılaşır. Bir foton fotoğrafik bir ekrana çarptığında, Şekil 5.1a'daki lekelere benzer tek bir küçük iz bırakır. Bu iz bir ölçümdür, burada ekran detektör gibi davranır. Tıpkı bir hangi-yarık detektörünün bir fotonu her iki yarık üzerindeki bir süperpozisyondan, yarıklardan biri üzerindeki bir karışıma çöktürmesi gibi, ekran fotonu tüm ekran üzerindeki süperpozisyonun çarpma öncesi halinden, ekranın gren 1, gren 2 veya gren 3'üne vb. çarpmasının bir karışımına çöktürür.

Ancak teoriye göre foton tüm grenlerle dolanık hale gelerek sonunda muazzam bir dolanık süperpozisyon halinde olur:

> "Foton gren 1'e çarpar ve gren 1 kararır" durumu "foton gren 2'ye çarpar ve gren 2 kararır" durumuyla, o da "foton gren 3'e çarpar ve gren 3 kararır" durumuyla ... süperpoze olur vb.

Teori bizi hiçbir kesin sonuca ulaştırmıyor gibi görünüyor. Ekran her grende bir çarpma tespit etmenin bir süperpozisyonunda görünür! Siz veya ben böyle kaleydoskobik bir fenomeni cumartesi gece geç vakitlerde gözlemlemiş olabiliriz, fakat ciddi bilimsel laboratuvarlar hiç böyle bir şey görmemişlerdir.

Umarım sizi bir problemimiz olduğuna ikna etmişimdir. Bu bölümde daha sonra bir çözüm önereceğim. Ancak ilk olarak problemin dramatize edilmiş ünlü bir haline ve bunu çözmek için iyi bilinen girişimlerden bazılarına bakalım.

Merak Uyandıran Schrödinger'in Kedisi Öyküsü

Bu fizikçilerin favori öyküsüdür. Schrödinger'in anlattığı şekliyle şöyledir:[5]

> Oldukça tuhaf düzenekler kurmak mümkündür. Bir kedi çelik bir bölmeye kapatılır. Bölmenin içinde şu aygıt bulunur (kedinin doğrudan müdahalesine karşı sağlama alınması gerekir): Bir Geiger sayacında çok az miktarda radyoaktif madde vardır, bu madde *o kadar* azdır ki, bir saat içinde atomlardan biri *bozunabilir*, fakat aynı zamanda, eşit olasılıkta, hiç bozunmayabilir de. Eğer bozunursa sayacın tüpü boşalır ve bir röle vasıtasıyla bir çekici serbest bırakır, çekiç de küçük bir siyanür asidi şişesini parçalar. Eğer bütün sistem bir saat kendi başına bırakılırsa ve *eğer* bu arada hiç atom bozunmadıysa kedinin hâlâ yaşadığı söylenebilir. Bütün sistemin psi-fonksiyonu bunu canlı ve ölü kedinin (ifademin kusuruna bakmayın) eşit parçalar halinde karışmış yani bulaşmış olduğu şeklinde ifade ederdi.
>
> İlk başta atomik boyutla sınırlanmış bir belirsizliğin makroskobik belirsizliğe dönüşmesi ve bu belirsizliğin daha sonra doğrudan gözlemle çözülebilmesi bu durumların bir özelliğidir. Bu, bizi [bunu] gerçekliği temsil eden geçerli [fakat] "belirsizlikler içeren bir model" olarak safça kabul etmekten alıkoyar. Bu

> [model], kendi başına, açık olmayan veya çelişkili olan hiçbir şeyin somut ifadesi olmazdı. [Vurgular orijinal metne ait.]

Schrödinger'in psi-fonksiyonu kuşkusuz kuantum halidir. Ölçüm durumu açıktır: Radyoaktif atomlar kuantum sistemidir ve kedi de atomların halinin bir detektörüdür. Atomlar ve kedi dolanık ölçüm halindedir:

> "Atomlar bozunmamış ve kedi canlı" durumu, "atomlar bozunmuş ve kedi ölü" durumuyla süperpozedir.

Schrödinger'in "makroskobik belirsizliğe" atıfta bulunması, Schrödinger'in teorinin hem ölü hem de canlı bir süperpoze kediyi öngördüğüne inandığını belli eder. Kuantum fiziğinin bu bariz öngörüsü, yani detektörün (Schrödinger'in örneğinde bir kedi) makroskobik olarak iki ayrı halin belirsiz bir süperpozisyonunda olması ölçüm problemidir.

Atom-detektör etkileşiminin her ikisini de atomların bozunduğu ya da bozunmadığı ve kedinin yaşadığı veya öldüğü bir karışıma yerleştirmesi beklenir. Ancak Schrödinger kuantum teorisinin oldukça farklı bir şeyi öngörür gibi göründüğüne dikkat çeker – yani "bozunmamış atomlar ve canlı kedi" durumunun "bozunmuş atomlar ve ölü kedi" durumuyla *süperpoze* olduğu dolanık durum. Bu görünüşe göre hem canlı hem de ölü bir kediyi tanımlar. Bu doğru olamaz. Eğer her kuantum ölçümü makroskobik cisimleri süperpozisyonlara yerleştiriyor olsa, bu tarz tuhaflıkları daima etrafımızda gözlemlerdik.

Schrödinger bir şeylerin yanlış olduğunun farkına vardı; ne de olsa öyküsüne "oldukça tuhaf" demişti. Ancak kuantum dünyasına dair bildiğimiz neredeyse her şey ölçümler-

den gelir, dolayısıyla ölçüm analizimizde bir şey yanlışsa bu büyük bir problem demektir. Hasıraltı edilmemelidir, ama genellikle hasıraltı edilip geçilir. Kuantum temelleri uzmanı Maximilian Schlosshauer ölçüm probleminin "kuantum fiziğinin tam da merkezinde bulunan, geri döndürülemez biçimde çürümüş bir şey; bataklık alana gelişigüzel dikilmiş bir ev gibi, bu teorik yapının her an çökmesine yol açabilecek bir şey mi olduğuna dair acil bir uyarı"[6] olup olmadığını soruyor.

Uzun süredir kuantum temelleri üzerinde mutabakata varılmasını önleyen başlıca engel olan ölçüm problemi fizikçileri farklı kamplara bölmüştür. Bazıları ölçümün ancak teoriyi temelinden değiştirerek çözülebilecek, üstesinden gelinemeyen bir tutarsızlık teşkil ettiği, bazıları da kuantum fiziğinin özel bir biçimde ve genellikle ezoterik şekilde yeniden yorumlanması gerektiği sonucuna varırlar. İki yaklaşımı da ele alacağız.

Bir mutabakat olmadığından, fizikçilerin çoğu, yorum yerine hesaplama yaparak bu çok ciddi problemi hasıraltı eder. Pragmatik bir bakış açısından bu anlaşılabilir bir şeydir, çünkü teori kişi mantıksal tutarlılık hakkında çok fazla soru sormadığı müddetçe mükemmel işler. Ancak ikilemin de kuşkusuz çözülmesi gerekir. Ölçüm problemini teoriyi yeniden yorumlayarak veya değiştirerek çözme konusunda insanı bunaltacak kadar çok öneri vardır. Aşağıdaki bölümler en çok bilinen beş önerinin öykülerini anlatır.

Kopenhag

Kopenhag yorumu[7] kuantum teorisinin 1920'lerin sonlarında kurulması sırasında geliştirilen ve Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born ve başka bilim insanlarının benimsedikleri bilimsel ve felsefi ilkeleri kapsar. Kuantum yorumlarının içinde en eskisi olan bu yorum birçok öncünün kimi zaman farklı görüşlerini kaynaştırır ki, bu öncülerin çoğu Bohr'un

Kopenhag'daki Teorik Fizik Enstitüsü'yle yakın temaslarını korumuşlardır. Bu terim sıklıkla kullanılsa da Kopenhag yorumunun kesin bir tanımı yoktur ve farklı yazarlar bununla ilgili farklı ve hatta çelişen görüşlerini ifade ederler. Aslına bakarsanız, dikkatli bir analiz bunun hiç de tutarlı bir yorum olmadığı sonucuna varır, çünkü üç ana taraftarı bile temelleri hakkında fikir birliğine varamamışlardır. Örneğin Bohr makroskobik ölçüm aletlerini tümüyle kuantum dışı, klasik kavramlar yönünden tanımlamanın gerekli olduğunda ısrar ederken, Heisenberg ve Born aynı fikirde değillerdi. Bohr'a göre sadece klasik fizik sezgisel olarak erişilebilirdi ve dolayısıyla "gerçek" şeylerle ilgiliydi, ancak Heisenberg kuantum dilinin fizikçiler açısından sezgisel olarak anlamlı olduğunu ve gerçek şeyleri ve süreçleri tanımladığını ileri sürdü.[8]

Bu tarz anlam karmaşalarına rağmen Bohr, Heisenberg, Born ve meslektaşlarının bu görüşleri kuantum dünyasını saf (veya belki de "salt" demeliyim) matematiğe kıyasla kavramsal yönden *anlamaya* yönelik en eski genel girişimdi ve genellikle ortodoks yorum olarak tanımlandı. Bu yorumun ana hatları kuantum fiziği ders kitaplarının çoğunun temelini oluşturur; günümüzde o kadar yaygındır ki, birçok fizikçi bunu kuantum fiziğini incelemenin tek ciddi yolu olarak görür. Kopenhag yorumu 1920'lerin ve 1930'ların mantıksal pozitivizminden etkilendi. Bu felsefe "araçsallığa" –bilimsel kavramların belirli laboratuvar işlemleri olarak formülleştirilmeleri gerektiği görüşüne– önem veren, bilim odaklı bir felsefeydi. Dolayısıyla bu yorum laboratuvar ölçümlerine –bir görüntüleme ekranı üzerindeki ışık parlamalarının makroskobik gözlemlerine, elektronik olarak kontrol edilen bir ibrenin konumuna, vb.– odaklanır.

Bohr'un görüşlerine göre fiziksel gerçekliği kuantum dünyasına atfetmekten kaçınmalıyız, çünkü onu doğrudan

gözlemleyemeyiz. Dolayısıyla Kopenhag yorumu kuantum fiziğinin nesnel gerçekliği tanımlamadığını, yalnızca zorunlu olarak gizemli bir mikroskobik dünyanın ipuçlarıyla ilgilendiğini ileri sürer.

Bohr'a göre kuantum halleri nesnel gerçekliği değil, sadece kendi gerçeklik bilgimizi temsil ediyordu. Bu, önceki iki yüzyıllık nesnel bilimden çarpıcı biçimde ayrılan öznel bir görüştü. Heisenberg daha gerçekçi bir görüşe eğilimli olmakla birlikte, Bohr kuantum hallerinin ne gerçek alanları ne de gerçek parçacıkları temsil ettiğini, bunun yerine mantıklı bir gözlemcinin, gözlemcinin bilgisine dayalı ölçümlerin sonuçlarına atfetmesi gereken olasılıkların bir kaydını temsil ettiğini düşünüyordu. 1927'de İtalya'nın Como şehrindeki ünlü konuşmasında Bohr kuantumların dalga veya parçacık olmadıklarını, "özellikleri ancak diğer sistemlerle etkileşimleri yoluyla tanımlanabilir ve gözlemlenebilir olan soyutlamalar" –klasik olarak tanımlanabilir ölçüm aletleri gibi sistemler– olduklarını vurguladı.[9] Bohr bu tarz soyutlamaların ötesine geçmek istemiyordu, çünkü mantıklı bir pozitivist olarak bu klasik aletlerin okumalarının doğanın en doğrudan ve güvenilir tanımını oluşturduklarını varsayıyordu. Bohr kuantum fiziğine kalıcı bir öznellik notu ekledi; buna göre kuantumların hiçbir özelliği yoktu; ölçüldükleri zaman hariç belki de mevcut bile değildiler. Bu, birçok fizikçi arasında hâlâ varlığını sürdüren, gerçekçi olmayan bir görüştür.

Kopenhag yorumu, diyelim bir elektronun kuantum hali Ψ'nin karesi, uzaydaki belirli bir x noktası olarak değerlendirildiğinde (Şekil 7.1 ile kıyaslayın), elektronun "x'te bulunma" olasılığı olarak yorumlar. "x'te" bulunduğu söylendiği için elektronun bir alan yerine küçük bir parçacık olduğunu varsaymalıyız. Bu parçacık yorumunun, örneğin eğer çift yarık deneyi boyunca sürdürülürse çelişkilere yol açabileceğini

görmüştünüz. Kopenhag yorumu, "Elektron ölçülmeden tam önce ne yapıyordu?" gibi soruları anlamsız diye reddederek bu tarz çelişkilerden kaçınır. Bir kuantum bir ekrana çarptığında meydana gelen gibi bir kuantum halinin çöküşünü, gerçek bir fiziksel oluşumdaki değişim yerine, yeni bilginin kaydedilmesinden kaynaklanan ani bilgi güncellenmemizi temsil eden, fiziksel olmayan, –6. Bölüm'deki altın ve gümüş para örneği gibi– öznel bir fenomen olarak görür.

Sözün özü, Kopenhag yorumu kuantum fiziğini gerçekçi olmayan bir şekilde yorumlayarak saptama çabasıdır.

Yerbilmez Gizli Değişkenler

Louis de Broglie 1927'de Kopenhag yorumuna bir alternatif sundu ve David Bohm da 1952'de bunu *pilot-dalga modeli*[10] şeklinde geliştirdi. 6. Bölüm'de bu model ve çift yarık deneyine uygulanması tanımlandı. Pilot-dalga modeli, kuantum rastgeleliğinden kaçınarak ve klasik fiziğe benzer bir deterministik teoriye dönerek kuantum fiziğini saptamayı hedefler. Bir yorumdan daha fazlası olan bu model öne sürülen yeni bir mikroskobik fizik teorisidir, çünkü standart kuantum fiziğinde bulunmayan fiziksel oluşumlar öne sürer: Newtoncu olmayan bir tarzda hareket eden, Newtoncu nokta parçacıklar. Böyle bir parçacık, sistemin elektronlarının, protonlarının vs. her birine atanır. Sistemin Schrödinger denklemine uyan Ψ kuantum alanı bu parçacıkları yönlendirir yani "pilotluk yapar". Bu model hem dalgaların hem de parçacıkların gerçek olduklarını ve aynı anda var olduklarını iddia ederek *dalga-parçacık ikiliği ikilemini* çözer. Model deterministiktir; tüm parçacıkların başlangıçtaki konumları, süratleri ve alanın başlangıçtaki hali dikkate alındığında, parçacıkların ve alanın başka herhangi bir zamandaki hali tahmin edilebilir. Her bir parçacık daima belirli bir noktadadır, parçacık süperpozis-

yonları yoktur ve alan da Schrödinger'in denkleminin tanımladığı düzgün gelişmeyi izler.

Ψ pilot dalgasının bütün parçacıklar üzerinde büyük mesafelerde ânında etki etmesi modele klasik fiziğin tam tersi olan, güçlü bir biçimde yerbilmez kuantum sıçraması özelliği verir. 6. Bölüm'de bu modelin görelilik dışı durumlar için (düşük enerji, düşük hızlar ve kuantumların oluşmaması veya yok olmaması) standart kuantum fiziğinin istatiksel tahminlerini ürettiğini gördük. Gelgelelim nedenlerin (pilot dalga) uzaktan ânında etki ettiği bir teoriden beklenebildiği gibi, özel görelilikle çelişir gibi görünür ve göreli kuantum alanı teorisinin daha yüksek enerji durumları için deneysel olarak kanıtlanmış tahminlerini üretemez gibidir. Öte yandan standart kuantum fiziği o kadar bariz olmayan bir şekilde yerbilmezdir ve görelilikle çelişmemeyi başarır.

Pilot dalga modeli salt teorik bir anlamda çığır açan bir buluştu, çünkü gizli değişkenlerin yardımıyla bile olsa kuantum fiziğinin tahminlerini üreten, salt deterministik bir modelin mümkün olmadığı düşünülmüştü. Bohm bu görüşü bilfiil kuantum fiziğinin tahminlerini üreten deterministik bir gizli değişkenler teorisi oluşturarak çürüttü. 6. Bölüm'de gördüğümüz gibi, bu modeldeki gizli değişkenler varsayılan Newtoncu parçacıkların başlangıçtaki konum ve süratleridir. Ancak model fizikçiler tarafından yaygın biçimde kabul görmemiştir, çünkü tam olarak kuantum fiziğinin tahminleri dışında yeni tahminler önermez; aşırı yerbilmezliği fiziksel değil gibi görünür ve yüksek enerji fiziğini kapsayabileceği kanıtlanmamıştır.

Öte yandan pilot dalga modelinde bir ölçüm problemi yoktur. Ölçülebilir oluşumlar detektörlere çarpabilen ve tıpkı klasik fizikte olduğu gibi bunların kaydetmelerine veya kaydetmemelerine neden olabilen Newtoncu parçacıklardır.

Kuantum fiziğinin profesyonel olmayan belirsizliği olarak değerlendirdiği şeyi, özellikle ölçüm hakkındaki karışıklığını açıkça eleştiren John Bell'in bu teoriye sıcak bakması şaşırtıcı değildir.[11]

Bir Kendiliğinden Çökme Mekanizması

Makroskobik bir aygıt süperpoze bir kuantum halini ölçtüğünde, teorik olarak öngörülen ölçüm halinin, kuantum-artı-aygıtın kullanışsız bir "Schrödinger'in kedisi" süperpozisyonu gibi göründüğünü gördünüz. Makroskobik aygıt bile süperpoze hale gelir gibidir. Bu da kuantum fiziğine yeni bir mekanizma eklemenin eğer süperpozisyonlar makroskobik oranlara ulaşacak olurlarsa bunları hızla ve kendiliklerinden çökmeye zorladığını akla getirir. Bu takdirde Schrödinger'in kedisi hızla canlı veya ölü hale çökerek ölçüm problemini çözer.

Üç İtalyan; Trieste'deki Uluslararası Teorik Fizik Merkezi'nden Giancarlo Ghirardi, Pavia Üniversitesi'ndeki Fizik Departmanı'ndan Alberto Rimini ve Trieste Üniversitesi'ndeki Fizik Departmanı'ndan Tullio Weber, isimlerinin baş harflerinden türetilmiş *GRW modeli* adlı böyle bir mekanizmayı kuramsallaştırmışlardır.[12] Doğanın yeni bir ilkesi olarak zaman zaman her kuantumun kendiliğinden bir çökme haline sıçradığını varsayarlar. Bu tarz bir sıçramanın zamanı ve yeri rastgeledir.

GRW modelinin bağlı olmayan tekil kuantumlar üzerindeki etkisi neredeyse sıfırdır ve birkaç, hatta birkaç bin kuantumdan oluşan sistemler için kuantum fiziğinin öngörülerini değiştirmez, fakat makroskobik süperpozisyonlar üzerinde büyük bir etkisi vardır. Yazarların çökme mekanizmalarını akıllıca seçmelerinin nedeni şudur: Bir süperpoze kuantum bir "GRW sıçraması" yaptığında kuantumun önceki süperpo-

zisyon hali ânında uzaydaki tek bir x noktası etrafındaki küçük bir bölgede var olan (sıfır olmayan) bir hale çöker.[13] Bu nokta rastgeledir, geleneksel kuantum fiziğinde olduğu gibi, olasılıklar bu noktada değerlendirilen Ψ kuantum alanının karesine eşittir. Dolayısıyla Ψ'nin, Ψ^2'nin büyük olduğu civar noktalarda çökme olasılığı daha fazla ve Ψ^2'nin küçük olduğu civar noktalarda daha azdır. Çökme zamanına gelince, model gelecekteki bütün zamanların eşit derecede olası olduğunu ve tek bir kuantumun sıçramasının ortalama olarak 100 milyon yılda bir olduğunu belirtir! Dolayısıyla eğer izole bir elektronun çökmesini görmek istiyorsanız çok ama çok sabırlı olmalısınız. Binden fazla proton, nötron ve elektron içeren C_{70} gibi oldukça ağır bir kuantum içinde bile, bu kuantumlardan biri, modele göre ortalama olarak sadece 100.000 yılda bir kendiliğinden bozunur.

GRW modelinin iyi yanı, Schrödinger'in kedisi gibi, bir ölçümün sonucu olarak meydana geldikleri öngörülen makroskobik süperpozisyonları göz önüne aldığımızda belli olur. Makroskobik cisimler zilyonlarca kuantum içerir. Bir kilogram demir 10^{25} demir atomu yani 10^{27} kuark ve elektron içerir. Bu da GRW modeline göre bir kilogram demirde bir kuantumun ortalama olarak saniyenin her trilyonda birinde çöktüğüne işaret eder!

10^{27} kuantum arasındaki bir kuantum çok gibi görünmeyebilir fakat tek bir çökmenin bile muhtemelen Schrödinger'in kedisi gibi büyük makroskobik süperpozisyonlar için muazzam çıkarımları vardır. Nedeni şudur: GRW modelinde büyük süperpozisyonlar oldukça kırılgandır. Eğer sadece bir kuantum makroskobik bir süperpozisyonun bir dalındaysa, (örneğin canlı kedide veya ölü kedide) GRW mekanizması çöken atomdan makroskobik bir mesafeyle ayrıldığı her yerde bütün süperpozisyonun ânında çökmesine neden olur.

Dolayısıyla GRW modeli tam olarak siz ne yapmasını istiyorsanız onu yapar; makroskobik süperpozisyonları tek bir dalın küçük bir kısmına çökmeye zorlar ve esasen daha küçük sistemler üzerinde gözlemlenebilir bir etkisi yoktur.

Problem çözüldü mü? Bazı itirazlar var. İlk olarak, GRW modelinin tatmin edici bir göreli versiyonunu bulmak zor olmuştur. Dolayısıyla bu model elektron-pozitron çifti oluşturulması ile Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve yüksek enerjili astrofizikte sürekli olarak meydana gelen fenomenler gibi yüksek enerjili fenomenleri başarıyla dahil edememiştir. Bazı araştırmacıların bu problemi çözmeye yönelik çabaları yalnızca kısmen başarılı olmuştur.[14]

Daha da önemlisi, GRW modelinin hiçbir deneysel kanıtı –dolanıklık yönünden açıklanamayacak hiçbir çökme– gözlemlenmemiştir. Üstelik 8. Bölüm'de son deneylerde GRW mekanizmasının çökmeye neden olacak şekilde devreye girdiğini gösteren hiçbir belirti olmaksızın makroskobiğe yakın süperpozisyonlar gözlemlendiğini gördük. Belki de kısa süre sonra deneysel kanıtlar bu ilginç modeli geçerli kılacak veya bertaraf edecektir.

İnsan Zihni Kuantum Halini Çöktürür

Kuantum teorisinin öncü matematiksel analizcisi John von Neumann 1932 tarihli çığır açıcı eseri *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*'in çoğunu kısıtlı, laboratuvar anlamında anlaşılan "ölçümle" birlikte kuantum ölçümlerine ayırmıştır.[15] Neumann kuantum hallerinin 7. Bölüm'de araştırdığımız iki mekanizma vasıtasıyla değiştiklerini fark etti. Bunlardan biri Schrödinger'in denklemine uyan, normal gelişim mekanizmasıydı. Ancak sistem ölçülürse farklı bir şey olur. Von Neumann'a göre ölçüm "süreksiz, nedeni olmayan ve anlık etkili" müdahaledir.[16]

Neumann o zamandan bu yana çalışan fizikçilerce kullanılan standart uygulamaya karşılık gelen, ölçümler sırasında meydana gelen bir süreci varsayar: Öngörülen süperpozisyonu, dallarından biri arasında yapılan rastgele bir seçimle değiştirmek. Örneğin,

> "bozunmuş çekirdek/ölü kedinin" "bozunmamış çekirdek/canlı kediyle" süperpozisyonunu

"bozunmuş çekirdek/ölü kedi" veya "bozunmamış çekirdek/canlı kedi" arasında yapılan rastgele bir seçimle değiştirmek. Gözlemlediğimiz şey budur fakat bu varsayımın diğer kuantum ilkeleriyle, özellikle Schrödinger'in denklemiyle mantıksal tutarlılığı konusunda bir soru işareti vardır.[17]

Bunları 1932'de yazan von Neumann kesin sonuçlar probleminin tam anlamıyla farkında değildi. Onun yerine şu tutarlılık meselesinden endişeleniyordu: Süperpozisyonu karşılık gelen karışımla değiştirmek yerine (von Neumann'ın varsaymış olduğu gibi) süperpozisyonu ölçmeye karar versek ne olurdu? Örneğin tek bir süperpoze elektronla yapılan çift yarık deneyinde elektronu bir hangi-yarık detektörüyle ölçmenin sonucunun aşağıdaki gibi olduğunu gördük:

> "Elektron yarık 1'den çıkar, aygıt yarık 1'i gösterir" durumu, "elektron yarık 2'den çıkar, aygıt yarık 2'yi gösterir" durumuyla süperpozisyon halindedir.

Şimdi von Neumann'ın önerisini izler ve *bu* süperpozisyonu ölçersek bu ikinci ölçümün sonucu aşağıdaki gibi olur:

> "Elektron yarık 1'den çıkar, ilk aygıt yarık 1'i gösterir ve ikinci aygıt da *ilk* aygıtın yarık 1'i gösterdiğini gösterir" durumu, "elektron yarık 2'den çıkar, ilk ay-

gıt yarık 2'yi gösterir ve ikinci aygıt ilk aygıtın yarık 2'yi gösterdiğini gösterir" durumuyla süperpozisyon halindedir.

Bu ikinci olağandışı tahmini uygun gelen karışımla değiştirdiğimizde, ilk olağandışı tahmini uygun gelen karışımla değiştirdiğimizde elde ettiğimiz aynı deneysel tahminleri elde eder miyiz?

Von Neumann'ın analizi teorinin bu anlamda tutarlı olduğunu gösterir. Yani tahminleri değiştirmeden, kuantumun ölçümündeki veya ilk detektörün ölçümündeki süperpozisyonun yerine geçen "von Neumann kesiği" yerleştirilebilir.

Bu hassas bir matematiğe ve bir "von Neumann ölçüm zinciri" kavramına yol açar. İşte bir örnek: Bir sensör yarıklardan birinden çıkan bir elektron tespit eder, bir elektron yükselticisi sensörün sinyalini güçlendirir, böylece küçük bir elektrik akımı oluşturur, bu akım makroskobik bir işaretçiyi hareket ettirerek yarık 1 veya 2'yi göstermesini sağlar, işaretçinin konumunun bir görüntüsü bir bilim insanının gözünün retinası üzerine düşer ve bir sinyal bilim insanının gözünden bilincine yol alarak ona işaretçinin yarık 1 veya yarık 2'yi gösterdiğini söyler. Bu nedensel etkiler zinciri boyunca, gelişigüzel bir karar olan, olağandışı süperpozisyonu çökmüş halle değiştirme kararımızı nerede vereceğimiz fark etmez. Dolayısıyla bu değiştirmeyi ölçümü yapan bilim insanının bilinçli zihninde yapmayı seçebiliriz.[18]

Böylece kuantum fiziğinin *bilinç yorumu* doğdu. Von Neumann'ın analizinde meselenin tümü biraz belirsizdir, fakat görünüşe göre von Neumann, gözlemcinin öznel bilincinin seviyesindeki olağandışı süperpozisyonun çökmüş halle *meşru bir şekilde* değiştirilebileceğini önerir. Von Neumann'ın görüşüne göre insan bilinci içinde eşsiz bir biçimde kuantum

hallerini çöktüren, bilinmeyen bir şey meydana gelir gibidir. *Bu* çökme bir kez meydana geldiğinde, başka çökmeler von Neumann olaylar zincirinin en başına kadar giderek orijinal süperpozisyonu çöktürür.

Von Neumann'ın bu analizi gerçekte nasıl değerlendirdiğinden bağımsız olarak, Nobel Ödüllü kuantum fizikçisi Eugene Wigner'in 1960'ların başlarında bilincin kuantum ölçüm sürecinde temel bir rol oynadığını öne sürdüğüne şüphe yoktur. "Zihin-Vücut Meselesi Üzerine Görüşler"[19] başlıklı makalesi büyük ölçüde von Neumann'ın çalışmasına dayanır. Wigner bir kuantum ölçümü sonucunun bilinçli bir gözlemcisinin kendisinin olağanüstü süperpozisyon halinde değil, bu hallerden sadece birinde olması gerektiğini, böylece herhangi bir bilinçli gözlemcinin von Neumann süperpozisyonlar zincirini çöktürmesi gerektiğini ileri sürer. Gelgelelim 1970'te bu görüşünden vazgeçmiştir.

Wigner'in 1970'te görüşünü değiştirmesine rağmen bilinç hipotezi hâlâ ciddiye alınıyor.[20] Eleştirenlerin genellikle dikkat çektikleri gibi, bu hipotez şu tarz itirazlara karşı savunmasızdır: Hangi sistemlerin bir kuantum halini çöktürecek yeterli bilinçleri vardır? Sadece araştırma fizikçilerinin mi? Çocukların mı? Hayvanların mı? Bir laboratuvar gerekli mi? İnsanlık öncesi 4,5 milyar yıllık tarihte kuantum halleri çökmüyor muydu? Kuantum halleri evrende başka yerlerde çökmez mi? İtirazlar en iyi, ölçümün dekoherans yaklaşımının (11. Bölüm) bir lideri olan Wojciech Zurek'in yorumuyla özetlenebilir: "Fiziksel evren ile bilinç arasındaki sınır ... hiç de rahatça fizik yapılabilecek bir yer değildir."[21]

Bilincin kuantumların çökmesine neden olduğu hipotezi deneylerle kontrol edilebilir. Aralarından bazıları bilim insanı olan insanlar bu görüşe inandıkları için böyle bir deney yapmaya değer. 2006'da Cambridge Üniversitesi Fizyoloji,

Gelişim ve Sinir Bilimi Departmanı'ndan Roger Carpenter ve Andrew Anderson, Schrödinger'in kedisinin özünü kavrayan fakat insaflı bir şekilde bir kediyi feda etmeyen bir deney yaptılar. Plan, deney sonucuna dair bilgiyi iki gözlemci arasında ikisinin de sonucu bilemeyeceği bir şekilde bölmektir. Gözlemciler daha sonraki bir zamanda bilgiyi paylaşarak sonucu öğrenirler. Böylece soru şudur: Çökme deney zamanında mı yoksa gözlemciler sonucun farkına vardıklarında mı oldu?

Carpenter ve Anderson kapalı bir kutunun içine az miktarda radyoaktif radyum, iki çekiç, bir Geiger ışıma detektörü, bir elektronik zamanlama cihazı ve detektörün radyuma sadece 0,19 saniye (bir alfa kuantumunu tespit etme olasılığının %50-%50 olacağını garanti eden bir aralık) maruz kalmasını sağlayan kalkan malzemesi yerleştirdiler. 0,19 saniyelik "pencere" süresince meydana gelen bir alfa bozunması çekiç 1'i serbest bırakır, çekicin düşmesi sonucu kırmızı bir top serbest kalır ve büyük kutu içindeki bir çıkış kutusunun içine yuvarlanır. Eğer zaman penceresi sırasında alfa bozunması olmazsa çekiç 2 elektronik olarak serbest kalır ve siyah bir topun çıkış kutusuna yuvarlanmasını sağlar. Çekiç 1 ve 2 sırasıyla ölü ve canlı kediyi temsil eder.

Bununla birlikte A gözlemcisi aygıtı daha önceden topun doğru veya yanlış bilgiyi sağlayacağı şekilde ayarlamıştır. Eğer toplar sonucu doğru olarak gösterecek şekilde yüklenirlerse (kırmızı top: bozunma, siyah top: bozunma yok) "doğruyu" ve toplar sonucu yanlış olarak gösterecek şekilde yüklenirlerse "yanlışı" teyit eden, elektronik olarak sağlanan bir "doğruluk kartı" temin etmiştir. A gözlemcisi düzeneğin doğru mu yoksa yanlış mı olacağını rastgele belirlemek için bir rastgele sayı üreteci kullanır. Daha sonra B gözlemcisi deneyi başlatır ve çıkış kutusundan rengi sonucu gösteren topu alır, fakat sağlanan bilginin doğru mu yanlış mı olduğunu bilmez.

Dolayısıyla deneyin her yapılışının ardından A gözlemcisinin *yanlış* veya *doğruyu* veren bir kartı vardır ve B gözlemcisinin de elinde kırmızı veya siyah bir top vardır, fakat ikisi de kart ve top kıyaslanana kadar sonucu bilmez.

Daha sonra A gözlemcisi laboratuvara döner ve doğruluk kartını gözlemlerken B gözlemcisinden hangi topu aldığını bildirmesini ister. Bu noktada gözlemciler deney sonucunun farkına varırlar. Daha sonra gözlemciler kutuyu açar ve deney sonucunu doğrudan gözlemlerler. İki kişi bu deneyi 18 kez tekrarladı, her biri denemelerin yarısında A gözlemcisinin görevlerini ve diğer yarısında da B gözlemcisinin görevlerini yaptı. Her denemede şunu gördüler: Kutunun içine bakıldığında, düşen çekiç doğruluk kartı ve top birleşiminden –tamamen önceki deneyin belirlediği bir birleşim– elde edilen sonuçla uyuşuyordu. Dolayısıyla çökme (çekicin düşmesi) daha sonra, gözlemciler sonucu bildiklerinde değil, deney meydana geldiğinde olmuş olmalıdır.

Bu deneyi yapmaya değer, fakat benim naçizane görüşüm, bu sonucu tahmin edememek için insanın kafası samanla dolu olmalı. Bunu akran denetiminden geçmiş bir yayında ciddi bir şekilde rapor haline getiren Carpenter'ın ve Anderson'un önünde şapkamı çıkartıyorum.[22]

Her Ölçüm Başka Evrenler Yaratır

Çoklu dünyalar *yorumu*,[23] meydana geldiğine dair hatırı sayılır miktarda kanıt olmasına rağmen (atomlardaki kuantum sıçramaları, hangi-yol detektörlerinin kullanıldığı çift yarık deneyleri), meydana gelmediğini varsayarak kuantum halinin çökmesi meselesini bertaraf eder. Çoklu dünyaları basit bir örnek vasıtasıyla anlamak için bir görüntüleme ekranına çarpan bir elektronu düşünün. Gördüğümüz gibi, standart teori elektronun ekranın atom boyutundaki zilyonlarca böl-

gesiyle dolanık hale geldiğini ve bu bölgelerden birine çöktüğünü öngörür. Çoklu dünyalarda elektron çökmez, bunun yerine *gerçeklik zilyonlarca farklı gerçekliğe ayrılır, bunların her birinde elektron atom boyutundaki farklı bir bölgeye çarpar.*

Bu nefes kesici bir şeydir. Tıpkı elektronun ekrana çarpması gibi, elektronun kuantum hali de zilyonlarca dalı olan muazzam bir elektron-artı-ekran süperpozisyonudur. İlk dalda elektron ilk atomda sonlanır, ikinci dalda ikinci atomda sonlanır, üçüncü dalda üçüncü atomda sonlanır, vs. Bu noktaya kadar çoklu dünyalar standart teoriyle uyuşur. Standart yaklaşım ekranın yaptığı tespitin bu dolanık halin dallarından sadece birine çökmesine yol açtığını varsayar; elektronun diğer atomlardan birinde değil de 5.139.428.371 atom numarasında sonlanması gibi. Gelgelelim bu yorum bu zilyonlarca dalın aslında var olduğunu ve sonsuza dek sürdüğünü ileri sürer.

Fakat bu durumda neden zilyonlarca çarpma görmeyiz? Bu yorumun yanıtı şudur: Bizzat evren zilyonlarca farklı evrene ayrılır, bunların her birinde dallardan yalnızca biri meydana gelir! Bulunduğumuz evrende elektron 5.139.428.371 atom numarasında sonlanır, fakat siz ve diğer her şey bir şekilde aynı anda diğer evrenlerde de bulunursunuz ve bu evrenlerde elektron diğer bölgelerde sonlanır. Dolayısıyla çoklu dünyalar düzeni ekrandaki atom sayısı kadar evren gerektirir; sadece bu tek deney ve sadece bu tek elektron için. Bu deneyde ikinci bir elektron gönderdiğinizde başka bir büyük evren grubu yaratırsınız. Bu yorum varsayımlarda ekonomik olabilir (çökmeyi bertaraf etmesiyle) fakat evrenlerde müsriftir.

Bazı insanların çoklu dünyalardan hoşlanmasının nedenlerinden biri kuantum rastgeleliği ortadan kaldırmasıdır. Hiçbir tekil sonuç diğerlerine tercih edilmez. Hepsi meydana gelir, fakat farklı evrenlerde. Çoklu dünyalar sizin "fakat ben

bu dünyalardan sadece birinde gerçekten varım" diye düşünmenizin hata olduğunu, çünkü sadece birinde bulunmanıza rağmen gerçekte hepsinde var olduğunuzu söyler.

Bu fikir günümüzde, 1980'lerde Alan Guth ve Andrei Linde'nin geliştirdikleri "kozmik enflasyon hipotezi" nedeniyle daha mantıklı görünebilir.[24] Enflasyon hipotezi, büyük patlamanın başlangıcından sonraki saniyenin trilyonda trilyonda trilyonda birinde başlayan, belirli bir "şişen kuantum alanının", evreni çok kısa bir süreliğine ışıktan çok daha yüksek hızlarda ilerleyen, katlanarak ivmelenen kısa bir genişleme patlamasına sevk ettiğini varsayar. Bu hipotez büyük patlamanın yaydığı kozmik arka plan ışıma gözlemlerinden kayda değer bir deneysel destek almıştır.[25] Enflasyon hipotezi enflasyonun en azından evrenin bazı bölgelerinde sonsuza dek devam ederek sonsuz sayıda evren ürettiğini öne sürer; bu, birçok astrofizikçinin oldukça ciddiye aldığı bir olasılıktır. Gelgelelim enflasyon çoklu evrenin çoklu dünyalar yorumuyla (büyük patlamayla çok az ortak noktası var gibi görünen bir yorumla) nasıl bir ilgisi olduğunu görmek zordur.

Evet, bazı fizikçiler bunu ciddiye alıyorlar.[26] Her ne zaman bir foton, elektron veya başka bir kuantum, ölçüm benzeri bir süperpozisyonda dolanık hale gelse, evrenin böyle muazzam şekilde dallandığı farz edilir. Bu tarz dolanıklıklar çoklu dünyaların varsaydığı bütün diğer evrenlerin yanı sıra bütün geçmişte, bütün evrende sürekli olarak meydana gelir. Dolayısıyla şimdiye kadar hepsi de kendi ayrı ve farklı kuantum evrimlerini geçirmekte olan ve sürekli olarak ayrılan oldukça fazla evren vardır. Çoklu dünyalar teorisyeni Bryce DeWitt'in belirttiği gibi, "Her yıldızda, galakside, evrenin her uzak köşesinde meydana gelen her kuantum geçişi gezegenimizdeki yerel dünyamızı kendisinin sayısız kopyasına bölüyor."[27]

Ben dahil bazı fizikçiler için bu kabul edilmesi biraz güç

bir şey. Tahmin edebileceğiniz gibi, çoklu dünyalar hipotezini eleştirenler var. Occam'ın usturası bizi ölçüm probleminin en basit çözümünü seçmemizi sağlar ve çoklu dünyalar önerisi birçok insanın basit olarak adlandıracağı bir şey değildir. Üstelik her ne kadar teorisyen David Deutsch bazı ideal düşünce deneyleri önermiş olsa da, çoklu dünyaların deneysel olarak nasıl doğrulanabileceğini veya çürütülebileceğini görmek zordur.[28]

Kesin Sonuçlar Probleminin Yerel Hal Çözümü

Belki de ölçüm problemini normal kuantum fiziği içinde çözmek ve önceki beş bölümde ileri sürülenler gibi değişiklikler veya özel yorumlar olmaksızın, kuantumların ve hallerinin nesnel olarak doğal dünyanın gerçek özellikleri olduğu, geleneksel, gerçekçi bir tarzda yorumlamak mümkündür. Bu bölümün geri kalanında Schrödinger'in kedisi için tam da böyle bir çözüm önerisinin serüveni anlatılıyor. Fizikçilerin bu öneri hakkındaki nihai mutabakatları ne olursa olsun, bu tartışma kuantum fiziği hakkındaki bilginizi derinleştirmelidir. Önerilen çözüm standart kuantum ilkelerini ne değiştirir ne de yeniden yorumlar. Bunun yerine bu ilkeleri dolanık ölçüm halinin (Schrödinger'in kedisi hali), aslında beklediğimiz gibi rastgele fakat buna rağmen kesin olan sonuçları öngördüğünü göstermekte kullanır. Bu, deneylerle uyuşur ve göreceğimiz gibi hiç de paradoksal değildir.[29]

Bu bölümde (belirleyebildiğim kadarıyla) ilk olarak 1968'de Josef Jauch'un kuantum temelleri üzerine kapsamlı monografında[30] sunduğu ve o zamandan bu yana ondan bağımsız olarak birkaç kez önerilmiş bir argümanı ele alıyoruz.[31] Ne yazık ki, *yerel hal çözümü* adını vereceğim bu çözüm ikna edici ve doğrudan olmasına ve uzman yorumu olmaksızın standart kuantum fiziğinden mantıksal olarak çıkmasına rağ-

men genellikle eleştirilmiş veya göz ardı edilmiştir. Sonraki bölüm yerel hal çözümünün, özel göreliliğin ışık hızını aşan iletişimi yasaklamasının gerekli bir sonucu olduğunu gösteren ikinci bir bağımsız görüş vasıtasıyla bu çözümü doğrular. Bu görüş ölçüm halinin yerbilmez doğasına dayanır. Standart kuantum fiziğinin ve özel göreliliğin birlikte yerel hal çözümünü *gerektirdiğini* kanıtlar. Bazı uzmanlar Jauch'un çözümünde hata buldukları için bu bölümün sonuna belli başlı itirazları yanıtlayan, tercihe bağlı bir ek yerleştirdim.

Tipik bir ölçüm örneği olarak tek bir elektronun çift yarıktan geçtiği ve yarıklarda bir hangi-yol detektörünün olduğu deneye geri dönelim. Bildiğiniz gibi, detektör ve elektron dolanık hale gelerek ölçüm halini oluştururlar:

> "Elektron yarık 1'den çıkar ve detektör yarık 1'i gösterir" durumu, "elektron yarık 2'den çıkar ve detektör yarık 2'yi gösterir" durumuyla süperpoze olur.

Bu halden nasıl bir anlam çıkarabiliriz? Deneysel olarak elektron *ya* yarık 1 *ya da* yarık 2'den çıkma *karışımında* olduğu halde (9. Bölüm), az evvel sözünü ettiğimiz teorik ölçüm hali, iki yarıktan birden çıkan bir elektronu ve kesin bir sonuç olmaksızın, her iki yarığı da gösteren bir detektörü tanımlar gibi görünen bir *süperpozisyondur*.

Bu ölçüm halinde gözün gördüğünden çok daha fazlası vardır. İlk olarak bu hal bir süperpozisyondur; klasik fiziğin dışında kalan ve sezgilere aykırı olan bir durumdur. Fakat bu bir Mach-Zehnder interferometresinde her iki yolu da izleyen bir foton gibi, tek bir sistemin iki halinin basit bir süperpozisyonu değildir; iki *sistem* –elektron ve detektör– gerektiren iki durumun bir süperpozisyonudur. Bu iki sistem dolanıktır, tıpkı Şekil 9.1'deki iki kuantumun dolanık olması gibi. Üstelik bütün dolanık haller gibi, ölçüm hali iki sistem

arasında yerbilmez bir ilişki tesis eder. Aralarındaki mesafe ne kadar büyük olursa olsun, elektron ile detektör, cisimlerin yalnızca yakın çevrelerinden doğrudan etkilendikleri fikri olan yerellik ilkesini ihlal edecek şekilde ânında birbirlerine bağlanır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, ölçüm halini çözümlemenin zor olması ve asıl doğasının ilk bakışta bekleyebileceğiniz bir şey olmaması şaşırtıcı değildir. Bu olgunun Schrödinger'in bile kafasını karıştırmış olması da şaşırtıcı değildir, çünkü Schrödinger fizikçilerin 6. Bölüm'de ele alınan 1935 EPR çalışmasında keşfedilen yerbilmezlik hakkında, bu kuantum niteliğinin var olduğu dışında başka bir şeyler öğrenmelerinden önce ölmüştür.[32]

Ölçüm halinin bazı fizikçilerin bildiği fakat kuantum ölçümü tartışmalarında genellikle göz ardı edilen basit bir özelliği şudur: Standart kuantum fiziğinin işaret ettiğine göre, bir kuantum ve bir detektör ölçüm halinde dolanık olduklarında *ne kuantum ne de detektör ayrı ayrı bir süperpozisyondadır*. Bu, birleşik sistemin, kuantumun veya detektörün bir süperpozisyonda olduğu ölçüm haliyle tanımlandığını varsayarak kolayca kanıtlanır; bir çelişki çıkarsamak zor değildir.[33] Dolayısıyla standart kuantum teorisine göre ölçüm hali ya yalnız başına kuantumun ya da detektörün süperpozisyonda olmasıyla tutarsızdır. Bu sonuç tam olarak beklediğimiz şeydir ve hiç de paradoksal değildir!

Birçok fizikçi detektörün (Schrödinger'in örneğinde bir kedi), her iki sonucu gösteren basit bir süperpozisyonda bulunmadığının ve kuantumun (Schrödinger'in örneğinde radyoaktif bir çekirdeğin) her iki kuantum halinin basit bir süperpozisyonu olmadığının farkındadır. Buna karşılık, bir çeşit süperpozisyonda olan şey ise bir *birleşik* sistemdir; bu, Schrödinger'in örneğindeki kedi artı çekirdektir. Fakat bu tam olarak ne anlama gelir, özellikle de iki "alt sistem" dola-

nıksa ve dolayısıyla alt sistemler ölçüm sürecindeki rollerini hiçbir şekilde değiştirmeden, prensipte birbirlerinden gelişigüzel mesafede olabildikleri, yerbilmez bir ilişki içindelerse? Bu tuhaf bir durumdur: Detektör ayrı olarak süperpoze değildir ve kuantum sistemi de ayrı olarak süperpoze değildir ve detektör ilişkiyi değiştirmeden kuantumdan gelişigüzel uzaklıkta olabilir, buna rağmen detektör-artı-kuantum bir şekilde süperpoze görünür. Detektör ve kuantum farklı galaksidelerse, o zaman detektör-artı-kuantumun süperpoze olduğunu söylemek ne anlama gelir? Bunun ne anlama geldiğini kısa süre sonra, ölçüm hali süperpozisyonunda tam olarak neyin süperpoze olduğunu öğrendiğimizde keşfedeceğiz. Yanıtın düşünebileceğimizden daha basit olduğunu göreceğiz.

Dolanıklığı ele alırken (9. Bölüm), iki dolanık sistemin sadece biriyle ilgili olan anlık *yerel veriler* ile her ikisi arasındaki ilintileri içeren *küresel veriler* arasında bir ayrım yaptım. Önemli bir fiziksel ayrım ise, *her iki* yerel sistemden de ışık hızında veya bundan daha düşük bir hızda verileri toplayıp kıyaslayarak verilerin derhal kaydedilmesinden *sonra* küresel verilerin elde edilmesi gerektiğidir. Bir hangi-yarık detektörünü kapsayan bir çift yarık deneyindeki bir elektron durumunda, aynı ayrımı *elektronun yerel hali, detektörün yerel hali* ve *birleşik sistemin küresel hali* arasında da yapmalıyız. Elektronun yerel hali yalnızca elektronu –bir gözlemcinin detektörle olan ilintileri göz ardı ederek elektronda ne gözlemlediğini– tanımlar. Benzer şekilde, detektörün yerel hali de elektronu göz ardı ederek yalnızca detektörü tanımlar.

Standart kuantum teorisi bize bu iki yerel hal hakkında ne söyler? Bir kez daha yanıt basittir ve standart kuantum fiziğinden kolayca elde edilir.[34] Bu hesaplama yerel hallerin kendi olası sonuçlarının –süperpozisyonları değil– *karışımları* olduğunu gösterir! Ancak kuantum fizikçileri bir sistemin yerel halinin[35] tam olarak o sistemin gözlemcisinin gözlem-

lediği şey olduğunu çok iyi bilirler. Başka bir deyişle, standart kuantum fiziği yarıklarda bir detektörün olduğu çift yarık deneyindeki elektronun bir gözlemcisinin, elektronun, *ya* yarık 1'den *ya da* yarık 2'den çıkma karışımında olduğunu keşfedeceğini öngörür. Üstelik hangi-yol detektörünün yarık 1'i ya da yarık 2'yi göstermenin bir karışımında olduğu bulunacaktır. *Birleşik sistem bir çeşit süperpozisyonda olsa da, tek başına elektronun veya tek başına detektörün gözlemcisi bir karışım gözlemler.* Bir kez daha söylemek gerekirse, bu paradoksal değildir; tam beklediğimiz şeydir.

Bildiğiniz gibi, deneyler bu öngörüyü doğrular (bakınız Şekil 9.5).

Bu öngörü bize yeni bir şey söyler, çünkü gözlemcilerin aslında ne gözlemlediklerini söyler. Detektörün bir gözlemcisi her iki yarığı değil, ya yarık 1'i ya da yarık 2'yi gösteren bir detektörü gözlemler; elektronun bir gözlemcisi ise elektronun her iki yarıktan değil, ya yarık 1'den ya da yarık 2'den çıkmasını gözlemler. Aynı şekilde, Schrödinger'in kedisinin bir gözlemcisi hem canlı hem ölü bir kediyi değil, ya canlı ya da ölü bir kedi gözlemler; aynı gözlemci hem bozunan hem bozunmayan değil, ya bozunan ya da bozunmayan bir çekirdek gözlemler. Bu teorik öngörüde bir ikilem yoktur: Bir yerel gözlemcinin gözlemlediği şey gerçekte meydana gelen şey olmalıdır. Eğer gerçekten canlı bir kedi gözlemlerseniz, kedinin hem canlı hem de ölü olma durumunda olması hiçbir anlamda mümkün değildir. Bu öngörü en azından 1968'den bu yana bilinir. Ancak yeterince ciddiye alınmamıştır.

Dolayısıyla kuantum teorisi deneylerle tam olarak uyuşur! Önemli bir ayrım olan yerel haller ile küresel hal arasındaki fiziksel ayrımı yaptığımızda, ünlü kesin sonuçlar problemi aslında ortaya çıkmaz! Jauch tüm bunların 1968'de farkına vardı; o zamandan beri ben dahil başkaları da farkına vardı; ancak bunun çok az etkisi oldu.[36]

Buna rağmen ölçüm halinin süperpoze bir kediyi işaret ettiği inancı sürüyor. Sanki siz canlı bir kediye gözünüzü dikmiş bakıyorsunuz da, bir kuantum temelleri uzmanı size şöyle diyor: "Sen yanılıyorsun. Bu canlı bir kedi değil. Bu kedi hem canlı hem ölü olmanın bir süperpozisyonunda." Bu bana Monty Python'un papağan gösterisini hatırlatır. John Cleese bir papağan satın alır fakat meğerse papağan ölmüş ve tüneğine çivilenmiştir. Cleese ölmüş papağanı evcil hayvan dükkânına geri götürdüğünde, dükkân sahibi papağanın gerçekte ölü olmadığında ısrar eder. Şamatalı bir kavga kopar.[37]

Bu da kesin sonuçlar problemini çözer! Josef Jauch tüm bunları 1968'de anlamış gibidir:

> İki halin de (kuantumun ve detektörün halleri) karışımlar haline geldiğini görürüz. ... Burada hiçbir süperpozisyon meselesi yoktur. ... Üstelik (detektördeki) ve (kuantumdaki) olaylar ilintili oldukları için bir ölçümümüz vardır. ... Dolayısıyla Schrödinger'in kedisi paradoksu bütünüyle fiziksel yönden yeniden formüle edildiğinde çözülebilir.[38]

Birçok deney bu çözümü destekler ve teori de bunu doğru bir biçimde öngörür.[39] Daha fazla ne sorulabilir? Buna rağmen kuantum uzmanları uzun süredir bu sonucun tartışmaya açık olduğunu iddia etmişlerdir. Bu bölümün sonunda yer alan ve okumak zorunda olmadığınız ek kısım bu eleştirenlerin argümanlarını ve bu argümanlara verilen yanıtları ele alır.

Jauch'un sonucu açık ve doğrudur, fakat benim bildiğim kadarıyla yanıtlanmamış bariz bir soru doğurur: Öyleyse ölçüm halinde süperpoze *olan* nedir? Schrödinger'in kedisinin tam bir çözümü bu soruyu yanıtlamalıdır. Şimdi bunun çözümüne bakalım.

Kuantum Fiziği Neden Yerel Hal Çözümünü Gerektirir?

Uzmanlar Jauch'un elli yıl önce ölçüm problemine getirdiği çözüme itiraz ettikleri veya göz ardı ettikleri için, bu bölüm yerel hal çözümüne yönelik–Jauch'un argümanından bağımsız– ikinci bir argüman sunuyor.[40] Gene standart kuantum teorisine dayanan bu argüman, ölçüm halinin kendisini kesin, gözlemlenebilir özellikleri olan karışımlar olarak sergilemesi *gerektiği*, çünkü aksi takdirde bu halin anlık işaret verme için kullanılabileceği ve özel göreliliği ihlal edeceği sonucuna varır. Bu argüman aynı zamanda ölçüm halinde neyin süperpoze olduğu sorusuna şaşırtıcı derecede basit, hatta aşikâr bir yanıt sağlar. Katilin baştan beri "göz önünde olduğu" bir cinayet gizeminin çözülmesi gibi, çözümün de çok bariz olduğunu keşfedeceğiz.

Yerbilmezlik genelde çözüm sürecinde ve özelde çift yarık deneyinde çok bellidir. İlk olarak, iki yarığın da açık olduğu ve hangi-yol detektörünün olmadığı durumda, bir görüntüleme ekranı üzerinde oluşan bir girişim örüntüsü her bir kuantumun iki yarıktan da çıktığını gösterir; yarıklar arasındaki gelişigüzel mesafe nedeniyle bu yerbilmez bir durumdur. İkinci olarak, iki yarığın da açık olduğu ve hangi-yol detektörünün sadece bir yarıkta mevcut olduğu durumda deneyler girişim yapmayan bir karışımın oluştuğunu gösterir. Her kuantum, *tespit edilmeyen* yarıktan çıkanlar da dahil olmak üzere, bu örüntüye uyar; bu da yerbilmez bir etkidir. Üçüncü olarak, her bir kuantum görüntüleme ekranına çarptığında ânında ve yerbilmez olarak atomik boyutlardaki bir cisim haline çöker. Tüm bu yerbilmez etkilerin ardında kuantumun bütünlüğü bulunur.

Ölçüm hali gibi dolanık hallerin son derece yerbilmez oldukları on yıllardır biliniyor.[41] Kuantum ölçümünün birçok analizi bu yerbilmezliğe yeterli önemi vermez, çünkü bir

hangi-yarık detektörünün olduğu çift yarık deneyi gibi bir deneyde detektör normalde yarıklara bitişik durumdadır ve yerbilmezlik belli değildir. Ancak detektör ve kuantum yerbilmez ölçüm halinde dolanıktır ve mevzu bahis deney üzerinde bunun hiçbir pratik etkisi olmasa bile temel fizik bunu yansıtmalıdır.

Aslına bakarsanız, detektörün tespit edilen kuantumla olan yerbilmez ilişkisini çarpıcı biçimde aydınlatan en az bir tane çift yarık deneyi vardır. 1991'de New York'taki Rochester Üniversitesi'nden X. Y. Zou, Wei Lang ve Leonard Mandel dolanık bir foton çiftini kullanan bir çift yarık deneyi yaptılar.[42] Fotonlardan biri bir çift yarık düzeneğinden geçerken, *diğer foton ilk foton için uzaktaki bir detektör işlevi gördü.* İlk foton iki yarıktan da geçip bir görüntüleme ekranına çarparken, ikinci foton yarıklardan uzaklaşarak iki süperpoze yol boyunca, ilk fotondan gelişigüzel uzaklıktaki ayrı bir detektöre doğru gitti. Bu yolların ustaca yapılmış geometrisi sayesinde, ikinci fotonun iki yolundan biri boyunca (1) bir bariyer yerleştirildiğinde veya (2) yerleştirilmediğinde, ikinci foton ilk fotonun çıktığı yarığı tespit edebildi (1) veya edemedi (2). Dolayısıyla ikinci foton ilk foton için uzaktaki ve tercihe bağlı bir hangi-yol detektörü işlevi gördü.

Beklendiği gibi, ikinci fotonun yollarından birine bariyer yerleştirildiği bu denemeler sırasında uzaktaki ilk foton bir yarıktan veya diğer yarıktan çıkmanın bir karışık-hal örüntüsü içinde ekrana çarptı ve bariyerin yerleştirilmediği denemeler sırasında ise uzaktaki ilk foton ekrana bir çift yarık girişim örüntüsü içinde çarptı; bu, ölçümün yerbilmez, "bütüncül" doğasının çarpıcı bir kanıtıydı. Bu olağanüstü deneyi tanımlayan çalışmayı ilk okuduğumda neredeyse sandalyeden düşüyordum. Yerbilmezlik şoke edicidir. Eğer ilk foton uzaya gönderilmiş olsa ve dünyadaki bariyer yerleştirip yer-

leştirmeme kararı ilk foton önündeki yıldıza olan mesafenin yarısına geldiğinde verilse, uzaktaki foton, ikinci fotonun bir hangi-yol tespiti yapıp yapmadığına bağlı olarak büyük olasılıkla karışım ve süperpozisyon arasına ânında sıçrardı.

Zou ve meslektaşlarının deneyi ölçümlerin dolanıklığın yerbilmez etkileriyle her yönden ilgili olduğuna dair güçlü kanıtlar sağlar.

Ölçüm probleminin çözümü dolanık ölçüm halini çözümlemede bulunur. RTO deneyi (9. Bölüm) bunun için mükemmel bir araç sağlar. RTO'nun iki dolanık fotonunun her biri, tam da Zou ve meslektaşlarının deneyindeki gibi, diğer foton için mikroskobik bir hangi-yol detektörüdür. Bunun nedeni bir kuantumun ve detektörünün ölçüm halinde dolanık olmalarıyla aynı şekilde RTO'nun iki fotonunun dolanık olmasıdır. Fizikçiler fotonları makroskobik detektörlerden daha çabuk manipüle edebildikleri için, ölçümler hakkında çift yarık deneyine veya Schrödinger'in kedisine kıyasla RTO deneyinden çok daha fazla bilgi edinebiliriz. Üstelik daha önce değindiğim gibi, ölçüm probleminin gerçekte iki tam bağımsız öğesi vardır. İlki Schrödinger'in kedisidir. 11. Bölüm'e sakladığım ikincisi, bir detektörün duyulabilir "tık" sesi gibi, herhangi doğru bir ölçümün yapması gereken makroskobik işaretle ilişkili "tersinmezlik problemidir". RTO deneyinde dolanıklık deneyin başlangıcında meydana gelirken makroskobik işaretin sona kadar gelmemesi, dolanıklığın tek başına etkisini tersinmezlik probleminin ilave karışıklığı olmadan incelemeyi mümkün kılar.

RTO deneyi kesinlikle ölçüm halinin yerbilmez karakterini kanıtlar. Dolanık fotonlardan birini diğer foton için bir hangi-yol detektörü olarak düşünürsek, deney bir kuantum ile

detektörünün arasındaki mesafenin açılabileceğini ve gene de bunların karşılıklı ilintileri hakkında ânında bilgi içerebileceğini gösterir. Ölçümler uzaktan ânında etkili olur.

Ölçüm probleminin en önemli noktası şudur: Ölçüm halinin bir süperpozisyon olduğunu dikkate aldığımızda, süperpoze olan tam olarak nedir? Schrödinger'in kedisi süperpoze midir? Bozunan çekirdek? Bu iki sorunun da yanıtının hayır olduğunu gördük. Birleşik kedi-artı-çekirdek halleri süperpoze midir? Daha önce belirtildiği gibi bu mantıklı görünür. Ancak doğru olamaz. Birleşik kedi-artı-çekirdeği tek bir sistem olarak ele almak fiziğin can alıcı bir yönünü –yani iki sistem arasındaki *dolanıklığı*– ölçüm sürecinin tüm meselesi olan bir dolanıklığı göz ardı ederdi.[43] Ölçüm, ölçülen sistem ile ölçme aygıtları arasındaki ilintileri gerektirir. Birleşik sistemi birleşik olmayan bir sistemmiş gibi ele alabilseydik bu bir ölçüm olmazdı.

Bildiğiniz gibi, RTO deneyi iki sistem dolanık olduğunda sistemlerden birinin fazındaki hızlı değişimlerin aralarındaki ilintileri ânında değiştirdiğini gösterir. Bu da *sistemlerden birinin konumunda bu ilintilerin gözlemlenemez –görünmez– olmaları gerektiğine* işaret eder, çünkü 9. Bölüm'de irdelediğimiz gibi, gözlemlenebilir olsalardı, o takdirde fazdaki değişimler bir yerel gözlemciden diğer yerel gözlemciye anlık mesajlar göndermede –ki bu özel göreliliğin ihlalidir– kullanılabilirdi. Dolayısıyla ekranlardan birinde gözlemlenen örüntü bir karışım *olmalıdır*.

Hangi-yol detektörü açılır açılmaz (yani dolanıklık tesis edilir edilmez) çift yarık girişim örüntüsünün bir karışıma çökmesi gerektiğinin nedeni budur. Dolanık halde ne foton ne de detektör en ufak bir girişim işareti gösterebilir, çünkü böyle bir işaret uygun bir dolanıklık deneyinde anlık mesajlar göndermede kullanılabilir. *Süperpozisyondan karışıma çökme, ölçüm halinin*

özünde bulunan yerbilmezliğe ek olarak özel göreliliğin ışık hızını aşan işaret verme yasağından mantıksal olarak çıkar. Eğer bir süperpoze kedi ortaya çıkarsa, bu anlık işaret vermede kullanılabilir.

Özet: Bu ve önceki bölümde iki bağımsız argümandan yararlanarak dolanık ölçüm halinin kendini her iki alt sistemin karışımları olarak ortaya koyduğunu kanıtladım.

Ancak birleşik sistemin dolanık ölçüm hali bir süperpozisyondur. Eğer kediler, çekirdekler ve kediler-artı-çekirdekler süperpoze değilse, süperpoze *olan* nedir? RTO deneyiyle bağlantılı olan yanıtı halihazırda gördük: Şekil 9.4, ölçüm halinde olduğu gibi iki sistem dolanık olduğunda *ilintilerin* süperpoze olduklarını gösterir. Doğrusu, ölçüm hali süperpozisyonu mükemmel biçimde tasvir edilebilir. Bunun için Şekil 9.3'teki A sistemini bir elektron detektörü veya Schrödinger'in kedisi gibi bir aygıt olarak ve B sistemini de bir çift yarık çiftinden geçen bir elektron veya radyoaktif bir çekirdek gibi bir kuantum olarak hayal etmeliyiz. Ölçüm düzeneğinde her iki x ve y faz değiştiricileri sıfıra sabitlenir, böylece detektör kuantumla tam olarak "fazda" olur. Yani *A1* ve *A2* detektör halleri *B1* ve *B2* kuantum halleriyle mükemmel ilişkilidir. RTO deneyi x ve y fazlarının değiştirilmesine olanak sağlayarak ölçüm hali durumunu aşar ve bu olduğunda deneyi yapanların Şekil 9.4'teki *A1-B1* ve *A2-B2*'nin iki dalının girişimini gösteren verileri bulmaları (Şekil 9.3'te sırasıyla, kesikli çizgi ve kesiksiz çizgi), bir yanda *A1* ile *B1* arasındaki ve diğer yanda *A2* ile *B2* arasındaki ilintilerin süperpoze olduklarını kanıtlar.[44]

Dolayısıyla ölçüm hali paradoksal olmadığı gibi zor da değildir. Tek yapmamız gereken onu doğru okumaktır. RTO deneyi bize bir çift yarık deneyindeki bir elektronun ve onun hangi-yol detektörünün halinin aşağıdaki gibi okunması gerektiğini öğretir:

"Elektron yarık 1'den çıkar" durumu "detektör yarık 1'i gösterir" durumuyla mükemmel ilintili (%100 olasılıkla) ve "elektron yarık 2'den çıkar" durumu "detektör yarık 2'yi gösterir" durumuyla mükemmel ilintilidir.

Basit "ve" kelimesi süperpozisyonu gösterir. Şekil 9.3'e istinaden, hem A1 ve B1'i eşleyen kesikli çizgi hem de A2 ve B2'yi eşleyen kesiksiz çizgi gerçek anlamda eşzamanlıdır. A1, B1 ile *ve* A2 de B2 ile ilintilidir. Süperpoze oluşumların basitçe *ilintiler* olmaları paradoksal olmayan bir ölçüm haline işaret eder; iki ilinti de doğrudur.

Yanlış anlamaları önlemek için bu "yerel hal" analizinin henüz kuantum fiziğinin başka bir yorumu olarak önerilmediğini eklemeliyim. Daha doğrusu, yerel hal çözümünün standart kuantum fiziğinin bir çıkarımı olduğunu ileri sürüyorum.

Ölçüm Probleminin Kısa Bir Tarihi

Ölçüm problemi üzerinde hak ettiğinden fazla durdum, çünkü bu aslında Jauch'un yaptığı gibi yerel hallerin incelenmesiyle kolayca çözülür. Ölçüm bir problem olmamalıydı ve problem olarak da kalmamalıdır. Durumun nasıl böyle olduğunu incelemek yararlı olabilir.

İlk kez 1935'te Schrödinger'in fark ettiği kesin sonuçlar problemini görünüşe göre ilk olarak 1968'de Jauch çözmüştür, ancak onun çözümü fizik camiası tarafından tanınmamıştır. Jauch'un çözümü sıklıkla yeniden keşfedilmesine rağmen hâlâ kabul edilmemiştir. Bu talihsiz tarih dolanıklık anlayışımızın ağır ilerleyen evrimiyle el ele gitmiştir. Schrödinger 1935'te doğru olarak dolanıklığın karakteristik kuantum özelliği olduğunu sezmesine rağmen, dolanıklığın fiziksel so-

nuçları o sıralarda çok az biliniyordu. Schrödinger kuantum fiziğinin, ünlü kedisinin belirsiz bir süperpozisyonda –o tarihte anlaşılabilir bir hata– olduğunu öngördüğü, dolayısıyla sonuçlar problemini doğurduğu kanısındaydı. 1935'te Einstein, Podolsky ve Rosen (6. Bölüm) ilintili kuantum çiftlerinde ortaya çıkan sezgilere aykırı yerbilmez öngörülere dikkat çektiler, fakat bu tarz sistemlerin sıra dışı özelliklerinin ardına daha fazla düşmediler. 1930'larda Einstein ve Schrödinger dolanıklıktan memnun değillerdi, çünkü bu göreliliğin bilgi iletimi üzerindeki hız limitini ihlal eder gibi görünüyordu; bu, 1987'ye dek düzeltilmemiş, önemli bir yanlış kanıydı.[45] Standart kuantum fiziğinin çoğunun tesis edildiği 1920'ler ve '30'larda bunlardan hiçbiri çok fazla çalışma yayımlanmasını teşvik etmedi.

İkinci Dünya Savaşı kuantum temelleri üzerine yapılan çalışmaların çoğunu durma noktasına getirdi ve savaştan sonra işinizi kaybetmemeniz için verilen öğüt ise kuantum temelleri hakkında felsefe yapmak yerine "çeneni kapayıp hesaplama yap"tı. 1964'e dek bir şey yapılmadı, ta ki bu tarihte John Bell yerellik testini yayımlayarak kuantum fiziğinin bu testi ihlal ettiğini, dolanıklık ve yerbilmezlik üzerinde yeni bir perspektifin açıldığını gösterene dek.[46] Bell'in çalışmasının bilimde bir sansasyon yaratması beklenebilirdi, fakat bunun yerine pek tanınmayan bir dergide yayımlandı ve tesadüfen bunu öğrenenler tarafından bile büyük ölçüde göz ardı edildi. Böyle bir çalışma hızla doğanın Bell'in testini gerçekte ihlal edip etmediğine ilişkin deneylere yol açmalıydı, fakat deney ancak 1972'de yapıldı ve bundan sonra yıllarca çok az fark edildi. Fark edenlerden biri Alain Aspect oldu ve 1982'de Bell'in yerellik koşulunu ihlal eden ilintilerin ışık hızını aşan değişimini kanıtlayan, daha eksiksiz bir deney yaptı.[47] Hâlâ da bunun önemini tartışıyoruz.[48]

1968'de Jauch kesin sonuçlar problemini yerel bir gözlemcinin ne gözlemlediğini sormak gibi bariz bir stratejiyle çözdü. Yanıtı basitti: Detektörün bir karışımda olduğu gözlemlenir, kuantumun da aynı şekilde. Jauch bu yerel hal çözümünün (benim verdiğim isimle) Schrödinger'in kedisi problemini çözdüğünü düşündü ve meseleyi şu sözlerle bağladı: "Bu nedenle Schrödinger'in kedisi paradoksu tamamen fiziksel yönden yeniden formüle edildiğinde çözülebilir."[49] Kitabında ise dolanıklık veya yerbilmezlik geçmez.

Jauch 1968'deki içgörüsünü sürdürmedi. 1973'te, 1968'deki sonuçlar problemini çözme iddiasına geri döner gibi görünen yetersiz ve kısa bir deneme yayımladı.[50] 1973 tarihli deneme 1968'deki analizinden söz etmeden şöyle der: "Ölçüm süreci Schrödinger türü gelişmelerle bariz bir biçimde tutarsız olan özellikler sergiler." Bunu bizzat kuantum fiziğinin deneylerle çeliştiğinin bir kanıtı olarak görür. Jauch olası bir çözüm olarak Kopenhag yorumuna belli belirsiz atıfta bulunarak makalesini sonlandırır. Makale Jauch'un dolanıklığın yerbilmez çıkarımlarını anlamadığını gösterir. 1973'te bu şaşırtıcı bir şey değildi. Görmüş olduğumuz gibi, ölçüm halinin dolanık ve yerbilmez doğası problemi anlamada hayati önem taşır. Dolanıklığın kesin özellikleri olan yerel haller ve süperpoze ilintileri olan küresel haller yaratması, bir haller süperpozisyonundan gözlemlediğimiz bir yerel haller karışımına anlık kuantum sıçramasının meydana gelmesine yol açar. Maalesef Jauch 1974'te hayatını kaybetti.

Ölçüm halini kavramak için yerbilmez ilintilerini ve bunların girişimlerini anlamak gereklidir, fakat en azından 1982'ye kadar (Aspect'in deneyi) yerbilmezliğe dair bir mutabakat yoktu. O zamana kadar tam da ölçüm probleminden kaçınmak için çok sayıda kuantum yeniden yorumu ve revizyonu çoktan ortaya atılmıştı. Birçok kuantum temelleri uzma-

nı önerilen çözümlerden birine entelektüel olarak bağlandı ve kuantum fiziğinin standart araçlarının ölçüm problemini mantıksal olarak tutarlı bir biçimde çözemeyeceği varsayımında bulundu. Jauch'un basit önerisi büyük ölçüde göz ardı edilerek unutuldu. O zamandan bu yana problemi standart kuantum fiziği içinde çözmek yerine yeniden yorumlamalar ve revizyonlar üzerinde odaklanıldı.[51] Problemi standart kuantum fiziği içinde çözmeyi öneren biri yıllara dayanan, katılaşmış, yanlış kanılarla uğraşmalıdır.

Tercihe Dayalı Ek: İtirazları Çürütmek

Birçok uzman ölçüm probleminin kuantum ilkelerini değiştirmeden veya yeniden yorumlamadan çözülemeyeceği ve özellikle yerel hal çözümünün problemi çözmediği düşüncesindedir. Bu argümanlardan en önemli üç tanesini sunacak ve bunları çürüteceğim.

En önemlisi, karşı olanlar örnek olarak kesin sonuçlar problemini gösterir: Aslında gözlemlediğimiz hal ya bozunmamış bir atom ve canlı bir kedi ya da bozunmuş bir atom ve ölü kedi olduğu halde, teorik ölçüm hali iki durumu da aynı anda temsil eder (karşı olanlara göre).

Önceki tartışma bu görüşü çürütür. Teori sadece küresel hali değil, aynı zamanda iki yerel hali de öngörür. Yerel öngörüler kedideki veya çekirdekteki bir gözlemcinin bilfiil tanık olduğu şeylerdir. Bu kesin yerel sonuçlar ya canlı veya ölü bir kedi ya da bozunmamış veya bozunmuş bir atomdur. Tam olarak gördüğümüz şey bu gözlemlenebilir özelliklerin öngörülen karışımlarıdır. Üstelik dolaysız hesaplama kedi ve çekirdek ölçüm halinde dolanık olduklarında ne kedi ne de çekirdeğin bir süperpozisyon halinde olduğunu gösterir. Süperpozisyon sadece küresel halde mevcuttur (yani kesin yerel haller arasındaki ilintilerde). Bu ilintiler yerel gözlem-

ciler tarafından doğrudan gözlemlenmez ve ancak iki yerel konumdan da veriler toplanıp kıyaslandıktan sonra belli olurlar.

Üstelik prensipte yerel gözlemcilerden birinin küresel halin ilintilerini değiştirmesiyle ânında diğerinin, muhtemelen uzaktaki yerel gözlemcinin yerel hali değiştirilir. Dolayısıyla biz özel göreliliğin ânında işaret vermeye karşı yasağını aşmadığımız müddetçe, küresel ilintiler doğrudan yerel gözlemciden korunmalıdır.

Sonuç: Ölçüm hali çekirdeğin veya kedinin bir süperpozisyonu değil, yalnızca çekirdek ve kedi arasındaki ilintilerin bir süperpozisyonudur. Bozunmamış çekirdek canlı bir kedi ile mükemmel ilintili *ve* bozunmuş çekirdek de ölü bir kediyle mükemmel ilintilidir. Dolayısıyla sonuçlar belirlidir ve ölçüm hali hiç de paradoksal değildir.

İkinci bir itiraz da teorik olarak öngörülen ve deneylerle gözlemlenen karışımın "uygunsuz" ve dolayısıyla kabul edilemez olduğu şeklindedir.[52] Kuantum fiziğinde kullanıldığı şekliyle "uygun" bir karışım terimi asıl kuantum halini insanın göz ardı etmesinden kaynaklanır ve bir kuantum kavramı değildir. Aynı kavram klasik termodinamikte de ortaya çıkar. Burada karmaşık bir sistemin kesin klasik hali olasılıklarla temsil edilir, çünkü insanlar zilyonlarca molekülün kesin konumlarını ve süratlerini uygun bir şekilde gözlemleyemez veya hesaplayamazlar. Aslına bakarsanız, ne zaman havaya attığımız bir paraya bakmadan önce yazı tura olasılığını %50-%50 olarak tanımlasak, klasik bir duruma bilmemeye-dayalı olasılıkları uygularız. Kuantum fiziğinde uygun bir karışım bir sistemin belirli bir kuantum halinde olduğu, fakat bizim hangi hal olduğunu bilmediğimiz bir durum olurdu.

"Uygunsuz" bir karışım tamamen kuantum nedenlerden ortaya çıkar. Bir çift zar attığınızda sadece bir zarı gözlemlemenize benzer şekilde, ne zaman dolanık kuantumlardan sadece birini gözlemlesek, bu uygunsuz karışım dolanık kuantumlardan doğar. Hilesiz zarlarda sadece bir zarın gözlemlenmesi her bir sonucun olasılığının altıda bir olduğunu gösterecektir. Bu sonuç –her bir sonuç için altıda bir– iki zarın olasılık dağılımından doğan tek zarların "azaltılmış olasılık dağılımıdır".[53] Aynı şekilde, dolanık kuantum çiftinin sadece birinin bir gözlemcisi bir kuantumun azaltılmış olasılık dağılımını gözlemler. Hem kuantum teorisi hem de deneyler bu azaltılmış olasılık dağılımının bir süperpozisyon değil, tekli kuantum özelliklerinin bir karışımı olduğunu gösterir.

Dolanık bir çiftin yalnızca bir üyesi incelendiğinde ortaya çıkan ve gerçekte uygunsuz olmakla bir ilgisi bulunmayan *uygunsuz karışımlar* aslında kuantum rastgeleliğin özünde bulunur! Bir detektör bir kuantumu ölçtüğünde ikisi ölçüm halinde dolanık hale gelir; daha sonra ölçülen kuantumun, kurallarla belirlenmiş olasılıkları olan bir kesin sonuçlar karışımında olduğunu buluruz. Doğa kuantum rastgeleliği işte bu şekilde yaratır. Bunu kuantum teorisinin "uygunsuz" adı verilen karışımları doğru olarak öngörür.

Şekil 9.5 eğitici bir örnek sunar. Süperpoze bir kuantum bir çift yarık çiftinden çıktığında ve bir hangi-yol detektörü kuantumu gözlemlediğinde detektör kuantumla dolanık hale gelir ve dolayısıyla kuantumu uyumsuz hale getirir (girişim örüntüsünü ondan çıkarır). Dolanıklık kuantumun Şekil 9.5b ile kanıtlanan süperpozisyondan Şekil 9.5c ile kanıtlanan karışıma –ya yol 1'de ya da yol 2'de olmanın bir karışımı– sıçramasına neden olur. Bu kuantum rastgeleliğin nasıl ortaya çıktığına dair bir ders kitabı örneğidir: Ölçüm olmadığında kuantum iki yarıktan da çıkar; ölçüm olduğunda kuantum

yarıklardan birinden rastgele çıkar. Rastgelelik ölçümün neden olduğu dolanıklıktan kaynaklanır.

Schrödinger'in kedisi başka bir örnektir. Dolanıklık çekirdeği bozunmama veya bozunma karışımına, kediyi de canlı veya ölü olma karışımına –kuantum rastgeleliğin başka örnekleri– yerleştirir.

Uygun ve uygunsuz karışımlar arasındaki ayrım yararlı ve gereklidir, fakat kelime seçimi öyle değildir. *Karışım* ve *yerel karışım* terimleri daha iyi olabilir. Eğer bir kuantum gerçekte iki halden birindeyse ve biz bunun hangisi olduğunu bilmiyorsak, kuantum hallerinin bir "karışımındadır". Eğer kuantumun yerel gözlemcisi kesin fakat belirsiz özellikler gözlemlediği halde "küresel gözlemci" (iki yerel gözlemcinin sonuçlarının da çetelesini tutan) kuantumun, özelliklerini başka bir kuantumun özellikleriyle ilintilendiren küresel bir hale katıldığını gözlemliyorsa, kuantum özelliklerin bir "yerel karışımındadır". Yerel karışımlarda uygunsuz bir şey yoktur; bunlar kuantum fiziğinin yapısında bulunan belirsizliği ifade ederler.

Üçüncü itiraz *temel belirsizlik* adı verilen bir matematik problemidir.[54] İtiraz yerel hal çözümünün bazı özel durumlarda matematiksel olarak belirsiz olduğu şeklindedir. Schrödinger'in kedisi durumunda bu özel durum atomun radyoaktif bozunması sırasında, sadece bir anlığına meydana gelir. Bu an atomun bozunma olasılığının tam olarak %50-%50 olduğu yarılanma ömrüdür.[55] Diyelim bu ömür 30 dakika olsun. Eğer 30 dakikadan kısa sürelerde kedinin hayatta olup olmadığını sorarsak temel belirsizliğe dair bir sorun yoktur. Ancak tam olarak 30 dakikada neler olduğunu öğrenmek istiyorsak teoride bir problem vardır; burada *temel belirsizlik* adı verilen özel bir şey meydana gelir.[56]

Dipnotlar problemi ve teknik çözümünü açıklar.[57] Çözüm fikri detektörün kuantumun haliyle *belirsiz bir şekilde* ilintili olacak şekilde tasarlanması gerektiğidir. Ekipman bozunmamış bir atomun canlı bir kediyle, bozunmuş bir atomun da ölü bir kediyle ilintili olmasını garantileyecek şekilde düzenlenmelidir. Önemli olan tek şey budur ve bu ne fiziksel ne de matematiksel olarak belirsizdir. Temel belirsizlik fizikle ilgili bir mesele değildir.

Temel belirsizliğin fizikle ilgisinin olmaması, Schrödinger'in kedisinde ancak tam yarı ömürde ortaya çıkmasıyla da doğrulanır. Ne de olsa bir atomun ömründeki bu özel âna dair fiziksel olarak ayırt edici hiçbir şey yoktur. Radyoaktif bir atomun yarı ömrü, Amerikan vatandaşlarının medyan yaşı (36,9 yaş) gibi sadece yararlı bir istatistiktir. Bir kişi bu yaşa ulaştığında özel bir şeyin meydana gelmemesi gibi, çekirdeğin Schrödinger'in kedisiyle dolanık hale gelip gelmemesinden bağımsız olarak, bir çekirdek de yarı ömrüne ulaştığında özel bir şey meydana gelmez.

|| 11 ||

Monitör Olarak Çevre

Yürüyen parmak yazar;
Ve yazdıktan sonra geçip gider
Bütün adanmışlığın, zekân, yazdıklarının yarım
Satırının üstünü çizmek üzere onu geri getiremez,
Ne de bütün gözyaşların bir tek kelimesini silebilir.

— *Rubailer*, Ömer Hayyam[1]

Umarım şu âna kadar kuantum fiziğinin mikroskobik dünyayı tümüyle tutarlı olarak ve eşsiz bir deneysel doğrulukla tanımladığına ikna olmuşsunuzdur. Ancak yine de *ufak* bir problem söz konusu: Kuantum fiziği etrafımızdaki dünyayı tanımlamada çok başarısız gibidir.

Dondurmanın yanı sıra masa veya çaydanlıkları da asla, muhtemelen orada, muhtemelen burada ve muhtemelen hem orada hem de burada olan, dalgalı, uzayı kaplayan alanlar olarak görmeyiz. Masalar ve çaydanlıklar kuantum sıçraması yapmaz, dondurma da öyle. Klasik fizik mikroskobik seviyede doğru olmayabilir, fakat bu tarz sıradan nesnelerin kuvvetlere tepki olarak nasıl hareket ettiklerini açıklar. Eğer kuantum fiziği mikroskobik dünyayı doğru tanımlıyorsa ve makroskobik dünya mikroskobik nesnelerden oluşuyorsa, o zaman kuantum fiziği nihayetinde masalara ve çaydanlıklara yol açmalıdır. Bu bölüm bunun nasıl olduğunu en azından kısmen açıklar.

Kuantum fiziği Max Planck'ın zamanla kuantuma götüren hipoteziyle başladı. Çok önemli olan kuantum ilkesine göre evren bu son derece birleşik, yayılmış alan enerjisi demetlerinden oluşur. Belirli bir fenomen kuantumların uzayda yayılmış alan doğasına bağlı olduğu ölçüde "kuantum" olarak görülmelidir. Kuantumların nokta benzeri cisimlerle betimlenebildiği ölçüde fenomen genellikle "klasik" olarak görülebilir. Ancak bu klasik-kuantum sınırı bir doğa yasası değil, yararlı bir metafordur. Ben dahil çoğu fizikçi dünyayı tamamıyla kuantum olarak görür.

Kuantumların yayılmış alan doğalarının en açık ifadesi süperpozisyon ilkesidir. Elektronlar, fotonlar, atomlar vb. basitçe alanlardaki bozunumlar oldukları için bu cisimler bir küvetin içindeki suyun yüzeyindeki bozunumların süperpoze olmaları gibi süperpoze olurlar. Birkaç halin hepsi aynı anda mevcut olabilir. Bu bölüm *dekoherans* adı verilen sürecin bu dalgalı süperpozisyonları parçacık benzeri karışımlara nasıl çevirdiğini tanımlar.

Kuantum ölçüm problemi kuantum fiziğinin normal dünyamızı açıklama biçimine yönelik herhangi bir tartışmanın ayrılmaz bir parçası olmalıdır. Ne de olsa kuantum ölçümleri –makroskobik değişimlere neden olan kuantum fenomenleri– mikrodan makro dünyaya bir köprüdür. Schrödinger'in kedisi çarpıcı bir örnektir. Bir radyoaktif atomun mikroskobik bozunması makroskobik bir kediyi öldürebilen bir aygıtı tetikler. Schrödinger kuantum kurallarının asla görmediğimiz bir şeye işaret eder gibi olduğunu fark ettiğinde ölçüm problemini ortaya attı: Makroskobik bir süperpozisyon; yani hem canlı hem de ölü olan bir kedi. 10. Bölüm bu kesin sonuçlar problemine bir çözüm önerdi.

Ancak ölçüm probleminde bundan fazlası vardır. Makroskobik süreçler tersinmezdir. Yürüyen parmak devam eder.

"Şeyler akar." Termodinamiğin ikinci yasası bunu gerektirir. Dolayısıyla mikroskobik dünyada tersinmezliğin hiçbir belirtisi görünmese de kuantum ölçümleri tersinmez olmalıdır. Göreceğimiz gibi, dekoherans bu gizemi çözer.

Tersinmezlik Problemi

10. Bölüm bir kuantum ile kuantumun ölçüm cihazı arasındaki dolanıklığın süperpozisyonları kesin özelliklere sahip karışımlara nasıl dönüştürdüğünü göstererek Schrödinger'in kedisi problemini çözdü. Ancak dolanıklık ölçüm probleminin tam çözümü olamaz, çünkü bu tümüyle Schrödinger'in denkleminin belirttiği gelişim içinde meydana gelir ve bu gelişim "tersinirdir", çünkü bu geriye doğru işletilebilir; en azından prensipte; eşdeğer olarak, değişmeyen bir entropi seviyesinde ilerler.[2]

3. Bölüm tersinir ve tersinmez süreçleri entropiye ve termodinamiğin ikinci yasasına göre tanımladı. En somut makroskobik fiziksel süreçlerin tersinmez olduklarını keşfettik. Örneğin bir kutunun içindeki sıcak gazla doldurulmuş bir bölmenin soğuk gazla doldurulmuş bir bölmeden enerji akışını sağlayan bir duvarla ayrıldığı bir düzenekte, enerjinin sıcaktan soğuğa akma olasılığı aksi duruma kıyasla çok daha fazladır. Bu tek yönlü, yani tersinmez ısınma iki taraf da kutunun termal bir dengede olduğu ortak bir sıcaklığa erişene dek sıcak gazın soğumasına ve soğuk gazın da ılımasına yol açar. Dengeye gelme süreci sırasında gazın mikroskobik düzensizliği yani "entropisi" artar.

Bildiğiniz gibi, bu örnek termodinamiğin ikinci yasasını kanıtlar: Makroskobik bir fiziksel süreç içindeki tüm katılımcıların toplam entropisinin artma olasılığı çok fazladır; toplam entropide azalma nadiren olur ve bunlar ne sürdürülebilir ne de kontrol edilebilirdir. Bu da makroskobik fiziksel

süreçlerin tek yönlü doğasına işaret eder. Hangi açıdan bakılırsa bakılsın, evrenin entropisi makroskobik süreçler sırasında artar, azalamaz.

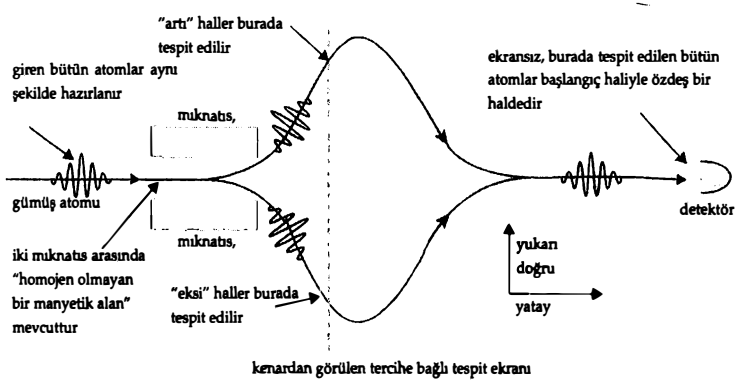
Kuantum hareketin temel tanımı olan Schrödinger'in denkleminin tümüyle tersinir olduğu gösterilebilir.[3] Eğer bu gerçekten bir kuantum dünyasıysa ve dolayısıyla bütün sistemler Schrödinger'in denklemine (veya göreli analoglarına) göre ilerliyorsa dünyanın entropisi nasıl artabilir? Bariz çelişki kuantum ölçümlerinde çok bellidir. Ne de olsa tanım itibariyle her ölçüm bir çeşit makroskobik değişim gerektirir ve bu tarz değişimler ikinci yasaya uymalıdır, dolayısıyla entropi artar. Üstelik bu entropi artışını ölçümün yaptığı kalıcı (yani tersinmez) bir işaret olarak gözlemleyebiliriz. Ancak bir kuantum ölçüldüğünde kuantum ve detektörü ölçüm halini oluşturacak şekilde dolandıkları için Schrödinger'in denklemine uyarlar, dolayısıyla entropi artmaz gibidir. Bu ikilemi nasıl çözebiliriz?

İlk kez 1922'de Alman fizikçiler Otto Stern ve Walther Gerlach'ın yaptıkları bir deneyin bir varyasyonu kuantum ölçümleri ile ikinci yasa arasındaki bağlantıyı kanıtlar.[4] Bu deneyin yalnızca ölçümlerin tersinmezliğiyle ilgili özellikleri üzerinde odaklanacağım. Deney şöyledir.

Yatay durumdaki bir gümüş atomu akışı bir çift mıknatıs arasından geçer (Şekil 11.1). Soldan giren atomların hepsi daha önceden "sıfır hal" adını vereceğim özdeş hallerde hazırlanmıştır. Başlangıçtaki bu halin tam doğasını bilmemize gerek yoktur.[5] Mıknatıslar Şekil 11.1'de gösterildiği gibi, aralarındaki uzayda "homojen olmayan bir manyetik alan" oluşturacak şekilde ayarlanmışlardır. Bu alan akımı öyle bir şekilde ayırır ki, eğer bir tespit ekranı gösterildiği şekilde mıknatıslardan "sonraki aşamada" yerleştirilirse, atomlar ekran üzerinde başlangıç yönüne göre biri yukarıda, biri de

aşağıda olan iki farklı yerde görünür çarpmalar oluştururlar. Atomlar %50 olasılıkla rastgele iki yerden birine tek tek çarparlar; atomların hepsi aynı şekilde hazırlanmış oldukları için bu kuantum belirsizliğinin çarpıcı bir örneğidir. İki ışının incelenmesi üst bölgeye çarpan atomların artık sıfır halde değil de "artı hal" adı verilen farklı bir halde olmasına karşın, alt bölgeye çarpan atomların "eksi hal" adı verilen yeni bir halde olduklarını gösterir. Dolayısıyla mıknatıs-artı-ekran birleşimi hangi atomların artı halde, hangilerinin de eksi halde olduklarını belirleyen bir detektör işlevi görür. Bu da kuantumların bir görüntüleme ekranına çarpmadan önce bir hangi-yarık detektörünün kuantumları "yarık 1 haline" veya "yarık 2 haline" yerleştirdiği bir çift yarık deneyine tümüyle benzeşiktir.

Fazlası da var. Eğer tespit ekranı kaldırılır da yerine iki yol boyunca belirli noktalarda uygun bir şekilde seçilmiş mıknatıslar yerleştirilirse (Şekil 11.1'de gösterilmemiş), gösterildiği



Şekil 1.1 Stern-Gerlach deneyinin bir varyasyonu. Özdeş olarak hazırlanmış süperpoze atomlar "homojen olmayan bir manyetik alandan" geçerler. Gösterildiği gibi bir tespit ekranının yerleştirildiği deneyde atomların rastgele %50'si ekrana üst noktada, %50'si de alt noktada çarparlar. Ancak ekran kaldırılıp da ilave mıknatısların (gösterilmemiş) yerleştirilmesiyle iki akım birlikte geriye büküldüğünde bir detektör bütün atomları başlangıçta hazırlandıkları halde bulur (solda).

şekilde her bir akım orijinal yatay yoluna geri bükülebilir. Birleşmiş akımdaki atomları incelediğimizde şaşırtıcı bir sonuç ortaya çıkabilir; bu atomlardan hiçbiri artı ve eksi halde değildir. Hepsi de başladıkları sıfır haldedir!

Dolayısıyla tespit ekranı olmadığında bu deney tersinirdir. Fakat tespit ekranı olduğunda deney apaçık tersinmezdir, çünkü atomlar ekrana çarptıklarında tersinmez bir işaret bırakırlar. Buradan da bu deneydeki herhangi bir tersinmezliğin ve entropi artışının nedeninin *tümüyle* ekrana çarpma olduğu ortaya çıkar, çünkü ekran olmadığında deneyin tersinir olduğunu gördük. Dolayısıyla farka yol açan makroskobik tespittir ve işte bu noktada ölçümün tüm tersinmez etkilerini araştırmamız gerekir. Özel olarak salt dolanıklık, bir hangi-yarık detektörü çift yarık deneyinde olduğunda meydana gelen dolanıklık gibi tersinmezlikten sorumlu değildir.

Ekrandaki tespit tam olarak 10. Bölüm'de tanımlandığı gibi işler. Tespit ekranı her bir atomla etkileşerek dolanık ölçüm halini oluşturur:

> "Atom artı halde, üst bölgede parlama görünür" durumu, "atom eksi halde, alt bölgede parlama görünür" durumuyla süperpozedir.

Bu 10. Bölüm'de analiz ettiğimiz, tartışmalı Schrödinger'in kedisi durumudur (radyoaktif çekirdek şimdi gümüş atomu ve kedi de ekrandır), ki o bölümde bu halin yalnızca ilintilerin bir süperpozisyonu olduğunu ileri sürmüştük.

Bu deney ölçümün makroskobik kaydının hiç de küçük bir detay olmadığını kanıtlar. Makroskobik dünya üzerinde bir iz bırakana kadar hiçbir ölçüm tam değildir ve böyle bir iz bırakmanın ikinci yasa nedeniyle bir entropi artışı gerektirmesi tersinmezliğe işaret eder. John Wheeler'in tekrar tekrar vurguladığı gibi, "Hiçbir temel kuantum fenomeni *tersinmez*

bir büyütme eylemiyle sona erdirilmediği müddetçe fenomen değildir"[6] (vurgu bana ait). Örneğin ölçüm bir detektörün duyulabilir tık sesiyle kaydedilirse, tersinmez iz detektörün etrafındaki havaya tüm yönlerde yayılan bir ses dalgasıdır. Bu ses dalgası havayı biraz ısıtır ve zamanla büyük bir hava kütlesine yayılır (hangi açıdan bakılırsa bakılsın kaybolur). Doğanın dalganın yayılan bu enerjisinin her bir parçasını kendiliğinden toplaması (bu arada mutlaka havayı soğutur), tüm yayılma sürecini tersine çevirmesi ve bu enerjiyi detektörü ve havayı tık sesinden önceki hallerine geri getirmek için kullanması mümkün değildir. Aslına bakarsanız tersinir süreci ikinci yasa yasaklar, çünkü bu evrenin toplam entropisini azaltır!

Dolanıklık dahil, mikroskobik kuantum süreçlerin mikroskobik kaldıkları müddetçe tersinir kaldıkları ve ölçümlerin tersinmezliğinin makroskobik kayıt sürecinden kaynaklanması gerektiği sonucuna varırız. Önümüzdeki bölüm bütün evrende sürekli devam eden makroskobik bir kayıt sürecini inceler.

Çevresel Dekoherans Süperpozisyonları Nasıl Çöktürür?

Güneşli bir kumsaldaki bir çakıl taşının bulunduğu ortam şunları içerir: Atmosfer molekülleri, güneşten gelen fotonlar, yıldızlardan gelen kozmik ışınlar ve hatta büyük patlamadan gelen fotonlar. Her saniye bu tarz birçok kuantum çakıl taşıyla etkileşerek olası her yönde yansır veya *dağılır*. Dağılan fotonlar çakıl taşının yönelimi, yapısı ve rengi hakkında veriler taşımalıdır, çünkü aksi takdirde çakıl taşını görmemiz mümkün olmazdı. Bu tarz doğal "ölçüm" süreçleri, toplanan verileri bilinçli olarak gözlemleyen insanların mevcut olup olmamasından bağımsız olarak daima meydana gelir.

Böyle bir doğal ölçümün kuantum özelliklerini incelemek için bir çakıl taşı yerine bir atmosferik atom düşünelim. Bu

atom birbirlerinden makroskobik olarak ayrı mesafede iki veya daha fazla konumda süperpoze olmak gibi oldukça klasik fizik dışı bir halde olsun. Böyle bir süperpozisyonun laboratuvarda örneğin atomu bir çift yarık aparatından geçirerek oluşturulabileceğini biliyoruz, fakat bu doğal olarak da meydana gelebilir; örneğin eğer atom kendisinin büyük ölçüde kırılıp yayılmasına yetecek kadar dar bir açıklıktan geçerse. Böyle bir atom etrafındaki kuantumlarla etkileşirse ne olur? Örneğin süperpoze atom çevredeki bir fotonla, çift yarıktan çıkan bir süperpoze elektronun bir hangi-yol detektörüyle etkileşmesine benzer şekilde etkileşir: Eğer etkileşim atomun iki süperpoze konumunda önemli ölçüde farklıysa, bir foton atomu onunla ölçüm benzeri bir halde dolanık hale gelerek "ölçebilir". Böyle bir dolanma etkileşimi tıpkı 9. Bölüm'de ele alınan bir hangi-yol ölçümüne benzer! Dağılan foton tıpkı bir hangi yol detektörünün yarıklardan çıkan bir elektron hakkında veri taşıması gibi, atom hakkındaki hangi-yol verilerini taşır. 10. Bölüm'de irdelediğimiz gibi, bu ölçüm süperpoze atomu çöktürerek yani *dekohere* ederek (bir dizi küçük çevresel etkileşim yoluyla girişim örüntüsünü çıkarır) halini iki konumda birden olma süperpozisyonundan birinci veya ikinci konumda olma yerel karışımına çevirir.

Doğal çevrede tek bir dağılmış fotonun atomu bütünüyle ölçmesi (bütünüyle dekohere etmesi) olası değildir, çünkü çevredeki kuantumlar süperpozisyonları ölçmek için bir laboratuvar detektörünün organize olduğu şekilde özel organize değildir. Bir laboratuvardaki bir hangi-yol detektörü, her türlü rastgele etkileşen çevredeki kuantumların tam tersine, ölçülen kuantumun farklı konumlarında tespit edilebilir farklı şekillerde tepki verecek şekilde dikkatle kurulmuştur. İyi bir hangi-yol detektörünün, tespit edilen kuantumun süperpoze halleri arasında güvenilir biçimde ayırım yapması –güvenilir

biçimde dekohere etmesi– için tek bir etkileşim gerekmesine rağmen, tipik bir süperpoze atomu tamamen dekohere etmesi ve yerel bir karışıma dönüştürmesi için bu atomdan çevredeki kuantumların büyük bir bölümünün yayılması gerekir.

Dikkatli bir analiz[7] doğal olarak meydana gelen tipik süperpozisyonların dekoheransının birçok çevresel etkileşim gerektirdiğini gösterir. Dolayısıyla çevrenin yaptığı dekoherans bir dizi kısmi ölçüm ve kısmi çökme gerektirir; bunların her biri, bir hangi-yol detektörünün mevcut olduğu bir çift yarık deneyindeki yarıklarda meydana gelen tek adımlı ölçüme benzerdir, anlık ve yerbilmezdir.

İşte bu çevresel dekoherans süreci sayesinde çakıl taşı ve bu kitap gibi gündelik nesneler hiçbir bariz süperpozisyon, girişim veya yerbilmezlik emaresi göstermeden yayılmış kuantum alanı doğalarını kaybeder ve klasik biçimde davranırlar. Atomik boyutlardaki küçük cisimlerin çevresel dekoheransa daha az duyarlı olmalarının nedeni daha küçük olan boyutlarının bir sonucu olarak bunlardan daha az sayıda çevresel kuantumun dağılması ve dolanıklık neredeyse ayırt edilemez konumlar içerdiği için her bir dağılma olayının yalnızca az bir miktar dekoheransa yol açabilmesidir. Dolayısıyla büyük patlamadan gelen bir süperpoze foton dekohere olmadan evrende 13,8 milyar yıl boyunca yolculuk ettiği halde, dünya üzerindeki bir kum tanesi süperpozisyon emareleri gösterecek olursa maruz kaldığı pek çok çevresel etkileşim nedeniyle çevresel yönden ve gerçekte ânında dekohere olur. Aralarında bir milimetre mesafe olan iki konumda süperpoze olan ince bir toz tanesi gibi küçük cisimlerin büyük ölçüde yayılmış süperpozisyonları da neredeyse ânında dekohere olur, çünkü böyle bir süperpozisyonun dalları o kadar ayrıdır ki, bir daldan yansıyan, diğerin-

den yansımayan tek bir foton bütün süperpozisyonu bir karışıma dönüştürebilir. Benzer şekilde, iki paralel yarıktan yalnızca birinde bulunan tek bir detektör ilk başta iki yarıktan da çıkma süperpozisyonunda olan bir kuantumu yarıklardan birinden çıkan bir karışıma dönüştürmeye yeter.

Toz tanesi gibi mezoskobik cisimlerde çevresel dekoherans süperpozisyonları hızla karışımlara dönüştürür. Peki, ne kadar hızlı? Bu teorik olarak hesaplanmış[8] ve birkaç deneyde ölçülmüştür. İnce bir toz tanesinin çapı yaklaşık 10^{-5} metredir. Sanki toz tanesi çok yakın iki yarıktan çıkmış gibi, eğer toz tanesi iki yerde olma süperpozisyonundaysa ve iki süperpoze dalının aralarındaki mesafe birbirlerinin hemen yanında olacak şekilde aynı mesafeyse, toz tanesini sadece 10^{-31} saniyede dünya üzerindeki normal hava tümüyle dekohere ederdi. En iyi laboratuvar vakumu bile (gene de çok sayıda hava molekülü içerir) bunu 10^{-14} saniyede –bir saniyenin trilyonda birinin yüzde biri– dekohere ederdi. Eğer bu toz tanesi derin dış uzayda ise, büyük patlamadan kaynaklanan kozmik arka plan ışıması bunu 1 saniyede dekohere eder. Çapı 10^{-8} metre olan büyük bir molekül gibi daha küçük bir cisimde ise bu dekoherans zamanları daha uzundur (yine bunun aralarında molekülün çapı kadar mesafe olan, iki dallı bir süperpozisyonda olduğunu varsayarsak): Eğer molekül normal havadaysa 10^{-19} saniye, en iyi laboratuvar vakumundaysa 0,01 saniye, fakat derin uzaydaysa evrenin yaşından çok daha uzun.

Mesaj şudur: Yeterince küçük süperpozisyonlar bir süre devam edebildikleri halde mezoskobik veya makroskobik süperpozisyonlar kırılgandır ve ufak çevresel etkileşimler bunları hızla dekohere eder. İşte bu nedenle "kuantum dünyası" çoğunlukla mikro dünyayla tanımlanır. Tipik kuantum özellikleri mezoskobik veya makroskobik hale geldiklerinde genellikle hızla kaybolurlar.

Dolayısıyla kuantum evreni makroskobik seviyede klasik görünür, çünkü saran kuantum ortamı her cismi sürekli olarak "izler" ve makroskobik cisimler bu dekoherans sürecine özellikle duyarlıdır. Doğa hangi-dal detektörleriyle doludur! Bunların işlev yapmaları için insanların gerekli olmadığına dikkat edin; ne fizikçiler ne de laboratuvarlar. Doğa en azından büyük patlamadan bu yana süperpozisyonları çöktürüyor ve kuantumlar da dalgalı alan doğalarını kaybediyorlar.

Başlangıçtan bu yana mevcut bir hangi-yol monitörü olarak, mezoskobik ve makroskobik süperpozisyonları karışımlara dönüştüren doğanın rolünü ilk olarak açıkça 1980'lerin başlarında Wojciech Zurek fark etti.[9] Zurek'in, meslektaşlarının ve diğer bilim insanlarının çalışmaları kuantum dünyasının klasik deneyim dünyamıza nasıl yol açtığını büyük oranda açıklığa kavuşturmuştur.[10]

Çok çeşitli deneyler çevresel dekoheransı kanıtlamış ve fizikçileri dekoheransın, kuantum dünyasını dalgalı olmayan masa ve çaydanlıklara dönüştüren mekanizma olduğuna ikna etmiştir.[11] Güzel bir örnek de Viyana Üniversitesi'nden Anton Zeilinger ve Marcus Arndt liderliğinde bir grubun yaptığı bir deneydir. Bu grupla 8. Bölüm'de tanıştınız. Bu bölümde 2002'de onların C_{70} gibi büyük moleküllerde ve bazı biyolojik moleküllerde girişimi kanıtlayan Talbot-Lau interferometre tekniklerini inceledik. Girişim bu büyük moleküllerden her birinin, interferometredeki yolculuklarında birden fazla yol izleme süperpozisyonunda olduğunu gösterdi.

Bu grup 2004'te aynı tekniği kullanarak C_{70} moleküllerinin süperpozisyonlarının "çevresel" dekoheransını ikna edici bir şekilde kanıtladı.[12] Çevresel kelimesini tırnak içine aldım, çünkü bu deneyde çevre bir dış çevre yerine bizzat molekülle-

rin içinden çıktı. C_{70} molekülleri 2002 deneyinde olduğu gibi interferometreden tek tek geçti. Fakat ilave bir şey yapıldı; deneyi yapanlar interferometreden göndermeden hemen önce molekülleri ısıttılar. Yeterli ısıtmayla, tıpkı elektrikli bir sıcak plakanın ısıtıldığında termal ışıma yayması gibi (sıcaklığını uzaktan hissedebilirsiniz ve kızıl parlayabilir), bizzat moleküllerin de görünür ve kızılötesi "termal fotonlar" şeklinde termal ışıma yaymalarını beklediler. Işıma molekül içindeki birçok atomun ve başka kuantumların rastgele termal hareketlerinden kaynaklanır.

Dekoherans teorisine göre kısmi bir hangi-yol detektörü olarak işlev gören bu ışıyan fotonların her biri, molekülden çevresine hangi-yol verilerinin belirli bir miktarını taşıyarak molekülün süperpozisyon halini kısmen çöktürür. Eğer bu tarz yeterli veri aktarılırsa, bu hangi-yol ölçümü molekülü dekohere ederek girişim örüntüsünün sönükleşmesine veya kaybolmasına neden olmalıdır; bir karışıma gelişen bir süperpozisyonun imzası.

Sonuçlar eylem halindeki dekoheransı kanıtladı. Çok az ısıtılan moleküllerden yayılan fotonların enerjileri düşüktü ve dolayısıyla frekansları da düşük ve dalga boyları uzundu; aralarındaki mesafe böyle büyük bir molekül için son derece küçük olan olası yollar arasında ayrım yapılamayacak kadar uzundu (6. Bölüm'den hatırlarsanız, bir kuantumun belirsizliği kütlesi arttıkça azalır). Ancak moleküller birkaç bin Kelvin'e ısıtıldığında yayılan fotonların dalga boyları olası yollar arasında ayrım yapmaya yetecek kadar kısaldı, dolayısıyla çevreye iletilen hangi yol verilerinin süperpoze molekülleri kısmen dekohere etmeye yeterli olmaları girişim örüntüsünün kısmen kaybolmasına neden oldu. Yeterince yüksek sıcaklıklarda teori ve deney sadece iki veya üç yayılan fotonun her bir molekülü dekohere etmeye yettiğini gösterdi. Tah-

minler ve gözlemler arasında niceliksel uyum vardı. Girişim örüntüsü tam öngörülen sıcaklıkta dekohere olmaya başladı ve kalan girişimin görünürlük derecesi tam olarak öngörüldüğü gibiydi.

Veriler foton foton çevreye sızdıkça deney dekoheransın eylemini adım adım açığa çıkardı. Ayrıca süperpozisyonların dekoheransa olan ekstrem duyarlığını da kanıtladı. Yüksek sıcaklıklı sadece birkaç foton devasa bir süperpoze molekülü tutarsız (inkoherent) bir karışıma dönüştürür. Süperpoze kuantumlar hassastır.[13]

Dekoherans ve Ölçüm Problemi

Dekoherans doğal çevresel ölçümler için tersinmezlik probleminin bir çözümünü sağlar. Dekoherans ilk olarak 1980'lerin başlarında, görünüşte klasik çevremizin çevre ile olan ölçüm benzeri etkileşimlerden nasıl doğduğunu açıklamak için ortaya atıldı.[14] Yerel hal argümanı (10. Bölüm) bu tarz ölçümlerin süperpozisyonları kesin sonuçları olan dolanık yerbilmez ölçüm hallerine dönüştürdüğünü göstererek çevresel ölçümler için kesin sonuçlar problemini çözer. Fakat tıpkı laboratuvar ölçümlerinde olduğu gibi, bunun aynı zamanda doğal ölçümlerle ilişkili tersinmezlik problemini de çözüp çözmediğini sormalıyız.

Yanıt evettir. Nedeni de şudur: Görmüş olduğumuz gibi, küçük bir süperpoze toz tanesi çevre tarafından dekohere edildiğinde cisim bir dizi dolanıklık kaynaklı küçük kısmi çökmelere uğrar. Bu çevresel ölçümler taneyle etkileşen ve daha sonra geniş bir alana yayılan birçok çevresel foton ve hava molekülü tarafından "kaydedilir". Tanenin dekohere olmadan önceki süperpozisyon haline dair veriler artık rastgele dört bir yana dağılır. Nasıl çırpılmış bir yumurtayı eski haline geri alamıyorsanız, bu parçaları da tersinir bir şekilde

geri toplayamaz ve hava artı süperpoze tanenin küresel halini yeniden oluşturamazsınız. Bu argüman çevresel dekoherans durumunda çevrenin muazzam boyutu nedeniyle özellikle inandırıcıdır. Bu eylem halindeki ikinci yasanın bariz bir örneğidir; çünkü nereden bakılırsa bakılsın süreç tersinmezdir ve entropi artmıştır.

Fizikte nereden-bakılırsa-bakılsın argümanlarının sunulmasına karşı ünlü bir itiraz olduğu için,[15] bizzat ikinci yasanın doğası gereği bir nereden-bakılırsa-bakılsın ilkesi olduğuna dikkat edilmelidir. Görmüş olduğumuz gibi (3. Bölüm), gazla dolu bir kutuda, herhangi dışsal bir etkinin yardımı olmadan, sadece tesadüf eseri, kendiliğinden ayrı ayrı sıcak gaz ve soğuk gaz bölgeleri *oluşabilir*. Bunun gerçekleşme olasılığı çok ama çok az olsa da sıfır değildir ve kutuların giderek daha az miktarlarda gaz içerdiğini göz önüne alırsak bu olasılıklar da artar. Kaynağı ikinci yasa olan bu tarz nereden-bakılırsa-bakılsın argümanları fizik ilkeleriyle tam anlamıyla tutarlıdır. İşte bununla ilgili bir öykü.

Schmo'yla derin bir felsefi sohbet yapmakta olan Joe şöyle der: "Entropi asla azalmaz."

"Asla mı?" diye sorar Schmo.

"Hayır, asla" diye yanıtlar Joe.

"Ne? ASLA MI?" diye bağırır Schmo.

Joe yukarı bakarak omuz silker. "Pekâlâ, neredeyse hiç."

Dolayısıyla yerel hal çözümü artı dekoherans birleşerek ölçüm problemini doğal çevresel ölçümler durumu için tamamen çözer. Çok sayıda çevresel kuantum, süperpozisyonu artık cisim ile birçok çevresel kuantumun iyice yayılmış hali arasında yerbilmez bir dolanıklık şeklini alan bir ölçüm haline çevirdiğinde, çevre süperpoze bir cismi (molekül, toz ta-

nesi vb.) ölçer. Yerel hal argümanı bu ölçüm halinin bir kesin özellikler karışımını temsil ettiğine işaret ettiği halde, çevresel kuantumların oldukça yayılmış doğaları sürecin tersinmez olduğunu garanti eder.

Yıllardır dekoherans ile ölçüm probleminin çözümü arasındaki ilişkinin tam olarak ne olduğuna dair bir soru işareti vardır. Bazı açıklamalar dekoheransın tek başına ölçüm problemini çözdüğüne işaret eder gibi görünür, fakat bu doğru değildir. Bunun özellikle bariz bir kanıtı Stephen Adler'ın provokatif başlıklı makalesi, "Dekoherans Neden Ölçüm Problemini Çözmedi: P. W. Alderson'a Yanıt"ta görülür.[16] Nobel Ödülü'nü kazanan Anderson 2001'de dekoheransın ölçüm problemini çözdüğünü iddia etti.[17] Adler'in tespiti doğrudur; dekoherans tek başına kesin sonuçlar problemini çözmez, dolayısıyla tek başına ölçüm problemini de çözmez.[18] Dekoherans hakkında çok sayıda yazı kaleme almış kuantum temelleri uzmanı Maximilian Schlosshauer de "dekoheransın kuantum ölçümündeki kesin sonuçlar problemini çözemeyeceğini" söyler.[19]

Dekoheransın ölçüm problemiyle olan bağlantısı doğal çevresel ölçümler durumunda tersinmezlik problemini çözmesidir ve bu da çevresel etkileşimlerin süperpoze bir kuantumu nasıl ölçüm haline dönüştürdüğünü gösterir, fakat bu ölçüm haliyle ilişkili kesin sonuçlar problemini çözmez. Bununla birlikte kesin sonuçlar problemi, 10. Bölüm'de açıklandığı gibi, yerel hal analiziyle çözülür.

Dolayısıyla yerel hal çözümü çevresel dekoheransla birleşerek çevresel ölçümler durumunda ölçüm problemini çözer. Peki ya laboratuvar ölçümleri durumu? Burada önceki bölüm kesin sonuçlar problemini çözmesine rağmen tersinmezlik problemini çözmedi. Tersinmezlik iki durumda biraz farklı

problemler teşkil eder, çünkü laboratuvar ölçümleri doğal çevrenin etkisi çok az olacak şekilde kontrol altındadır. Aslına bakarsanız, bir deneyci çabalarının çoğunu tam olarak bir deneyin sonucu üzerinde rastgele çevresel etkileşimlerin önemli bir etkisinin olmamasını sağlamaya yöneltir.

Stern-Gerlach deneyi irdelememiz (Şekil 11.1) yanıtın makroskobik tespit sürecinin tersinmez doğasında bulunduğu izlenimini uyandırıyordu. Bu izlenim çevresel ölçümlerdeki tersinmezlik probleminin çözümüne benzer: Çevresel ölçümler sayısız çevresel kuantumla "kaydedildiği" halde, laboratuvar ölçümleri tespit ekranları, elektronik tıklamalar veya belki de kedilerle kaydedilir.

Bir çift yarık deneyinde bir elektronun tespit ekranı üzerinde oluşturduğu tek bir çarpmaya odaklanalım; örneğin Şekil 5.4a'daki küçük noktalardan biri. Bu nasıl kaydedildi? Bu izi tek bir elektron başlattı, ancak bunu makroskobik olarak gözlemlemek için ilk çarpma tespit edilmeli ve daha sonra insanların göreceği şekilde büyütülmeliydi. Bu her mikroskobik olay laboratuvar detektörünün amacı ve bir "tersinmez büyütme eyleminin" (daha önce Wheeler'in belirttiği gibi) kuantum ölçümleri için elzem olmasının nedenidir.

Şekil 5.4'ün gösterdiği 1989 tarihli deneyde her bir elektron aynı halde, tek bir koherent halde yayıldı. EM alanlar bu elektronları yüksek hızlara, saniyede yaklaşık 180.000 kilometreye yani ışık hızının %60'ına çıkardı; bu, normal bir hidrojen atomunun yörüngesinde saniyede "yalnızca" 2.000 km ortalama hızla dönen elektronun hızından çok daha fazladır. Tespit edilebilir bir çarpma oluşturmak için yüksek enerjiler gerekiyordu. Her bir elektron paralel bir yarık çiftinden geçtikten sonra ekranla belirsiz bir biçimde etkileşen bir girişim haline yayıldı. Etkileşim elektronu ekranla dolanık hale getirerek elektronu dekohere etti ve ânında onu önceki tüm ek-

rana yayılmış süperpozisyon halinden yerel olarak gözlemlenmiş bir karışıma çökertti. Başka bir deyişle, elektron ekran üzerindeki atom boyutundaki birçok küçük bölgeden birine rastgele çöktü.[20]

Bu etkileşim sonucunda deneyde kullanılan floresan ekranda çarpmanın konumunu belirten ve büyüten yaklaşık 500 foton oluştu; bu hâlihazırda tersinmez bir süreçtir, çünkü fotonlar her yöne rastgele yayılır. Her bir foton daha sonra *fotoelektrik etki* adı verilen bir süreçte metal bir plakaya çarpıp ondan bir elektron çıkarttı ve böylece 500 fotonun her biri düşük enerjili bir elektrona çevrildi. Daha sonra bu düşük enerjili 500 elektron, eski (düz ekranlardan önce) TV tüplerinin çalışmasına benzer şekilde, bir TV monitöründe gösterilebilen bir nokta görüntüye odaklandı. Bu sürecin her adımı –500 fotonun oluşumu, fotoelektronlara dönüşümleri ve nihai görüntüyü oluşturmak için büyütülmeleri– entropi yaratır ve bu termodinamik açısından tersinmezdir. Bu eylem halindeki ikinci termodinamik yasasıdır.

Bu genel durumu tanımlar: Bir kuantum olayının laboratuvarda tespiti ve büyütülmesi mutlaka tersinmezlik ve entropi üretimini gerektirir. Birçok mikroskobik kuantumdan oluşan makroskobik bir aygıt olan laboratuvar detektörü çevrenin doğal ölçümlerde oynadığı dekohere etme rolünü oynar.

Özet olarak: Hem laboratuvar hem de doğa anlamında kuantum ölçüm problemi tümüyle, kesin sonuçlar probleminin yerel hal çözümü ve dekoherans sürecinin tersinmezliğiyle çözülür.

Evrensel Dolanıklık

RTO deneyindeki ölçümler gibi mikroskobik "ölçümler" de ilginç ve aydınlatıcı bir durum ortaya çıkarır. Bu deneyde biri veya her ikisi bir detektöre çarpıncaya dek "birbirlerini ölçen"

iki dolanık foton olduğunu hatırlayın. Fotonlar detektörlere doğru giderlerken henüz makroskobik bir iz yapılmamıştır; ölçüm hâlâ tersinirdir ve henüz tamamlanmış değildir. Daha önce irdelediğimiz gibi, küresel hal hâlâ tersinir olmasına rağmen, yerel olarak gözlemlenebilir, kesin fakat hâlâ belirsiz sonuçlar halihazırda fotonların karışık yerel hallerinde bulunur. Sonuca hâlâ karar verilmemiştir. İki fotondan birinin bir detektöre makroskobik olarak gözlemlenebilir bir şekilde çarpması daha sonra küresel ölçüm hali süperpozisyonunu dekohere eder (Şekil 9.2 ve 9.3'de kesikli ve kesiksiz çizgilerle tasvir edilen iki ilinti) ve tersinmez kılarak ölçümü tamamlar. Bu doğanın sonuca karar verdiği zamandır; bu, bir detektörde oluşan ilk çarpmaya kadar belirsiz ve tersinir olan bir sonuçtur.

Çarpmadan önce ilginç bir durum mevcuttur. Her bir foton makroskobik bir mesafede bulunan başka bir fotonla dolanık haldeyken laboratuvarda yol alır. Bir kuantumun uzaktaki başka bir kuantumla dolanık olduğu halde uzayda yol aldığı bu durum yaygındır ve muhtemelen evrenseldir. Büyük patlamadan gelen fotonlar ve başka kuantumlar veya uyarılmış bir atomun bozunmasıyla uzaya yayılan bir foton veya hiçbir dekoherans etkileşimine maruz kalmadığı halde uzayda yol alan başka bir dolanık kuantum; bunların hepsi de bu durumdadır. Benzer şekilde, şimdi gözünüze giren bir foton başka bir yerdeki bir kuantum etkileşiminden doğar ve başka bir etkileşim meydana gelene kadar başka kuantumlarla dolanık halde kalmalıdır. Bu tarz kuantumlar kesin fakat belirsiz sonuçların yerel karışımları içindedir ve aynı anda, aralarında büyük mesafe olan iki kuantum içeren, dolanık bir küresel koherent halindedir. Örneğin evrendeki atomların yüzde yetmişi büyük patlama sırasında oluşmuş hidrojen atomlarıdır. Çoğu büyük patlamadan kısa süre sonra bir başı-

na sürüklenmiştir ve diğer ilk maddelerle hâlâ bir dolanıklık sürdürüyor olmalıdır.

Tüm bunlardan çıkan bir sonuç da evrensel dolanıklık önermesidir. Her kuantum diğer kuantumlarla dolanık olabilir ve bu dolanıklıkların bir kısmı makroskobik ve kozmolojik mesafelere uzanabilir. Daha sonra yerbilmezlikten doğar gibi görünen çıkarım üzerinde düşünmek ilginç olabilir. Tek bir kuantum burada dünya üzerinde ne zaman etkileşse, bununla dolanık haldeki ve belki de çok uzakta bulunan başka bir kuantum kendi kuantum halini ayarlar. Muhtemelen yaptığınız her hareket bütün evrende anlık bir mikroskobik titremeye neden olur.

Fevkalade Bir Deney Başarısı

2012'deki Nobel Fizik Ödülü, biri David Wineland, diğeri de Serge Haroche'nin yönettiği, kuantum süperpozisyonuyla ilgili iki deneye verildi. Wineland'in deneyinde (8. Bölüm) tek bir atom aynı anda iki zıt yönde ileri geri hareket ettirildi. Bu bölümü Haroche'nin 1996'da Paris'teki Ecole Normal Superieure'de meslektaşlarıyla yaptığı deneyle bitireceğim. Ölçüm kaynaklı çökmenin detaylarını araştırma süresince bu aşırı deney kuantum temellerinin çoğunu kanıtlayarak bu öykülere mükemmel bir final sağlar.[21]

Wineland'in deneyi gibi Haroche de tek bir atomu olağandışı bir süperpozisyona yerleştirdi ve atomun kendisiyle kesişim yapmasını sağlayarak süperpozisyonun gerçek olduğunu kanıtladı. Daha sonra süperpozisyonu bir "hangi-dal" detektörüyle ölçtü. Detektör ve atom dolanık hale geldiklerinde, bir hangi-yol detektörünün mevcut olduğu bir çift yarık deneyinde olduğu gibi, süperpozisyon iki dalının bir karışımına çöktü. Haroche daha sonra sürekli olarak "açıktan" "kapalıya" değişebilen bir detektör oluşturarak çökmenin de-

taylarını inceledi. Sonuçların kanıtladığına göre iki anlık hal de laboratuvarda çöker, dolanıklıktan anlık olmayan çevresel dekoherans ortaya çıkar ve bunlar aynı ölçüm benzeri sürecin ayrılmaz parçalarıdır.

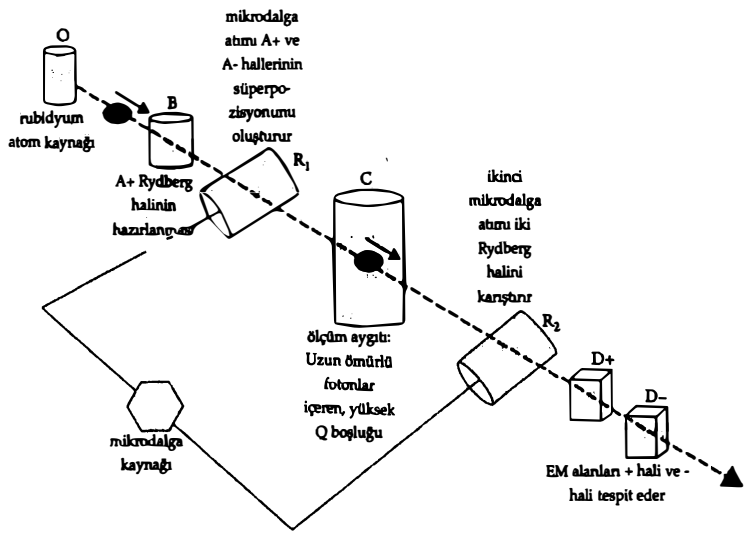
Şimdi deneyin üzerinden geçelim. Haroche süperpoze olup ölçülecek kuantum olarak element numarası 37 olan bir rubidyum atomunu kullandı. Rubidyum periyodik tabloda ilk sütunda ve beşinci sırada yer alır. Bu da şu anlama gelir: Çekirdek etrafında dört eş merkezli küre yani "elektron kabuğu" halinde 36 elektrondan oluşan, istikrarlı ve sıkı bağlı bir iç set, ayrıca bu iç kabukların dışında tamamlanmamış beşinci bir elektron kabuğu oluşturan (hatırlarsanız her bir elektron çekirdeğin her tarafına yayılmış bir alandır) tek bir elektron. Tahmin edebileceğiniz gibi, bu dıştaki 37. elektron kimyasal reaksiyonlarla veya lazerlerle, istikrarlı dört iç kabuğu bozmadan, farklı hallere kolayca manipüle edilebilir. Haroche'nin grubu lazer kullanarak bu elektronu beşinci kabuktaki normal konumundan çıkararak teorik olarak sonsuz sayıdaki olası kabukların 51.'sine yönlendirdi. Bu dikkate değer bir şeydir. Tek bir elektronun, örneğin 50 ve 52. kabuklardan kaçınarak hassas lazer ayarının yardımıyla tam olarak 51. kabuğa yönlendirilebilmesi hayret vericidir. Üstelik 51. kabuk içinde birçok olası hal yani "yörünge" vardır ki, Haroche aralarından en dairesel olanı seçmiştir.

51. kabuğun yarıçapı muazzam bir rakam olan 125 nanometredir ki, bu sıradan bir atomdan 2.500 kat büyüktür! Böyle büyük bir atom EM ışımaya maruz kaldığında, dıştaki elektron EM alana güçlü bir biçimde bağlı, uzatılmış bir anten gibi davranır. Bu yararlı bir özelliktir ve Haroche'nin bu atomun bu halini seçme nedenlerinden biridir. Dev bir yörüngede tek

bir elektronu olan bunun gibi atomlara, bu "büyük atomları" inceleyen İsveçli fizikçi Johannes Rydberg'in onuruna *Rydberg atomu* adı verilmiştir.

Atom ile evreni kaplayan vakum EM alan arasındaki kaçınılmaz etkileşim nedeniyle (7. Bölüm) yüksek enerjili uyarılmış bir halde bulunan bir elektron içeren bir atom eninde sonunda kendiliğinden daha düşük enerjilere bozunacaktır. Şaşırtıcı bir biçimde, dairesel bir yörüngede bulunan uyarılmış bir elektron içeren Rydberg atomları bu sürece karşı oldukça dayanıklıdır, böylece atom bozunmadan çok sayıda deneysel manipülasyona dayanabilir; bu halin seçilmesinin başka bir nedeni daha.

Atomu bu Rydberg haline yerleştiren Haroche daha sonra ona kısa bir EM mikrodalga "atımıyla" nazikçe dokundu. Eğer atımın frekansı ve süresi doğruysa, bu atomu dış elektronunun 50. ve aynı zamanda 51. kabukta olduğu hassas bir süperpozisyona yerleştirebilir. Bu iki süperpoze Rydberg



Şekil 11.2 Haroche ve meslektaşlarının deneyi

dallarından yüksek enerjili dal olan 51. kabuğa *A*+ ve düşük enerjili dal olan 50. kabuğa da *A*- diyeceğim.

Bu süperpozisyon halini başarmak başlı başına şaşılacak bir beceridir! Ancak deney bu süperpozisyonu ölçerek ve manipüle ederek bunun çok daha ilerisine geçer.

Haroche detektör olarak bir EM alan içeren *yüksek Q boşluğu* adı verilen bir aygıt kullandı. Bu boşluk deneyi yapmaya yetecek kadar uzun süre fotonları tutabilen aynalarla sınırlanmış ve vakumlanmış, küçük bir bölgedir. Bir yüksek Q boşluğu bir fotonu aynalar arasında ileri geri iki milyon kez sıçramasına yetecek kadar uzun süre –bu durumda 0,0002 saniye– tutan bir boşluktur. Boşluk 3 santimetre uzunluğunda, ilaç kutusu şeklinde vakumlanmış bir silindirdir; iki düz ucunda birbirlerine bakan, her biri 5 cm çapında, oldukça parlatılmış aynalar vardır. Bir lazer boşluğa 0 ila 10 arasında foton sağlar. Bu boşluk alanı, bir lazer ışınındaki fotonların koherent olduğu şekilde "koherenttir" (8. Bölüm). Bütün fotonlar toplu olarak tek bir kuantum alanı haline katılır, böylece boşluk içindeki alan tek bir kuantum cisim gibi davranır. Her bir denemede boşluk içine birkaç foton yerleştirilir, foton kaynağı kapatılır ve daha sonra fotonlar aynalar arasında serbestçe sıçrar. Bu neredeyse mükemmel foton kutusu deneyin anahtarıdır. Şekil 11.2 düzeneği gösterir. Bir O kaynağı her seferinde bir rubidyum atomu yayar; B'deki bir lazer atımı hareket eden atomu *A*+ Rydberg haline uyarır; R_1'deki bir mikrodalga atımı bu hali bir *A*+ ve *A*- süperpozisyonuna dönüştürür; süperpoze atom, atomun halini ölçen, (ve dolayısıyla çöktüren) tespit edici C boşluğundan geçer; bazı denemelerde R_2'de ikinci bir mikrodalga atımı kullanılır (daha sonra açıklanacak nedenlerden dolayı) ve D+ ve D- detektörleri ölçülen atomun A+ halinde mi (bu durumda D+ kaydeder) yoksa A- halinde mi (bu durumda D- kaydeder) ortaya

çıktığını kaydeder. Haroche'nin her denemenin sonucunu C detektöründeki fotonları gözlemleyerek öğrenmediğine dikkat edin, ki bir "detektörün" bu yöntemle kullanılmasını bekleyebilirsiniz. Bunun yerine, atom C detektörü tarafından A+ veya A- dallarından birine çöktürüldükten sonra D+ ve D-'de doğrudan gözlemlemek daha uygundu.

Her bir atomun C'den ölçülmeden geçmesi için boş C (foton içermez) ile deneysel provalar başlar. Bu durumda D+ ve D- detektörleri, tıpkı çift yarık deneyinin yarıkta bir hangi-yarık detektörü olmadığında ekrandaki girişimi kanıtlaması gibi, atomun iki süperpoze dalı arasındaki girişimi kanıtlar. Bunun nedeni iki yarıktan (detektör olmadığında) geçen bir atomun kendisiyle kesişim yapması gibi, süperpoze rubidyum atomunun da kendisiyle kesişim yapmasıdır. Bu girişim boşluğa yaklaşan her bir atomun gerçekte iki Rydberg halinin bir süperpozisyonunda olduğunu doğrular.

Şimdi bu işlemlere C ölçme aygıtını yerleştirelim. Boşlukta sadece birkaç foton vardır, bunlar da bir EM alan oluşturur. Boşluğun bir ölçüm aygıtı olarak işlev görmesi için, atom A+ halinde detektörden geçerse *E+* adı verilen bir alan haline, atom A- halinde geçerse *E-* adı verilen farklı bir alan haline dönüşmelidir. Bu durumda Schrödinger'in denklemi, eğer *süperpoze* atom boşluktan geçerse boşluk içindeki atom-alan etkileşiminin birleşik atom-artı-alan sistemini dolanık ölçüm haline yerleştirdiğini gösterir. Bu, bir hangi-yol detektörü mevcut olduğunda bir elektronun bir çift yarıktan geçmesi gibi bütün ölçüm durumlarında olan şeydir (10 Bölüm). Sonuç atomik A+ hali boşluğun E+ haliyle *ve* A- de boşluğun E- haliyle ilintili olan, dolanık bir "Schrödinger'in kedisidir".

Bildiğiniz gibi, böyle bir ölçüm atomu bir A+ ve A- karışımına çöktürür. Haroche'nin grubu da tam olarak bu karışımı bulmuştur. D+ ve D- detektörleri beklenen sonuçları doğrula-

dı. Hiçbir girişim etkisi görülmeksizin, denemelerin %50'sinde atom E+ halinde ve %50'sinde de E- halinde bulundu. Bu tıpkı çift yarık deneyine benzer! Boşlukta hiçbir foton olmadığında (ölçüm yok) her bir rubidyum atomu süperpoze halini sürdürdü ve girişim sergiledi; bir ölçümle birlikte her bir atom boşluk alanıyla dolanık hale gelip atomun iki süperpoze halinden birine çökerek hiçbir girişim belirtisi göstermeyen bir inkoherent %50-%50 karışım halini aldı.

Bu noktada Haroche ölçümün detaylarını ve süperpoze kuantum halinin çökmesini yeni bir deneysel bağlamda doğrulamıştı. Daha sonra deney, ölçülmeyen atom (boşlukta fotonların olmadığı) ile ölçülen atom (boşlukta fotonların olduğu) arasındaki fenomenleri araştırdı. Buna *kısmi ölçüm* diyelim.

Uygun bir detektör ölçmeye çalıştığı farklı haller arasında açıkça ve belirsiz olmayacak şekilde ayrım yapmalıdır. Haroche'nin deneyindeki detektör hallerini *E+* ve *E-* olarak isimlendirdim. Doğru bir ölçüm için bu iki alan hali farklı olmalıdır.[22] Daha sonra Haroche ölçümsüz ve mükemmel ölçüm arasındaki aralığı, E+ ve E- hallerinin hafif farklı, orta farklı veya tümüyle farklı olmalarına yol açacak şekilde, boşluktaki iki ayna yüzü arasındaki mesafeyi değiştirerek araştırdı. EM alan halleri giderek daha farklılaştıkça girişim saçakları giderek daha az farklı hale geldi ve nihayet büsbütün kayboldu. Bu bir kez daha dolanıklık, ölçüm ve çökme arasındaki bağlantılara dikkat çeker ve kısmi ölçümün nasıl kısmi çökmeye yol açtığını göstererek dekoherans teorisini destekler.

Tüm bunlar yeterli değilmiş gibi, Haroche son bir şey ekledi. R_2'deki bir lazer atımı vasıtasıyla atomun süperpozisyonunu, atomun A+ veya A- hallerinin tespitini boşluk alanının

iki farklı *süperpozisyon* haliyle –E+ ve E- süperpozisyonlarını gerektiren hallerle– ilintili olacak şekilde değiştirdi. Buradaki amaç Haroche'nin boşluğun aynalarında kaçınılmaz olarak olması gereken küçük kusurların neden olduğu boşluk alanı süperpozisyonlarının kademeli doğal dekoheransını gözlemlemek istemesiydi. Bunu başarmak için her denemede boşluktan bir yerine iki atom gönderdi. İkinci atom birinci atomun ardından belli bir süre sonra gitti. Bunları bir kediyi izleyen bir fare olarak düşünün. Kedi boşluğu bir süperpozisyona yerleştirir ve fare daha sonra boşluğun alan halini inceleyerek kısa bir süre sonra beklenen dekoheransını tespit eder.

Kedi ile fare arasındaki farklı zaman gecikmeleri, boşluk alanının başlangıçtaki çeşitli süperpozisyon halleri ve boşluktaki çeşitli foton sayılarıyla birçok deneme yaparak, ekip boşluk süperpozisyonunun çevresel kusurlardan kaynaklanan kademeli dekoheransının izini sürdü. Sonuçların zaman içinde boşluk alanının gerçekten de bir karışıma dönüştüğünü doğrulamaları kuantum dünyasını normal dünyamıza dönüştürmede dolanıklık ve dekoheransın rolünü kanıtladı.

Sonuçlar beklendiği gibi süperpozisyonun iki dalı daha farklı olduğunda dekoheransın daha hızlı olduğunu doğruladı. Eğer bir kediyi bir canlı ve ölü süperpozisyonuna *yerleştirebilseniz*, dalları arasındaki muazzam fark nedeniyle hızla dekohere olurdu. Ve boşluktaki foton sayısı daha fazla olduğunda dekoherans daha hızlıdır. Eğer büyük sistemler bir süperpozisyon haline yerleştirilirlerse daha hızlı dekohere olurlar. İşte bu yüzden muhtemelen asla süperpoze bir masa, çaydanlık, lahana, kral veya dondurmaya rastlayamayacaksınız.

Aynadan geçtiniz ve kuantum diyarını araştırdınız. Umarım yolculuğunuz anlamlı ve eğlenceli olmuştur.

Yüz yıldan daha uzun süre kuantumun tuhaf ve sözümona paradoksal doğasından çok anlam çıkartılmıştır. Bu varsayılan kuantum tekinsizliği çok fazla düzeltme ve yorum girişimine yol açmıştır. Hatta birçok uzman teorinin gerçekliğin bir tanımı değil, insanların deneylerin sonuçlarını tahmin etmelerine yardımcı olan matematiksel bir yöntem olduğunu iddia etmişlerdir. Niels Bohr'un ifade ettiği gibi, "Bir kuantum dünyası yoktur. Sadece soyut bir kuantum tanımı vardır."[23] Bu hipoteze göre kuantum teorisi gerçek olan bir şeyi tanımlamaz, dolayısıyla kuantum halinin çökmesiyle ve diğer tuhaf kuantum davranışlarıyla ilgilenmemiz için bir neden yoktur.

Kuantum ikilemlerinin böyle kolay çözülmesi bilimin doğal dünyanın gerçekliklerini anlama tasarısından vazgeçmesine eşittir. Bu olağandışı bir kanıt gerektiren, olağandışı bir iddiadır.

Oysa böyle bir kanıt yoktur ve kuantumları taşlardan daha az gerçek olarak görmemizi gerektirecek bir neden yoktur. Doğrusu taşlar kuantumlardan oluşur. İnsanoğlu evrenin merkezinde kendisinin olduğunu tasavvur etme kibrini çok uzun bir zaman sürdürse de, gerçekliğin sadece günlük yaşamlarımızda deneyimlediğimiz türde şeyleri kapsadığını düşünmemiz için bir neden yoktur. Gerçek dünya örneğin bir çaydanlığın ebatlarından 10'un birkaç katı kuvvetinde küçük olan mesafelerle ifade edilen uzamlarda da var olmayı veya anlaşılabilir olmayı sürdürür. Atomik ve atomaltı süreçler çaydanlıklar kadar gerçektir ve teknolojinin yardımıyla insanların deney ve anlayışına açıktır.

"Normal" diye adlandırmaktan hoşnut olduğumuz makroskobik ve klasik dünyanın bakış açısından, dalga-parçacık ikiliği, belirsizlik, kuantum halleri, süperpozisyon, yerbilmezlik, ölçüm ve kuantum sıçramalarında kesinlikle bir

tuhaflık vardır. Gel gör ki, burada mantıksal çelişkiler, deneylerle uyuşmazlıklar ve kuantum fiziğinin gerçek dünya dışındaki başka bir şeyle ilgili olduğuna dair bizi ikna etmesi gereken bir şey söz konusu değildir. Eğiliminize bağlı olarak kuantum fiziği ya cezbedici bir biçimde sezgilere aykırı ya da delirtici bir şekilde kafa karıştırıcıdır, fakat tümüyle istikrarlıdır ve deneysel açıdan doğrudur. Tüm albeni ve bilmeceleriyle onu kabullenmenin ve düzeltmeye veya yeniden yorumlamaya çalışmaktan vazgeçmenin zamanıdır. Başka bir deyişle, gevşeme ve dünyanın bizim düşündüğümüz gibi olmadığını kabul etme zamanıdır. Doğa bizim aklımızın alabileceğinden çok daha yaratıcıdır.

En temel teorimiz ona karşı çıkanların varsaydığından daha iyi durumdadır. Kuantum fiziği, yüzeyini muhtemelen yalnızca kazımaya başladığımız geniş kapsamlı fenomen ve fikirleri içeren sahipsiz bir hazinedir. Bu fikirlere tam anlamıyla kucak açmanın, onları evren, gezegenimiz ve kendimiz hakkındaki düşünüş biçimlerimize dahil etmemizin zamanıdır. Bu, zihinlerimizi meşgul edecek ve hayal gücümüzü çok uzak geleceğe çekecek bir süreçtir, çünkü kuantum fiziği gerçekten de kimsenin tasavvur etmiş olabileceği bir şey değildir.

TEŞEKKÜR

Bu kitap bütün bilimler gibi işbirliğine dayanıyor. Birçok insan zamanı ve ilgisiyle katkı yaptı. Kardeşim Richard Hobson ile sevgili arkadaşım Ulrich Harms oldukça ham bir taslağı okuyarak kendi açılarından geri besleme sağladılar; Richard yazar, matematikçi ve öğretmen, Ulrich de fizikçi ve öğretmen olarak. Yazım sürecinin erken bir evresinde yardımıma koşan yorumları projenin geri kalanında bana rehberlik yaptı ve kitaba son halini vermemde yardımcı oldu.

Arkansas Üniversitesi, özellikle Fizik Bölümü çok destek oldu. Meslektaşlarım Claud Lacy ve Suren Singh'in çalışmalarını haftada birkaç kez, büyük patlamadan interferometreye kadar her şey hakkında sorduğum sorularla kesintiye uğrattım. Değerli bilgiler aldığım meslektaşlarım arasında Julio GeaBanacloche, Daniel Kennefick, Michael Lieber, William Oliver, Paul Thibado ve Reeta Vyas'ı sayabilirim. Üniversitem ve bölümüm bana, bu emekli profesöre mükemmel bir fildişi kule, fizik binasında bir ofis sağlayarak büyük bir iyilik yaptı. İngilizce Bölümü'nden James Bennett'le metin yazma ve gramer hakkında, Antropoloji Bölümü'nden Peter Ungar'la iyi bir yayıncı bulma konusunda ve Felsefe Bölümü'nden Barry Ward'la kuantum temelleri hakkında değerli konuşmalar yaptım.

Maximilian Schlosshauer'e tavsiyeleri ve bu proje sırasında raflarımdan ziyade masamda veya ellerimde duran şahane kitabı *Decoherence and Quantum-to-Classical Transition* için teşekkür ederim. Arkadaşım Rodney Brooks ve kitabı *Fields of Color* ilham kaynağım oldu. James Malley teşvik ve tavsiyeleriyle katkıda bulundu.

Verdikleri fikir, tavsiye ve ilhamlar için Stephen Adler, Nathan Argaman, Casey Blood, Jeffrey Bub, Shelley Buonaiuto, Howard Carmichael, Massimilliano de Bianchi, Dennis Dieks, Edward Gerjuoy, Nicolas Gisin, David Green, Daniel Greenberger, Nick Herbert, Paul Hewitt, David Jackson, Ruth Kastner, Gary Knack, Peter Lewis, Ruby Lord, Tim Maudlin, David Mermin, Peter Milonni, Michael Nauenberg, Roland Omnes, Philip Pearle, Mario Rabinowitz, A. R. P. Rau, Stefan Rinner, Greg Rohm, Marlan Scully, Marc Sher, Anwar Shiekh, Sjaak van Dijk, Steven van Enk, Frank Wilczek, Dieter Zeh ve Wojciech Zurek'e teşekkür ederim.

Profesyonel örgütler ve onların yönetici ve çalışanları bilim için gereklidir. Amerikan Fizik Öğretmenleri Derneği, toplantıları, yayınları, bilgileri ve sosyal etkileşimler için sağladıkları fırsatlarla bana sürekli destek oldu. Bu dernek içinde fizikle ve sosyal eğitimle bağlantılı olarak aktif olan birçok kişiye özellikle teşekkür ediyorum; özellikle Gordon Aubrecht, Al Bartlett (merhum), Harvey Leff, John Roeder ve Steven Shropshire'a. Amerikan Fizik Derneği, APS Fizik ve Toplum Forumu ve Amerikan Bilimini İlerletme Derneği de sürekli örgüt desteği sağladılar.

Destek kadromun yardımı olmadan çalışmamı yapamazdım. Arkansas Üniversitesi'ndeki yardımcılarıma, özellikle Dianne Melahn ve onun fizik ofisi kadrosuna, Kathleen Lehman, Stephanie Freedle ve onların fizik kütüphanesi çalışanlarına, üniversitenin Enformasyon Teknoloji Servisleri Bölü-

mü'ne ve diğer üniversite çalışanlarına teşekkür ediyorum.

Oxford Üniversitesi Yayınevi kitabımı yayımlamayı kabul ettiğinde çok mutlu oldum. Editörüm Jeremy Lewis, yardımcı editör Erik Hane, editör asistanı Anna Langley, pazarlama müdürü Michelle Kelly, Newgen Yayınevi'nden üretim müdürü Prabhu Chinnasamy, redaktör Cat Ohala ve yardımlarıyla bu kitabın okunmasını sağlayan diğer insanlara teşekkürlerimi ve iyi dileklerimi sunarım.

Sevgili arkadaşım James Bennett proje sırasında desteğini eksik etmedi. Eşim Marie Riley ile çocuklarım Ziva Branstetter, David Hobson ve Justin Riley'e sonsuz sevgi ve takdirlerimi sunarım. Onların sevgi ve desteği olmasa bu kitabı yazamazdım. Eşime aynı zamanda bana bilgisayar uzmanlığını (üniversitenin Enformasyon Teknoloji Servisleri Bölümü'nün bir üyesidir) konuşturarak yardım ettiği için de teşekkür ederim. Ayrıca merhum anne ve babama da teşekkür ederim: Bana okuma ve yazma zevkini aşılayan Marjorie Breitweg Hobson'a ve bilim zevkini öğreten Leland Hobson'a.

ÇİZİMLER

1.1 Mach-Zehnder interferometresi
2.1 Su dalgası girişimi
2.2 Işıkla yapılan çift yarık deneyi
2.3 Işıkla yapılan çift yarık deneyinin sonucu
2.4 Işıkla yapılan çift yarık deneyi: deneysel düzenek ve sonuç
3.1 Galileo'nun eğimli bir yüzey üzerinde bir topla yaptığı deney
4.1 Elektromanyetik dalgalar oluşturmak
4.2 Elektromanyetik spektrum
5.1 Zayıf ışıkla ve hızlandırılmış fotoğrafçılıkla yapılan çift yarık deneyi
5.2 Parçacık benzeri tekil çarpmalardan bir fotoğrafın ortaya çıkması
5.3 Işıkla yapılan tek yarık deneyi
5.4 Çift yarık deneyinde elektron kullanımıyla bir girişim örüntüsü oluşturulması
5.5 Fizik tarihindeki birleştirmeler
6.1 Bir dalga tek yarıktan geçtiğinde oluşan kırınım
6.2 Bir yarıktan geçen ışığın kırınımı
6.3 Tek yarık kırınımından geçen bir elektronun beş "enstantanesi"

6.4 Bohm'un modelindeki 100 nokta parçacığın çift yarık yolları
7.1 Tek bir anda bir elektronun tipik bir kuantum halinin grafiği
7.2 İki sabit nokta arasında farklı titreşim hallerinde bulunan bir kiriş
7.3 Bir hidrojen atomundaki bir elektronun tasvirleri
7.4 Bir hidrojen atomundaki elektronun en düşük beş enerji seviyesi
8.1 Mach-Zehnder interferometresi
8.2 Kuantum süperpozisyonunun kanıtı
8.3 Bir süperiletken kuantum girişim cihazının şematik diyagramı
8.4 Makroskobik bir cismin kuantum süperpozisyonunun kanıtı
9.1 İki kuantum etkileştikten sonra ayrıldıklarında normalde dolanık kalırlar
9.2 Çift yarık deneyi olarak RTO foton dolanıklığı deneyi
9.3 Dolanık fotonlar için interferometrelerinin kullanıldığı RTO deneyi
9.4 İlintilerin girişimi
9.5 Detektör etkisi
11.1 Stern-Gerlach deneyinin bir varyasyonu
11.2 Haroche ve meslektaşlarının deneyi

Tablo

5.1 Standart temel alan ve kuantum modelinin özeti, temel alanlar teorisi

NOTLAR

Önsöz

1. Paul Dirac, *Quantum Mechanics*, 4. Baskı (Oxford: Oxford University Press, 1958), vii.
2. Freeman J. Dyson, "Fizikte Yenilik", *Scientific American* 199 (Eylül 1998), 74-82.
3. Alan Mackay, *A Dictionary of Scientific Quotations* (Londra: IOP Yayıncılık, 1991), 83.

1. Bölüm

1. Bununla beraber bir fotonu iki fotona dönüştürmek mümkündür. *Alt-dönüştürme* olarak bilinen bu zor süreç gerçekte orijinal fotonu bölmez, orijinal fotonun enerjisini kullanarak yeni bir foton çifti oluşturur. Üstelik oluşturulan çift "dolanıktır", yani birçok yönden tek bir cisim, bir "ışık atomu" olarak kalır.
2. Şaşırtıcı bir biçimde, kanıtlar her bir fotonun camda bir "süperpozisyon" olarak hem iletildiğini hem de yansıtıldığını gösteriyor (8. Bölüm). Foton taraflardan birinde tespit edilene dek süperpozisyon taraflardan birine "çökmez". Dolayısıyla ya Alice ya da Bob –ikisi birden değil– fotonu tespit eder, fakat foton iki yoldan da gider ve yalnızca tespit edildiğinde çöker.
3. 8. Bölüm'de detaylı olarak gördüğümüz gibi, bu paragraf biraz fazla basitleştirilmiştir. Cam plakaya çarpan tekil bir foton hemen yansı-

yacak mı yoksa iletilecek mi, buna "karar vermez". Bunun yerine *aynı anda iki yoldan da gider*. Makroskobik standartlarımıza göre tuhaf olan bu davranışa iki "halin" (yansıma ve iletim) *süperpozisyonu* denir. Fotonun hangi yolu seçeceğinin kararı, foton Alice veya Bob tarafından *tespit edilene* dek verilmez. Fotonun tespit edildiğinde "çöktüğü" yani "kuantum sıçraması yaptığı" söylenir.

4. Şekil göstermese de, ikinci yol birinci ışın demeti ayrıştırıcısına girdiğinde hafifçe aşağı doğru bükülür. Daha sonra ışın demeti ayrıştırıcısının diğer tarafından, geldiği yola tamamen paralel, fakat hafifçe aşağı doğru kaymış bir yol üzerinde ortaya çıkar.
5. Gelgelelim aslında tek bir fotonu göremezsiniz; ışığı algılamak için gözlerinize birbirine yakın birtakım fotonlar ulaşmalıdır.
6. İkinci ışın demeti ayrıştırıcısı mevcut olduğunda ve birinci veya ikinci yolun uzunlukları değiştirildiğinde, deneyin birçok tekrarında iki detektörde bir girişim örüntüsü belirir. Bu her bir fotonun kendisiyle kesişim yaptığını doğrular, çünkü bunun için *her iki* yoldan da bilgi toplamış olmalıdır. Dolayısıyla her bir foton birinci ışın demeti ayrıştırıcısında iki yoldan da gider. Üstelik bu davranış ikinci ışın demeti ayrıştırıcısının var olmasına veya olmamasına bağlı olamaz, çünkü foton ikinci ışın demeti ayrıştırıcısıyla ancak birinci ışın demeti ayrıştırıcısından geçtikten sonra etkileşir.
7. Bu kitapta ele alınan süperpozisyon türleri pozisyon-süperpozisyon ve sürat-süperpozisyondur. Başka süperpozisyon çeşitleri de vardır: Dönme, polarizasyon ve diğer kuantum özelliklerinin süperpozisyonları.
8. en.wikiquote.org/wiki/Werner_Heisenberg.Wikiquotes, "Werner Heisenberg", 20 Şubat 2016.
9. Beysbol topu gibi daha kütleli cisimlerin dalga boyları genellikle daha kısadır, dolayısıyla önemli ölçüde farklı konumların bir süperpozisyonu çok sayıda dalga boyunun aralığını içermelidir. Bu tarz mesafelerde "faz koheransını" (yani tek bir tutarlı kuantum halini) sürdürmek zor olur.
10. Bu "enerji hallerinin" yanında başka haller de mümkündür. Bu başka hallerin her biri enerji hallerinin özel bir "süperpozisyonudur" (veya birleşimidir).

11. Atomları içeren kutuyu epeyce ısıtmanız gerekir, çünkü hidrojen atomları kolayca birleşerek iki birleşik hidrojen atomundan oluşan ve hidrojen atomundan farklı bir spektruma sahip hidrojen molekülleri oluştururlar. Isıtma bu tarz bağların oluşmasını önler.
12. Bir neon reklamının cam tüpü sıcak değildir, çünkü içindeki gazın yoğunluğu o kadar düşüktür ki, cama çok ısı enerjisi transfer edemez. Gelgelelim gazın sıcaklığı oldukça yüksektir.
13. G. Gerald Gabrielse, "Standart Modelin En Büyük Zaferi", *Physics Today* 66, Aralık (2013), 64-65. Alıntılanan rakam aslında |g|/2-1'dir, g "g faktörünü" gösterir.
14. https://en.wikipedia.org/wiki/Archaeoastronomy_and_Stonehenge. Wikipedia "Archaeoastronomy ve Stonehenge", 27 Mayıs 2016.
15. Ian P. Bindloss, "Fiziğin Bilgi Çağına Katkıları", www.physics.ucla.edu/~ianb/history/, 13 Ocak 2012.
16. Max Tegmark ve John Wheeler, "100 Yıllık Kuantum Gizemleri," *Scientific American* 299, Şubat (2001), 68-75.
17. Maximilian Schlosshauer, Johannes Kofler ve Anton Zeilinger, "Kuantum Mekaniğine Yönelik Temel Yaklaşımların Bir Enstantanesi", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (2013), 222-230.
18. Art Hobson, "Parçacık Yoktur, Sadece Alanlar Vardır", *American Journal of Physics* 81 (2013), 211-223.
19. Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen, "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekanik Yorumu Tam Kabul Edilebilir mi?", *Physical Review* 47 (1935), 777-780.
20. Alain Aspect, "Bell'in Eşitsizlik Testi: Her Zamankinden Daha İdeal", *Nature* 398 (1999) 189-190.
21. Alıntı: Michael Shermer, "Kuantum Şarlatanlığı", *Scientific American* 292 (2005), 34.
22. Deepak Chopra, *Quantum Healing: Exploring the Frontiers of Mind/Body Medicine* (New York: Bantam, 1989).
23. Maximilian Schlosshauer, *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition* (Berlin: Springer Verlag, 2007), 364-365.
24. Bruce Rosenblum ve Fred Kuttner, *Quantum Enigma: Physics Encounters Consciousness* (New York: Oxford University Press, 2006).
25. Aynı eserde, 4, 120, 179, 186.

26. Victor Stenger, "Kuantum Şarlatanlığı", *Skeptical Inquirer* 21.1, Ocak-Şubat (1997), 37-42. Bu makalenin de daha önce listelenen Michael Shermer'in makalesiyle tesadüfen aynı başlığa sahip olması şaşırtıcıdır.

2. Bölüm

1. Albert Einstein'dan Michael Besso'ya, Max Born'dan alıntılandı, *The Born-Einstein Letters* 1916-1955, çeviri Irene Born (New York: Macmillan, 1971).
2. Robert L. Weber, *Pioneers of Science: Nobel Prize Winners in Physics* (Bristol: Adam Hilger, 1980), 64-66. Einstein'ın kuantum fiziğine yönelik eleştirisinin en iyi örneği "EPR" çalışmasıdır: Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen, "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekanik Tanımı Tam Kabul Edilebilir mi?", *Physical Review* 47 (1935), 777-780. Bu zekice hazırlanmış fakat nihayetinde yanlış olan çalışma Heisenberg ilkesine karşı çıktı. Bu yerbilmezliğin kuantum fiziğinin bir öngörüsü olduğunu kanıtlayan ilk çalışmadır.
3. Bununla birlikte bir kuantum (ister inanın ister inanmayın) hem var olma hem de var olmama süperpozisyonunda olabilir, bu durumda kuantum alanı "vakum hali" ile "tek kuantum halinin" süperpozisyonundadır. Şuna dikkat edin: Bu durumda bile kuantum her "var olma" hem de "var olmama" süperpozisyonundadır. Kuantumun sadece bir kısmına (üç kuark gibi) sahip olamazsınız.
4. Deneyler bu ani geçişlerin uzay bölgeleri boyunca ışık hızını aşan hızlarda meydana geldiğini ve anlık geçişle tutarlı olduğunu belirlemiştir, fakat deneylerin bu tarz geçişlerin aslında sıfır zamanda meydana geldiklerini tespit etmeleri olanaksızdır, çünkü çok kısa zaman aralıklarının ölçülmeleri zordur.
5. Kuantum fizikçileri, özellikle teorik temelleriyle ilgilenenler genellikle *kuantum* veya *kuantum halleri* yerine *dalga fonksiyonlarından* söz ederler. Dalga fonksiyonu, foton veya elektron gibi fiziksel bir kuantumun özel bir durumunun yani "halinin" matematiksel tanımıdır. Fiziksel olarak elektron onun dalga fonksiyonudur ve foton, atomlar vs. için de benzer şekildedir. Bu kitap *dalga fonksiyonu* terimini kullanmaz. Bakınız: Art Hobson "Parçacık Yoktur, Yalnızca Alanlar Vardır", *American Journal of Physics* 81 (2013), 211-223.

6. Higgs bozonunun araştırılması ve keşfi üzerine iyi bir kitap için bakınız: Sean Carroll, *The Particle at the End of the Universe* (New York: Dutton, 2012).
7. Nötrinolar nükleer reaktörlerde, dünyanın jeolojik radyoaktivitesiyle, atmosfere kozmik ışınların çarpmasıyla, bütün yıldızların merkezinde işlev gören enerji süreçleriyle, yıldız patlamalarıyla ve büyük patlamayla oluşur. Maddeyle çok zayıf etkileştikleri için vücudunuzdan geçen zilyonlarca nötrinodan birinin bile vücudunuzla fiilen etkileşmesi birkaç yıl alır. Neredeyse ışık hızında seyahat ederler.
8. Işık suda veya diğer maddelerde daha yavaş hareket eder, fakat bunun nedeni maddenin atomlarının her bir fotonu ara sıra soğurması (yok etmesi) ve daha sonra yeniden yayması (oluşturması), böylece bir fotonun ortalama seyahat hızının ışık hızından daha az olmasıdır. Ne zaman fiilen var olsa, her foton ışık hızında hareket eder.
9. Karanlık maddenin kuantumlarının laboratuvarda doğrudan gözlemlenmesi şeklinde daha dolaysız kanıtlar her an bulunabilir, belki de siz bu sözleri okuyana kadar bulunmuş olabilir.
10. Karanlık maddeye dair birtakım iyi tartışmaları ve karanlık enerji üzerine görüşleri Carroll'ın *The Particle at the End of the Universe* adlı eserinde bulabilirsiniz.
11. Daha doğrusu galaktik kümeler birbirlerinden uzaklaşıyor. Bu kümeleri ve her küme içindeki her galaksiyi kütleçekimi bir arada tutar.
12. İki süpernova gözlem ekibinden birinin liderinin anlattığı hikâyenin tamamı için bakınız: Robert P. Kirshner'in *The Extravagant Universe* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 2002). Kısa bir anlatım için bakınız: Art Hobson, "Ve 2011 Nobel Fizik Ödülünü Alan: Hızlanan Evren", *The Physics Teacher* 12 (Kasım 2012), 468-469.
13. Alfred Wegener'in jeolojik plaka tektoniği teorisi iyi bir örnektir. Kısa bir anlatım için bakınız: "Depremler, Tektonik ve Teorik", Kenneth Chang, *New York Times*, p.WK4, 15 Ocak 2011.
14. Bilim sürecine ve sahte bilimin tehlikelerine dair iki iyi kitap şunlardır: Carl Sagan, *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark* (New York: Random House, 1995) (*Karanlık Bir Dünyada Bilimin Mum Işığı*, Say Yayınları, 2021); Michael Shermer, *Why People Believe Weird Things: Pseudoscience, Superstition, and Other Confusions of Our Time* (New York: W. H. Freeman, 1997).

15. Bu nedene *atalet yasası* veya *Newton'un birinci yasası* denir.
16. Karanlık enerji kuantum vakumu alanıyla ilişkili olabilir (5. Bölüm). Karanlık enerji ve kuantum vakumunu Carroll, *The Particle at the End of the Universe* adlı eserinde irdeler.
17. Kozmik mikrodalga arka plan ve kozmolojinin "standart modelinin" kısa bir özeti için bakınız: Adrian Cho, "Evrenin Yüksek Çözünürlüklü Bebek Resmi Standart Teoriyi Doğrular", *Science* 339 (2013), 1513.
18. Darren Wong ve Boo Hong Kwen, "Işığın Tarihi İncelemesiyle Bilimin Doğasına Işık Tutmak", http://www.researchgate.net/publication/251619647, 23 Mayıs 2015.
19. Isaac Newton, *Optics, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (Dover Yayınları, 1952 [ilk olarak 1704'te yayımlandı]).
20. İyi bir ders kitabı bu öneriyi izler: Ralph Baierlein, *Newton to Einstein: The Trail of Light* (Cambridge: Cambridge University Press, 2000).
21. New York Devlet Üniversitesi, Stony Brook felsefe departmanından ve Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda tarihçi Robert Crease 2002'de fizikçilerden tüm zamanların en iyi deneyini belirlemelerini istedi. Kazanan, 1801'de Thomas Young'ın ışık girişimini içeren deneyi yerine, tekli elektronların girişimine uygulanan çift yarık deneyiydi (5. Bölüm). Young'ın ışıkla yaptığı çift yarık deneyi Crease'in anketinde beşinci sıradaydı. Bakınız: George Johnson, "İşte Burada, Bilimdeki En İyi 10 Deney", *New York Times*, 24 Eylül 2002.
22. Işık Şekil 2.2'deki iki yarıktan geçmeden önce hepsi tek bir renk (bir dalga boyu) olacak şekilde filtrelenmeli ve ilk olarak tek bir dar yarıktan çıkmalı ve daha sonra yayılarak (kırınım yaparak) hem yarık 1'den hem de 2'den geçmeli. Daha sonra yarık 1'deki titreşimler yarık 2'dekilerle senkronize hale gelir. Bu sayede Young'ın deneyi (Şekil 2.2) Şekil2.1'deki su dalgası deneyine tam benzer (fakat üç boyutta) olur ki, bu deneyde iki yarıktan çıkan su dalgaları senkronizedir ve frekansları aynıdır.
23. Her ne kadar güneşin yakınında bırakılan bir taş güneşe doğru düşse de, dünyanın yerçekimi (kütleçekimi) alanı güneşin yakını gibi başka noktalarda da mevcuttur. Hem güneşin alanı hem de dünyanın alanı güneşin yakınında mevcuttur ama güneşin alanı daha güçlüdür.

24. Önde gelen birçok fizikçi bu sonucu ifade etmişlerdir. Güvenilir üç örnek şunlardır: "Doğanın temel öğeleri alanlardır; parçacıklar türetilmiş fenomenlerdir." Steven Weinberg, *Facing Up: Science and Its Cultural Adversaries* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001), 221. "Tutarlı bir görelilik teorisi elde etmenin tek yolu doğanın bütün parçacıklarını, foton gibi alan kuantumları olarak ele almaktır. ... Bu yaklaşım doğanın tümünün *kuantum alan teorisi* olarak bilinen birleşik bir tasvirini sağlar." Robert Mills, *Space, Time, and Quanta: An Introduction to Modern Physics* (New York: W. H. Freeman, 1994), 386. "Kuantum alan teorisinde gerçekliğin ana öğeleri tekil parçacıklar değil, parçacıkların temelini oluşturan alanlardır. Dolayısıyla örneğin bütün elektronlar, temellerindeki bir alanın, bütün uzay ve zamanı kaplayan elektron alanının uyarımlarıdır..." Frank Wilczek, "Kütlesiz Kütle I: Maddenin Çoğu", *Physics Today* 52, Kasım (1999), 11-13. Daha fazla alıntı ve kuantum fiziğindeki dalga parçacık karşıtlığı meselelerinin tam bir irdelemesi şu eserde bulunabilir: Art Hobson, "Parçacık Yoktur, Sadece Alanlar Vardır", *American Journal of Physics* 81, (2013), 211-223.
25. Daha fazla atom ve molekül irdelemesi için bakınız: Art Hobson, *Physics: Concepts and Connections*, 5. Baskı (San Francisco: Pearson Education, 2010), 35, 38.
26. "Abderalı Demokritos'tan Bilim Alıntıları", Günümüzde Bilim Tarihi (Todayinsci 1999-2016). http://todayinsci.com/D/Democritus/Democritus-Quotations.htm.
27. Sicim teorisi ile fizikte birleştirme önerisi üzerine teknik olmayan, mükemmel bir kitap için bakınız: Brian Greene, *The Elegant Universe* (New York, W. W. Norton, 1999) (*Evrenin Zarafeti*, TÜBİTAK Yay., 2013).
28. Bill Spargo, Kayıt Memuru, "2107. Toplantının tutanakları, Robert A. Nelson'un sözleri", Ekim 1999, Washington Felsefe Derneği, http://www.philsoc.org/1999Fall/2107minutes.html.
29. Suda asılı duran polen parçacıklarının şaşırtıcı hareketini 1827'de botanikçi Robert Brown keşfetti. Çok daha sonra, 1905'te, Albert Einstein bu "Brown hareketinin" tekil su moleküllerinin çarpmaları sonucu hareket eden polenlerden kaynaklandığını açıklayan bir çalışma yayımladı. Bu açıklama atom ve moleküllerin gerçekten var olduklarının önemli bir doğrulaması işlevini gördü.

30. Max Tegmark ve John Wheeler, "100 Yıllık Kuantum Gizemleri," *Scientific American* Şubat (2001), 68-75.
31. Ayrıca fizikçilerin genellikle genel yasalar çıkartırken yaptıkları gibi bazı basitleştirici varsayımlarda bulundu. Planck'ın kafasındaki "ideal radyatöre" muhtemelen şaşırtıcı bir biçimde *kara cisim* ve ışımaya da *kara cisim ışıması* denir.
32. En azından bir tane oldukça bariz bir görüş vardır. 1, 2, 3 vb. gibi "sayılabilir" bir sayı kümesi, "sıfır ve bir arasındaki bütün rakamlar gibi" bir rakam sürekliliğine kıyasla matematiksel olarak çok daha basittir. Süreklilik sonsuz sayıda rakam içerir ve sayılabilir değildir ve iki tam sayının oranı olarak ifade edilemeyen, "irrasyonel" sayıları içerir. Bu anlamda kuantize enerji seviyeleri daha basit, daha "birincil" ve daha "temeldir". Belki bunun enerjinin kuantize olma nedeniyle bir ilgisi vardır.
33. Bu, atom gibi birleşik kuantumlar (kuark ve elektron birleşimleri) için de geçerlidir. Her atomun öğeleri yerbilmez halde dolanıktır (9. Bölüm) ve dolayısıyla bir öğe değiştiğinde bütün öğeler değişir. Parçalardan oluşmasına rağmen dolanıklık onun tek bir cisim gibi davranmasına neden olur.

3. Bölüm

1. Galileo'nun düşünce biçiminin ikna edici görsel kanıtlarını sunan çok sayıda web sitesi vardır. Örneğin, bakınız: http://demonstrations.wolfram.com/GalileosThoughtExperimentOnInertia/. Enrique Zaleny, "Galileo'nun Atalet Üzerine Düşünce Deneyi", Wolfram Kanıtlar Projesi, 2016.
2. Matematikçilerin diyebileceği gibi, "uzun eğimli yüzeylerin limitinde". Galileo böyle ideal, sınırlayıcı durumları göz önüne alan ilk bilgindi. Herbert Butterfield, *The Origins of Modern Science* (New York: Simon & Schuster, 1965).
3. Aynı eserde, 15.
4. John B. S. Haldane, *Possible Worlds and Other Papers* (Londra: Transaction Yayımcıları, 2002; ilk olarak 1927'de Londra'daki Chatto & Windus tarafından yayımlandı).
5. Art Hobson, *Physics: Concepts & Connections*, 5. baskı (San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 2010).

6. Ari Ben-Benahem, *Historical Encylopedia of Natural and Mathematical Sciences*, cilt 1 (Berlin: Springer, 2009).
7. Isaac Newton. Isaac Newton, *Optics, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (Dover Yayınları, 1952, ilk olarak 1704'te yayımlandı).
8. Isaac Newton ve Gottfried Leibniz 17. yüzyılın ortalarında birbirlerinden bağımsız olarak yüksek matematiği icat ettiler.
9. Pierre-Simon Laplace, *A Philosophical Essay on Probabilities* (New York: John Wiley & Sons, 1902).
10. Brian Greene. *The Elegant Universe* (New York: W. W. Norton, 1999).
11. Bununla birlikte bazen nötron yıldızları çoğunlukla nötronlardan oluşan dev çekirdekler olarak tanımlanır. Bir nötron yıldızının yarıçapı normalde yaklaşık 12 km'dir, fakat onu güçlü nükleer kuvvet değil, kütleçekimi bir arada tutar; dolayısıyla "dev bir çekirdek" olarak sınıflandırılması şüphe götürür. En iyi şekilde yıldız olarak sınıflandırılır.
12. Bir zamanlar 83 protonu ve 126 nötronu olan bizmut-209 izotopunun kararlı olduğu düşünülürdü. Ancak 2003'te bu çekirdeğin, yarılanma ömrü 9×10^{26} saniye olan bir alfa bozunmasına uğradığı keşfedildi; ki bu evrenin yaşından milyar kat daha fazladır. Bakınız: Wikipedia'daki referanslar, "Bizmut-209", 30 Aralık 2015. http://en.wikipedia.org/wiki/Bismuth-209. Wiki'de ayrıca alfa ve beta bozunmalarıyla ilgili iyi makaleler vardır.
13. Bazı fizikçiler enerjinin "iş yapma becerisi" tanımını, bunu ısı enerjisine uygulamanın zorlukları nedeniyle reddederler. Bunun nedeni termodinamiğin ikinci yasasına göre sistemin ısı enerjisinin, sıcaklığı daha düşük olan ikinci bir sisteme akmasının sağlanarak yalnızca küçük bir kısmının işe çevrilebilmesidir. Gelgelelim ikinci sistemin sıcaklığı sıfıra yaklaştıkça bu küçük kısım %100'e yaklaşır ve dolayısıyla ilk sistemin ısı enerjisinin "hepsini" (yani istediğimiz kadar %100'e yakını) bu sınırlı ideal durumda işe çevirebiliriz. Böyle sınırlayıcı idealleştirmeler fizikte gelenektir; dolayısıyla bu itirazın, fiziğin en önemli kelimesinin bariz ve basit tanımını geçersiz kılmasına izin vermemiz için bir neden yoktur.
14. James Prescott Joule hakkında internette araştırma yapın. Onun deneyleri ısı enerjisinin (sıcaklık) aslında bir enerji formu olduğu ve

enerjinin korunumu tanımlarına dahil edilmesi gerektiği anlayışının temelini oluşturuyordu. Joule'un deneyleri şahane ve aydınlatıcıdır.

15. *Isı* çelişkili bir terimdir. Bunun yerine ısı enerjisi ya da *iç enerji* terimleri kullanılmalıdır. *Isı* kelimesinin uygun olan tek kullanımı "ısıtma" işlemiyle bağlantılı fiil halidir, bu ısı enerjisinin doğal akışı vasıtasıyla yüksek sıcaklıklardan düşük sıcaklıklara aktarımıdır. Bu kitap ısı enerjisi terimine bağlı kalır ve ısı kelimesinden kaçınır.
16. Bu ifade bu kitap için yeterlidir, fakat aşırı basitleştirilmiştir, çünkü faz geçişlerinde bulunan "gizli ısı enerjisini" göz ardı eder. Örneğin bir buz küpünü donma derecesiyle ısıttığınızda, buz 0 derecede kalırken ısı enerjisi buzu suya dönüştürür. Dolayısıyla bu ısı enerjisi suda "gizlidir" (yani bir sıcaklık artışı olarak ifade edilmez).
17. Aslına bakarsanız, evrenin başlangıcına ilişkin "enflasyon" teorisine göre, evrenin pozitif enerjisi tümüyle negatif olan kendi kütleçekimi enerjisini tam olarak dengeler, böylece evrenin toplam enerjisi daima sıfır olur! "Sıfır-enerjili evreni" Wiki'de araştırın ve oradaki referanslara dikkat edin. Dolayısıyla enerjinin büyük patlama sırasında yaratılması gerekmiyordu. Büyük patlama sadece negatif enerjiyi (kütleçekimi) enerjinin pozitif formlarından ayırdı. Buna farklı bir açıdan bakarsak, kütleçekimi (kütleçekimi sistemlerinin ani oluşumu) evrene enerji verdi (pozitif enerji sağladı).
18. John Rigden'in *Einstein 1905: The Standard of Greatness* adlı eseri (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2006) bize Einstein'ın "mucizevi" yılının öyküsünü anlatır. Bilimciler ve bilimci olmayanlar için Einstein'ın özel ve genel görelilik teorilerine dair teknik olmayan şahane bir kitap için bakınız: Ira Mark Egdall, *Einstein Relatively Simple: Our Universe Revealed in Everyday Language* (Londra: World Scientific, 2014).
19. Albert Einstein, "Ist die Tragheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" *Annalen der Physik* 18 (1905), 639-643. "Bir Cismin Ataleti Enerji İçeriğine mi Bağlıdır?" başlığı altında çevirisini araştırın.
20. Eğer çiftin kinetik enerjisi yeterince yüksekse, W^+-W^- çiftleri gibi daha yüksek kütleli yeni kuantumlar oluşturulabilir.
21. "Doğru koşul", fotonun, momentumunun bir kısmını absorbe eden bir atom çekirdeğinin yakınında olmasıdır.
22. Çünkü $2^{10} = 1.024$'tür.

23. Eğer bu ikinci yasaysa birinci yasa nerededir? Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumuna mantıksal olarak eşdeğerdir. Şunu söyler: Bir sistemin ısıtıldığı ve üzerinde iş yapıldığı (başka bir enerji girdi veya çıktısı olmadan) herhangi bir süreçte sistem üzerinde yapılan ısıtma ve sistem üzerinde yapılan iş sistemin toplam enerji artışına eşittir.
24. Büyük patlamanın enflasyon teorisinin mucidi teori hakkında teknik olmayan bir kitap yazmıştır: Alan Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1997).
25. Büyük patlama başladığı sıradaki başlangıçtaki hal tek bir kuantum hali idiyse, (yani *saf hal* adı verilen) bu takdirde entropisinin tam olarak sıfır olması gerekir.

4. Bölüm

1. Albert Einstein, "Maxwell'in, Fiziksel Gerçeklik Kavramının Gelişimi Üzerine Etkisi", *James Clerk Maxwell: A Commemorative Volume 1831-1931* (New York: Macmillan, 1931), 66-73.
2. Frank Wilczek, "Derin basitlik", *The New York Academy of Sciences Magazine*, 9 Ekim 2008, http://www.nyas.org/publications/Detail.aspx?cid=1577681c-007f-4b23-bcad-7d6d32 ccca5b.
3. A. Andrew Janiak, *Newton: Philosophical Writings* (Cambridge: Cambridge University Press, 2004), 102.
4. Newton'un *Principia*'da belirttiği açıklaması şu şekildedir: "Henüz kütleçekiminin bu özelliklerinin nedenini fenomenlerden keşfedemedim ve ben hipotezler uydurmam." Frank Wilczek, *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces* (New York: Basic Books, 2008).
5. Özellikle bu, Max Born'un dalga fonksiyonu psi'ye yönelik, (belirli bir x uzay noktasında değerlendirilen) "bir parçacığın x'de bulunma" olasılık büyüklüğünü gösterdiği şeklindeki etkili tanımını açıklardı. Göreceğiniz gibi, parçacık yoktur. Born kuralının doğru açıklaması x'de değerlendirilen psi'nin, bir etkileşimin x'de meydana gelme olasılık genişliğini temsil ettiğidir.
6. Çerçeve kelimesini, felsefecilerin *ontoloji* kelimesini "temelini oluşturan gerçeklik" anlamında kullandıkları şekilde kullanıyorum.

7. Alan kavramının iyi bir sunumu için bakınız: Rodney A. Brooks, *Fields of Color: The Theory That Escaped Einstein*, 2. Baskı (Prescott, AZ: Allegra Baskı ve Görüntüleme, 2011). Brooks'un kitabı, bu kitabın, parçacığın olmadığı, yalnızca alanların mevcut olduğu görüşüne merak uyandıran bir savunma niteliğindedir.
8. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, 1. Cilt (New York: Dover Yayınları, 1965), W. D. Niven tarafından yayına hazırlandı, 360.
9. Ancak Faraday'ın aksine, Maxwell bu alanların "mutlak uzayın" değil, evreni kaplayan mekanik bir madde olan "eterin" bir özelliği olduğuna inanıyordu. Daha sonra Einstein'ın çalışmaları fizikçilerin eter görüşünden vazgeçmelerini ve Faraday gibi, alanları tek başına uzayın özellikleri olarak görmelerini sağladı.
10. "Yüklü cisimlerin hareketine", elektronların ve diğer yüklü cisimlerin kendi eksenleri etrafında dönmelerini de dahil ediyorum. Ana metinde "kendi ekseni etrafında dönmeyi" ele almasam da, bu kuantumların çoğunun kalıcı bir kuantum özelliğidir, bu birçok yönden, topaç ve dönen dünyamız gibi, bu tarz makroskobik cisimlerin kendi eksenleri etrafındaki dönme hareketine benzerdir.
11. Işığın hızı kuşkusuz günümüzde daha hassas bir doğrulukta biliniyor. Bununla birlikte ölçme sistemimizin mantığı değişmiştir. Bilim insanları, metre gibi (önceki tanımı belirli bir atom türünden çıkan ışığın belirli sayıdaki dalga boylarının uzunluğuydu) temel bir mesafe birimi tanımlamak yerine, artık metreyi ışığın vakumda 1/299.792.458 saniyede kat ettiği mesafe olarak *tanımlıyorlar*. Bu tanım ışığın vakumdaki hızını kesin bir sayı olan, saniyede 299.792.458 metreye sabitler ve metreyi gelecekte daha hassas bir doğrulukta tanımlanacak miktar olarak bırakır. Bakınız: referanslar için https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light.
12. James Clerk Maxwell, "EM Alanın Dinamik Bir Teorisi", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 15 (1865), 459-512.
13. Faraday ve daha sonra da Einstein eter diye bir şey olmadığı ve EM alanın "mutlak uzayın" (yani tek başına uzayın) bir özelliği olduğu görüşünü savundular. Gelgelelim Maxwell EM dalgaların henüz gözlemlenmemiş, maddi bir vasıta olan eterin içindeki mekanik dalgalar olduğu inancını sürdürdü. Faraday/Einstein'ın alanların maddi bir vasıtaya, etere gerek duymadığı görüşü günümüzde fi-

zikçilerin mutabık kaldıkları bir görüştür.

14. 1973'te zayıf kuvvet ile EM kuvveti tek bir "elektrozayıf" teorisinde birleştirildi. *Kuantum alan teorisi* adı verilen bu teori kuantum alanlarını doğanın temel bileşenleri olarak tesis etti. Fizikçiler Steven Weinberg, Abdus Salam ve Sheldon Glashow bu çalışmalarıyla 1979 Nobel Ödülü'nü kazandılar. Kuantum alanları 5. Bölüm'de çok daha kapsamlı olarak ele alınıyor.
15. Hertz'in ölçülen frekans ve dalga boyu değerlerinden dalganın hızını bulabiliriz. Örneğin frekansı 3 hertz (saniyede 3 dalga yayılır) ve dalga boyu 2 metre olan bir dalgamız varsa, o takdirde dalga saniyede 2×3 m yani 6 m hareket etmelidir. Benzer şekilde, dalga boyu 0,6 m ve frekansı 5×10^8 Hz olan bir dalga saniyede $(0,6) \times (5 \times 10^8)$ hızla yani 3×10^8 m hareket etmelidir.
16. Hertz bu terimleri 1889'da, Heidelberg'de bulunan Alman Doğa Bilimleri ve Tıp Geliştirme Kurumu'nda fizik üzerine verdiği "Işık ve Elektrik Arasındaki İlişkiler Üzerine" başlıklı, aydınlatıcı, yaratıcı dersinde kullandı. İngilizce çevirisi *American Journal of Physics* 25 (1957), 335-343'te yayımlandı.
17. IR ve UV de sırasıyla ışıyan sıcaklık ve güneş yanıkları olarak insanlar tarafından doğrudan tespit edilebilir (radyo alıcısı gibi bir teknoloji olmadan).
18. Birkaç örnek verecek olursak, kütleçekimi alanları, karanlık madde alanları, karanlık enerji alanları, Higgs alanları ve bazı bilinen normal madde alanı çeşitleri vardır.
19. Gelgelelim etrafınızda neredeyse hiç x ışını veya gama ışını yoktur, çünkü dünyanın atmosferi dış uzayda bulunan bu yüksek enerjili ışımanın çoğundan bizi korur.
20. R. H. Stuewer, edisyon, *Historical and Philosophical Perspectives of Science* (New York: Gordon and Breach, 1989), 299.
21. James Boswell, *The Life of Samuel Johnson* (New York: Penguin Classics,1986).
22. Bakınız: Çağdaş Fizik Eğitim Projesi, "Temel Parçacık ve Etkileşimlerin Standart Modeli" (2000), http://www.pha.jhu.edu/~dfehling/particle.gif.
23. Buna *kuantum kromodinamiği* denir.
24. Bakınız: Frank Wilczek'in harika kitabının 9. ve 10. bölümleri, *The Li-*

ghtness of Being Mass, Ether, and the Unification of Forces (Philadelphia: Basic Books, 2008). Ayrıca bakınız: Frank Wilczek, "Kütlesiz Kütle", *Physics Today* 53, (1999), 11-13.

25. Başka zorluklar da söz konusuydu. Daha yoğun ışığın elektron yayılımına yol açması, daha az yoğun ışığın ise elektron yayılımına yol açmaması bekleniyordu, çünkü daha yoğun ışıkta daha çok enerji vardır. Ancak ortaya çıktı ki, belirli bir frekansta elektronlar yoğunluktan bağımsız olarak yayılıyor ya da yayılmıyordu. Bunun yerine ışığın frekansı belirleyici faktördü: Yeterince yüksek frekanslarda sönük ışık bile elektron yayılımına yol açıyordu. Daha düşük frekanslarda ışık çok yoğun olmasına rağmen elektron yayılmıyordu. Fizikçiler frekansın neden kontrol faktörü olduğunu anlayamadılar.
26. John Rigden, *Einstein 1905: The Standard Greatness* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2006).
27. Robert Weber, *Pioneers of Science: Nobel Prize Winners in Physics* (Adam Hilger, Bristol, 1988). Bohr'un çalışması sayfa 67-69 arasında. Bu kitap bütün Nobel Ödülü kazananların ödül kazanan çalışmalarının kısa ve güvenilir öykülerini anlatıyor.
28. Aynı eserde, 91-92.
29. Aynı eserde, 109-111.
30. Faraday ve Maxwell'in çalışmalarının tarihî belgelendirmesi, Nancy Nersessian'ın *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories* adlı harika eserinde bulunabilir (Boston: Martinus Nijhoff, 1984). Bu bölümün bazı kısımları Nersessian'ın kitabına dayanır.

5. Bölüm

1. Gelgelelim bir kuantumun yok olmasına neden olurken iki veya daha fazla kuantum oluşturabilirsiniz, fakat bu yeni kuantumlar orijinal kuantumun parçaları değildir.
2. İnternette "parçacık veya alan" üzerine araştırma yaparsanız farklı görüşler bulursunuz. Şu var ki, tüm-parçacık görüşünün son gerçek savunucusu Richard Feynman'dı ve onun bile çift yarık deneyini parçacık yönünden açıklamaya çalışırken çileden çıktığını kabul ettiğini göreceğiz. Son yıllarda neredeyse bütün kuantum alanı uzmanları (örneğin Steven Weinberg, Frank Wilczek, Michael Redhead ve Robert Mills) evrenin tümüyle alanlardan oluştuğu görüşünde-

ler. Bu görüşü destekleyen bazı özenli argümanlar için bakınız çalışmam: "Parçacık Yoktur, Yalnızca Alanlar Vardır." Nitelikli bir inceleme için bakınız: Rodney Brooks, *Fields of Color* (Prescott, AZ: Rodney Brooks, 2011). Günümüzde tüm-alanlar görüşünün yegâne ana istisnaları mikroskobik bir fiziksel gerçeklik olmadığını –ne parçacık ne de alan– ileri sürenlerdir. Böyle nihilist bir görüşün ana desteği kuantum fiziğinin esasa ait çelişkilerle dolu gibi göründüğü kanısıdır. Bu kitapta bu tarz çelişkiler olmadığını kanıtlamayı umuyorum.

3. Bununla beraber Planck o kadar erken bir dönemde formülünün tam önemini fark etmedi ve aynı zamanda fotonlar hakkında da bilgisi yoktu.
4. Resimler Harvard Üniversitesi Bilim Merkezi'nden Wolfgang Rueckner'in izniyle kullanılmıştır. Bakınız: W. Rueckner ve P. Titcomb, "Tek Bir Fotonun Girişiminin İspatı", *American Journal of Physics* 64 (1996), 184-188.
5. Resimdeki tekil ışık noktaları küçüktür, fakat tekil atomlardan çok daha büyüktürler. Her bir çarpma noktası metalik gümüşün yaklaşık bir milyar atomdan oluşan, tek bir fotoğrafik "greninin" pozlamasını gösterir.
6. 1927'de Louis de Broglie'nin ileri sürdüğü bir fikri ayrıntılı olarak inceleyen David Bohm 1952'de kuantum fiziğinin bir yorumunu önerdi. Bu yoruma göre her şey ufak Newton parçacıklarından ibarettir; bu parçacıklar iki yarıktan da çıkan ve dolayısıyla ister tek ister çift yarık olsun, uygun örüntüye göre parçacıkları yönlendirebilen bir "pilot dalgayla" yönlendirilir. Gelgelelim, kuantum fiziği uzun süre önce özel göreliliği içerecek şekilde genişletilmesine rağmen, bu teorinin destekçileri özel göreliliğin etkilerini içerecek şekilde teoriyi genelleştirememişlerdir. Bu ve diğer yorumlar 10. Bölüm'de ele alınıyor.
7. Paul Dirac, *Quantum Mechanics*, 4. Baskı (Oxford: Oxford University Press, 1958).
8. Açıklama: Yarıklar arasındaki mesafenin artmasıyla birlikte, yarık 1'den ekrandaki herhangi bir noktaya kadar olan yol ile yarık 2'den aynı sabit noktaya olan yol arasındaki fark artar; dolayısıyla ekranın merkezi ile bu sabit nokta arasındaki parlak çizgilerin sayısı daha çok olmalı, böylece parlak çizgiler daha yakın sıkışmalıdır.

9. Frank Wilczek, "Eterin Sürekliliği", *Physics Today* 52 (1999), 11-13.
10. Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (Cambridge, MA: MIT Press, 1965). Feynman aynı derste şunu da söyler: "Sanırım kuantum mekaniğini kimsenin anlamadığını rahatlıkla söyleyebilirim." (s. 129)
11. Daniel Clery, "Karanlık Laboratuvar", *Science* 347 (2015), 1089-1093.
12. Richard Feynman, Robert Leighton ve Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, 3. Cilt (okuma, MA: Addison-Wesley, 1965), 1-1. "Tek" üzerindeki vurgu Feynman'a aittir. Ancak günümüzdeki fizikçiler bu deneyin *tek* kuantum gizemini içerdiği konusunda aynı fikirde olmayabilirler.
13. Elektronlar belirli bir hıza (belirli bir enerji) sahip olacak şekilde seçilmelidir.
14. Claus Jonsson, "Elektroneninterferenzen an Mehreren Künstlich Hergestellten Feinspalten", *Zeitschrift für Physik* 161 (1961), 454-474. Çevrilmiş versiyonu: "Birden Fazla Yarıktaki Elektron Kırınımı", *American Journal of Physics* 42 (1974), 4-11.
15. Akira Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki ve H. Exawa, "Bir Girişim Örüntüsünün Tekil- Elektron Oluşumunun Kanıtı", *American Journal of Physics* (1989), 117-120. On yıllar önce tahmin edilmiş olan bu deneyin sonucu Davisson ve Germer deneyinin sonucuyla benzerdir. Tonomura deneyi sadece iyi bilinen sonuçları ve tahminleri doğrulamasına rağmen pedagojik açıdan son derece aydınlatıcıdır. Açıkçası bu bir çift yarık deneyi değildir, çünkü madde alanını iki akıma ayırmak için iki yarık yerine elektrostatik kuvvetlere dayanan bir "elektron ikili prizması" kullanılır. Elektron ikili prizması yerine yarıkları kullanan ve tekil elektron çarpmalarından girişim örüntüsünün oluşmasını kanıtlayan doğru bir çift yarık deneyi ancak 2013'te yapıldı. Bakınız: Roger Bach, Damian Pope, Sy-Huang Liou, Herman Batelaan, "Kontrollü Çift Yarık Elektron Kırınımı", *New Journal of Physics* 15 (Mart 2013), 033018.
16. Elektronların dalga doğasını ileri sürme payesi Louis de Broglie'ye aittir. Bu fikri 1923'te tasarımlayan De Broglie 1924 ve 1925'te yayımlanan çalışmalarında belirli niceliksel sonuçlarını ayrıntılı olarak inceledi. Davisson ile Germer'in ve George P. Thomson'un 1927'de yaptıkları deneyler de Broglie'nin öngörülerini doğruladı. De Broglie bu önerisiyle 1929 Nobel Ödülü'nü aldı.

17. Örneğin altı temel "kuark" alanı ve altı temel "lepton" alanı vardır. Proton ve nötronlar kuarklardan oluşur, elektronlar ise altı çeşit leptondan biridir. Bu kitapta odaklandığımız düşük enerjili (göreli olmayan) durumlarda bunlar Schrödinger'in denklemiyle tanımlanır.
18. Robert Crease, "Fizikteki En İyi Deney", *Physics World* 15 (2002), 15-17.
19. Louis de Broglie, *Recherches sur la Theorie des Quanta*, doktora tezi, Paris Üniversitesi, 1924. İngilizce çevirisi Jim Baggott'un, *The Quantum Story*'sinde yer alır. [(Oxford: Oxford University Press, 2011), 38].
20. Steven Weinberg, *Facing Up* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2001), 221.
21. Ayrıca bakınız: Brooks, *Fields of Color* ve P. R. Wallace, *Paradox Lost* (New York: Springer-Verlag, 1996), 16-18.
22. Jean-Louis Basdevant, *Lectures on Quantum Mechanics* (New York: Springer, 2007). "Dalga fonksiyonu için Yunanca Ψ harfini kullanan Schrödinger'den sonra bu bir gelenek halini almıştır." (s. 34)
23. Paul Dirac, "Işımanın Yayılımının ve Absorbe Edilmesinin Kuantum Teorisi", *Proceedings of the Royal Society of London* A114 (1927), 243-265.
24. Chen-Ning Yang, "Maxwell'in Denklemlerinin ve Ayar Teorisinin Kavramsal Kökenleri", *Physics Today* 67 (2014), 45-51.
25. Bu kitapta dönüyü ele almayacağız. İyi bir başlangıç için bakınız: Leon Lederman ve Christopher Hill, *Quantum Physics for Poets* (Amherst, NY: Prometheus Books, 2011).
26. Özel göreliliğin, fiziğin, "zaman tersinirliği altında simetrik" olmasını gerektirmesinin nedeni şudur: Eğer belirli bir mikroskobik süreç mümkünse ve bir filmin bu süreçten oluştuğunu ve daha sonra geri sardığını hayal edersek, bu geri saran filmdeki görünen olaylar normal (geri saranda değil) evrenimizde de mümkün olmalıdır. Richard Feynman şunu gösterdi: Bir elektronun zamanda geriye doğru hareket ettiğini hayal edersek, fiziksel etkileri tıpkı elektrona benzeyen başka bir kuantumun etkileriyle tam olarak aynı olur; bu kuantumun tek farkı sadece pozitif bir yük taşıması ve zamanda *ileri doğru* hareket etmesidir. Bu durumda özel görelilik bu "ters" kuantumun gerçekte var olmasını gerektirir. Buna *pozitron* deriz.

27. ALPHA İşbirliği, "1.000 Saniyeliğine Anti Hidrojenin Hapsolması", *Nature Physics* 7 (2011), 558-564.
28. Bu bölüm Art Hobson, "Temel Parçacık Fiziğini Öğretmek: Kısım 1 ve 2", *The Physics Teacher* 49 (2011), 12-15, 136-138'i esas alır.
29. Standart modeli açıklayan, teknik olmayan en iyi kitaplardan bazıları alfabetik sırayla yazarına göre şunlardır: Baggott, *The Quantum Story*; Sean Carroll, *The Particle at the End of the Universe* (Londra: Penguin Books, 2012); Leon Lederman, Dick Teresi'yle birlikte, *The God Particle* (New York: Houghton Mifflin, 1993); Leon Lederman ve Christopher Hill, *Beyond the God Particle* (Amherst, NY: Prometheus Books, 2013); Don Lincoln, *The Quantum Frontier* (Baltimore: John Hopkins University Press, 2009); Robert Oerter, *The Theory of Everything* (New York: Pi Press, 2006); Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon Books, 1992); Frank Wilczek, *The Lightness of Being* (New York: Basic Books, 2008). Standart modele nitelikli bir kısa başlangıç için bakınız: Kavramsal fizik ders kitabım, Art Hobson, *Physics: Concepts & Connections*, 5. Baskı (San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 2010), 17. bölüm.
30. Daha ileri tartışma için bakınız: Carroll, *The Particles at the End of the Universe*. Ayrıca bakınız: Wilczek, *The Lightness of Being* 95-96 ve Frank Wilczek, "Kütlesiz Kütle II", *Physics Today* 53 (2000), 13-14.
31. İlginç bir biçimde, her bir çiftteki iki elektronun yerbilmez biçimde dolanık oldukları ortaya çıkar (9. Bölüm). L. G. Herrmann, F. Portier, P. Roche, A. Levy Yeyati, T. Kontos ve C. Strunk, "Varil-Çifti Işın Demeti Ayrıştırıcıları Olarak Karbon Nano Tüpler", *Physical Review Letters* 104 (2010), 026801-1-026801-4. Ayrıca bakınız: John Cartwright, "Ayırmayı Yapanlar Dolanık Elektronlardır", physicsworld.com, 14 Ekim 2009, physicsworld.com/cws/article/news/2009/oct/14/entangled-electrons-do-the-splits.
32. Elektron alanına *fermiyon alanı*, eşleşmiş elektron alanına *bozon alanı* denir. Bozon alanının özellikleri fermiyon alanının özelliklerinden çok farklıdır. Her bir fermiyonun farklı bir kuantum halinde bulunması gerektiği halde, birçok bozon aynı kuantum halinde bulunabilir, dolayısıyla eşleşmiş elektronlar aynı taban haline "yoğunlaşabilir". Bu yoğunlaşma süperiletkenlikten sorumludur.
33. 2013 Nobel Ödülü, temel kuantumların içsel kütlelerinin kökenini keşfeden Francois Englert ve Peter Higgs'e verildi. Robert Brout

2011'de ölmeseydi ödülü o da paylaşacaktı, fakat bu ödül ölümden sonra verilmiyor.

34. Lawrence Krauss ve James Dent, "Karanlık Enerjinin Kaynağı Olarak Higgs Tahterevalli Mekanizması", *Physical Review Letters* 111 (2013), 061802.
35. Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and the Texture of Reality* (New York: Alfred A. Knopf, 2004) (*Evrenin Dokusu*, TÜBİTAK Yay., 2010).
36. Brian Greene, *The Elegant Universe; Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (New York: W. W. Norton, 1999).
37. T. S. Eliot, *Little Gidding*, 1942, http://en.wikiquote.org/wiki/Four_Quartets.
38. Gerhard Hegerfeldt, "Parçacık Yerelleştirmesi ve Einstein Nedensellik İlkesi Kavramı", *Extensions of Quantum Theory*, 3. Baskı. A. Horzela ve E. Kapuscik (Montreal: Apeiron, 2001), 9-16; Gerhard Hegerfeldt, "Kuantum Teorisinde Anlık Yayılma ve Einstein Nedensellik İlkesi", *Annals of Physics* 7 (1998), 716-725; Gerhard Hegerfeldt, "Nedensellik İlkesi ve Parçacık Yerelleştirmesi Üzerine Yorumlar", *Physical Review D* 10 (1974), 3320-3321. Benzer bir sonuç şu eserde de kanıtlanmıştır: David Malament, "Dogmanın Savunması: Neden Yerelleştirilebilir Parçacıkların Göreli Bir Kuantum Mekaniği Olamaz", *Perspectives on Quantum Reality*, edisyon R. K. Clifton (Hollanda: Springer Netherlands, 1996), 1-10.
39. Bu tarz sorulara dair iyi bir kitap için bakınız: Greene, *The Fabric of the Universe*.
40. Astrid Lambrecht, "Casimir Etkisi: Hiçlikten Çıkan Kuvvet", *Physics World*, Eylül (2002), 29-32; Peter Milonni, *The Quantum Vacuum: An Introduction to Quantum Electrodynamics* (Boston: Academic Press, 1994), 54-59. %1 doğruluk paralel levha geometrisiyle değil, birbirlerinden metrenin yirmi milyarda biri uzaklığa yerleştirilmiş iki iletken silindirle elde edildi. Paralel plaka geometrisi test edilmiştir fakat deney daha zordur, çünkü plakaları tam olarak paralel tutmak zordur; dolayısıyla teori ile deney arasında uyuşma daha azdır. Burada paralel plaka geometrisi kullanılmıştır, çünkü açıklaması daha kolaydır.

41. Bu tarz ayrıştırma yani "basit dalgalara ayırma" için resmî terim *Fourier analizidir*.
42. William Unruh, "Kara Delik Buharlaşması Üzerine Notlar", *Physical Review D* 14 (1976), 870-892; Paul Davies, "Schwarzschild ve Rindler Metriğinde Sayısal Üretim", *Journal of Physics A* 8 (1975), 609-616; John Bell ve J. Leinaas, "İvmelendirilmiş Termometre Olarak Elektronlar", *Nuclear Physics B* 212 (1983), 131-150.
43. Genel görelilik teorisine göre ivme ve kütleçekiminin etkileri özdeştir. Dolayısıyla bir kara deliğin hemen dışındaki kütleçekimi alanının fark edilebilir bir Unruh etkisi yaratabilmesi için muazzam derecede büyük olması gerekir. Unruh'tan bağımsız olarak çalışan Stephen Hawking 1974'te bu etkinin herhangi bir kara deliğin olay ufkunun (içindeki cisimleri geri dönülmez biçimde kara deliğe düşmeleri gereken yarıçap) hemen dışında meydana geleceği ve hipotezini kurduğu ünlü "Hawking ışımasının" kara deliklerden çıkmasına neden olacağı öngörüsünde bulundu. Hawking ışıması henüz gözlemlenmese de, var olduğu yaygın biçimde tahmin ediliyor.
44. Bu bölümde şu çalışma esas alınmıştır: Art Hobson, "Parçacık Yoktur, Yalnızca Alanlar Vardır", *American Journal of Physics* 81 (2013), 211-223.

6. Bölüm

1. Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (New York: Modern Kütüphane, 1965), 6. Bölüm.
2. Wikipedia, *Solvay Conference*, 28 Ekim 2015. http://en.wikipedia.org/wiki/Solvay_Conferencecite_note-2.
3. S. Pironio, A. Acin, S. Massar, A. Boyer de la Giroday, D. N. Matsukevich, P. Maunz, S. Olmschenk, D. Hayes, L. Luo, T. A. Manning ve C. Monroe, "Bell'in Teoremiyle Doğrulanan Rastgele Sayılar", *Nature* 464 (2010), 1021-1046; Christian S. Calude, Michael J. Dinneen, Monica Dumitrescu ve Karl Svozil, "Kuantum Rastgeleliğinin Hesaplanamamasının Deneysel Kanıtı", *Physical Review A* 82 (2010), 022102.
4. Maximilian Schlosshauer, redaksiyon. *Elegance and Enigma: The Quantum Interviews* (Berlin: Springer-Verlag, 2011). Bakınız: 5. soru.
5. Henry Stapp, *Mind, Matter and Quantum Mechanics*, 3. Baskı (Berlin: Springer-Verlag, 2009), 171.

6. Matthew Pusey, Jonathan Barrett ve Terry Rudolph, "Kuantum Halinin Gerçekliği Üzerine", *Nature Physics* 8 (2012), 475-478.
7. Bir çekirdeğin "yüzeyi", içinde baskın nükleer bağlama kuvvetinin hâkim olduğu ve dışında da baskın kuvvetin hızla sıfıra düştüğü yüzeydir.
8. Resim ve irdeleme, Giancarlo Ghirardi, *Sneaking a Look at God's Cards: Unravelling the Mysteries of Quantum Mechanics* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1997), Bölüm 3.7, "Belirsizlik İlkesi".
9. Deneyde elektron çarpmalarının örüntü genişliği 12 mm; bitişik girişim saçakları arasındaki mesafe 1,4 mm'dir. Her bir elektronun genişliği 12 mm'dir.
10. Δx uzun bir deneme dizisinde elde edilen çok sayıda x değeri arasındaki "yayılmanın" bir ölçümüdür. x'in "standart sapmasıdır"; uzun bir deneme dizisinde x^2'nin ortalama değeri ile x'in ortalama değerinin karesi arasındaki farkın karekökü dür.
11. Ölçüm belirsizlikleri ile kuantumun minimal boyutu arasındaki ayrıma şu çalışmada dikkat çekilir ve analiz edilir: Lee A. Rozema, Ardavan Darabi, Dylan H. Mahler, Alex Hayat, Yasaman Soudagar ve Aephraim M. Steinberg, "Heisenberg'in Ölçüm-Bozunum İlişkisinin Zayıf Ölçümlerle İhlali", *Physical Review Letters* 109 (2012), 100404.
12. Çok büyük elektron hallerine sahip atomlara *Rydberg atomları* denir. Bir Rydberg elektronunun şekli gezegen yörüngelerini hatırlatan, ince bir simide (halka) benzer. Bununla birlikte elektron simidin tümünün etrafına yayılır.
13. 5. Bölüm'de tartışıldığı gibi, fiziksel bir anlamı olan en küçük mesafe muhtemelen yaklaşık 10^{-35} m olan Planck mesafesidir ki, bu durumda bu mutlak minimum Δx olurdu.
14. Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen, "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekanik Tanımı Tam Kabul Edilebilir mi?", *Physical Review* 47 (1935), 777-780.
15. Einstein'dan Max Born'a Mektup, 3 Mart 1947; Max Born (ed.), *The Born-Einstein Letters: Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955* (New York: Walker, 1971).
16. Bu ifadenin Richard Feynman'a mı yoksa David Mermin'e mi atfedilmesi gerektiği belli değildir. Bakınız: N. David Mermin, "Feynman Bunu Söylemiş Olabilir mi?", *Physics Today* 57 (Mayıs 2004), 10-11.

17. Fizikçiler bu şemanın istatiksel yönlerini klasik istatiksel mekanikle kavramsal olarak özdeş olarak kabul edeceklerdir. Aradaki fark ise Bohm'un teorisinin klasik mekaniğin hareket denklemleri yerine kuantum fiziğinin hareket denklemlerini kullanmasıdır.
18. Sheldon Goldstein, "Bohm Mekaniği", *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 4 Mart 2013. http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm/.
19. Jeffrey Bub, *Interpreting the Quantum World* (Cambridge: Cambridge University Press, 1997), 244-245.
20. Sheldon Goldstein, "Bohm Mekaniği".
21. Hrvoje Nikolic, "Eğer Bohm, Born'dan Önce Doğmuş Olsaydı Bohr Doğar mıydı?" *American Journal of Physics* 76 (2008), 143-146.
22. Bu bölüm şu çalışmayı esas alır: Art Hobson, "Kuantum Belirsizliğini Öğretmek", *The Physics Teacher* 49 (2011), 434-437 ve Art Hobson, *Physics: Concepts & Connections* (San Francisco: Pearson/Addison-Wesley, 5. Baskı 2010), 12 ve 13. bölümler.

7. Bölüm

1. Burada karanlık çizgilerin tamamen karanlık olduğu, ideal bir çift yarık deneyini varsayıyorum.
2. Bu "matematiksel cisim", *Hilbert uzayı* adı verilen, soyut, karmaşık, çok boyutlu vektör uzayında bir vektördür.
3. Ψ sadece pozitif veya negatif değil, aynı zamanda "karmaşık" (yani bir "sanal sayı" bileşenine sahip) da olabilir. Bunda gizemli veya farazi bir şey yoktur; bu sadece karmaşık Hilbert uzayının matematiğinin bir parçasıdır. Bu karmaşık bileşenin matematiksel olarak bir kuantum dalgasının "fazını" dikkate alması gerekir. Eğer Ψ karmaşıksa, o takdirde Ψ^2'nin yerine $|\Psi|^2$ pozitif reel sayısı geçmelidir. Fizikçi olmayanlarla iletişim kurabilmek için karmaşık fazı bu kitaptan çıkarmam gerekir; bunun yerine kuantumun diğer daha az matematiksel şekillerdeki dalga doğasını dikkate alıyorum.
4. Nedeni şudur: İki durumda da dalga hızının sicim boyunca aynı olması dalga boyunun ve frekansının çarpımının aynı olduğuna işaret eder (bu bir standart fizik sonucudur). Ancak diyagramdan ikinci halin dalga boyunun birinci halin dalga boyunun yarısı olduğunu görebiliriz. Dolayısıyla ikinci halin frekansı birinci halin frekansının iki katı yani 10 Hz olmalıdır. Benzer şekilde, üçüncü halin frekansı

birinci halin frekansının (kimi zaman *temel frekans* da denir) üç katıdır ve dördüncü halin frekansı da birinci halin dört katıdır.

5. Elektrik alanı (voltaj) açılmadan önce atomlar çift hale gelerek hidrojen moleküllerini oluşturur. Alan açıldığında moleküller hızla tekil atomlara ayrılır.
6. Asla bir atomun veya başka bir sistemin enerjisinin mutlak değerini ölçmeyiz. Daima *göreli* enerji değerlerini –iki enerji değeri arasındaki farkı– ölçeriz. Dolayısıyla yalnızca *E2-E1* gibi enerji *farkları* fiziksel açıdan anlamlıdır.
7. James Bergquist, Randall Hulet, Wayne Itano ve David Wineland, "Tek Bir Atomdaki Kuantum Sıçramaları Gözlemi", *Physical Review Letters* 57, (1986), 1699-1702; Warren Nagourney, Jon Sandberg ve Hans Dehmelt, "Ertelenmiş Optik Elektron Büyütücüsü: Kuantum Sıçramalarının Gözlemi", *Physical Review Letters* 56, (1986) 2797-2799; Th. Sauter, W. Neuhauser, R. Blatt ve P. E. Toschek, "Kuantum Sıçramaları Gözlemi", *Physical Review Letters* 57, (1986), 1696-1698; yorum, James Gleick "Fizikçiler Nihayet Kendi Gözleriyle Kuantum Sıçramalarını Görüyorlar", *New York Times*, Bilim bölümü, 21 Ekim 1986.
8. Ernest Rutherford, *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson* (New York: Interscience Publishers, 1962), 305.
9. Alıntı: N. David Mermin, "Kimse Bakmadığında Ay Orada mı? Gerçeklik ve Kuantum Teorisi", *Physics Today* 38, (1985), 38-47; Mermin'in referansı Abraham Pais'tir, "Einstein ve Kuantum Teorisi", *Reviews of Modern Physics* 51, (1979), 863-914.
10. Bazı bilim insanları bu görüşü destekliediler. Eugene Wigner yıllarca bu görüşü savunduktan sonra vazgeçti (10. Bölüm). John Wheeler gözlemcinin merkezî rolünü savunur; bakınız: *The Ghost in the Atom*, ed. P. C. Davies ve J. R. Brown (Cambridge: Cambridge University Press, 1986), 4. Bölüm, "John Wheeler", 58-69; bu kitap kuantum fizikçileriyle yapılan röportajları içerir.
11. Alıntı: Maximilian Schlosshauer, *Elegance and Enigma: The Quantum Interviews* (Berlin: Springer-Verlag, Berlin, 2011). Hepsi de kuantum temelleriyle yakından ilgili olan on yedi fizikçi ve düşünür belli başlı konular hakkındaki zekice sorulara yanıt verirler. Jeffrey Bub'ın alıntılanan ifadesi 94. sayfada yer alır.

12. Aynı eserde, 4. Bölüm. Bazı uzmanlar epistemik görüşü destekler. Yine 4. Bölüm'de alıntılanan diğerleri de realist görüşü destekler. Ayrıca bakınız: Christopher A. Fuchs ve Asher Peres'in epistemik görüşü, "Kuantum Fiziğinin 'Yoruma' İhtiyacı Yoktur", *Physics Today* 53 (Mart 2000), 70-71 ve bazı okuyuculardan yanıtlar: *Physics Today* 53 (Eylül 2000), 11-14.
13. N. David Mermin, "Bu Alışkanlığın Nesi Kötü" *Physics Today* 53 (Mayıs 2009), 8-9. Bu makale *Physics Today* 53 (Eylül 2009), 10-15'te çok yorum aldı.
14. Matthew Pusey, Jonathan Barrett ve Terry Rudolph, "Kuantum Halinin Gerçekliği Üzerine", *Nature Physics* 8 (2012), 475-478.
15. Alıntı: Aage Petersen, "Niels Bohr'un felsefesi", *Bulletin of the Atomic Scientists* 19 (1963), 8-14.
16. Carl Sagan, "Bölüm 12", *Cosmos: A Personal Voyage*, PBS, 14 Aralık 1980.
17. Bununla birlikte elektron görüntüleme ekranına ulaşıncaya kadar etkileşmediğine dair dile getirilmemiş bir varsayım vardır. Örneğin yarığı içeren bölmeye çarpmaz, fakat Şekil 6.3c'deki yarıktan geçer.

8. Bölüm

1. Birbirleri içinden geçtiklerinde birbirlerini *bozan, doğrusal olmayan dalga* adı verilen bazı dalga türleri vardır. Ancak kuantum fiziği doğrusal dalgalara dayanır.
2. Bununla birlikte, titreşen metal yaylar gibi salınımlı sistemler istisnadır; klasik Newton fiziğine göre bile bu sistemler süperpozisyon ilkesine uyarlar, yani aynı anda iki veya daha fazla titreşim halinde olabilirler.
3. Bu sonucun ardındaki fizik şudur: Metinde tanımlandığı gibi foton her iki yola da girer ve detektörlerde kendisiyle kesişim yapar. İki yolun her biri boyunca, 180 derecelik "faz değişimleri" her bir yansımada meydana gelir, bunun *istisnası* ikinci ışın demeti ayrıştırıcısındaki yol 1 boyunca olan yansımadır; bu özel yansıma "dahilidir", (hiçbir faz değişimi üretmez) çünkü diyagramdan görebileceğiniz gibi, ikinci ışın demeti ayrıştırıcısının yansıtıcı yüzü cam plakanın *sağ* tarafındadır (birinci ışın demeti ayrıştırıcısında plakanın *sol* tarafındadır). Şimdi faz değişimlerini toplarsanız, her bir yolun birinci

detektöre ilerledikçe 180 derecelik iki faz değişimine maruz kaldığını, dolayısıyla "fazın içine" vardıklarını ve yapıcı olarak kesişim yaptıklarını göreceksiniz. Öte yandan yollar ikinci detektöre ilerledikçe birinci yol 180 derecelik iki faz değişimine maruz kalırken, ikinci yol 180 derecelik sadece bir faz değişimine maruz kalır; dolayısıyla ikisi "fazın dışına" varır ve yıkıcı olarak kesişim yaparlar.

4. Einstein bu açıklamayı 1927'de Brüksel'deki Beşinci Solvay Konferansı'nda yaptı. Bakınız: Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (New York: Wiley, 1974), 114-118.
5. Örneğin bakınız: H. M. Weiseman ve J. M. Gambetta, "Dinamik Kuantum Sıçramaları Detektöre mi Bağlıdır?", *Physical Review Letters* 108 (2012), 220402.
6. Görmüş olduğumuz gibi, Einstein, Bohr'un görüşlerinin önde gelen bir muhalifiydi. Elektron gibi maddi kuantumların dalga özelliklerine sahip oldukları hipotezinin mucidi Louis de Broglie, Erwin Schrödinger'le birlikte Kopenhag görüşüne katılmıyordu. Yine de Bohr'un kuantum fiziği görüşü fizik camiasına 1927'den en az 1960'a kadar egemen oldu.
7. Don Howard, "'Kopenhag Yorumunu' Kim İcat Etti? Mitolojide Bir İnceleme", *Philosophy of Science* 71 (2004), 655-668.
8. Bohr'un kuantum fiziği görüşünün teknik olmayan tarihî bir öyküsü için bakınız: Henry J. Folse, *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity* (Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1985).
9. Lazerlerin teknik olmayan iyi bir irdelemesi için bakınız: Paul Hewitt'in *Conceptual Physics*, 12. Baskı (San Francisco: Pearson Education, 2015), 30. Bölüm.
10. J. C. Gallop, *SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics* (New York: Taylor ve Francis Group, 1991), 1. Bölüm.
11. T. D. Clark, "Makroskobik Kuantum Cisimler", *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm*, ed. B. J. Hiley ve F. David Peat (Londra: Routledge & Kegan Paul, 1987), 121-150.
12. Bozon ile fermiyon arasındaki tanımlayıcı fark, bozonların dönüşleri tam sayı olan (0, 1, 2, 3, ...) kuantumlar, fermiyonların ise dönüşleri yarı tam sayı olan (1/2, 3/2, 5/3, ...) kuantumlar olmalarıdır. Bu tanım bu kitap için önemli değildir ve herhangi bir "dönü" irdele-

mesinden kaçınmak istiyorum. Bakınız: Bu kavramlar için herhangi bir kuantum fiziği ders kitabı.

13. Eric Huss, "2012 Nobel Fizik Ödülü", Basın Bildirisi, 9 Ekim 2012.
14. Christopher Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King ve David Wineland, "Bir Atomun Bir 'Schrödinger Kedisi' Süperpozisyonu Hali", *Science* 272 (1996), 1131-1136.
15. Jonathan Friedman, Vijay Patel, W. Chen, S. K. Tolpygo ve J. E. Lukens, "Farklı Makroskobik Hallerin Kuantum Süperpozisyonu", *Nature* 406 (2000), 43-46; Casper van der Wal, A. C. J. Ter Haar, F. K. Wilhelm, R. N. Schouten, C. J. P. M. Harmans, T. P. Orlando, Seth Lloyd ve J. E. Moolj, "Makroskobik Kalıcı-Akım Hallerinin Kuantum Süperpozisyonu", *Science* 290 (2000), 773-777.
16. Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Vos-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw ve Anton Zeilinger, "C_{60} Moleküllerinin Dalga-Parçacık İkiliği", *Nature* 401 (1999), 680-682; Bjorn Brezger, Lucia Hackernuller, Stefan Uttenhaler, Julia Petschinka, Markus Arndt ve Anton Zeilinger, "Büyük Moleküller İçin Madde-Dalga İnterferometresi", *Physical Review Letters* 88 (2002), 100404. Bu deneyin iyi bir açıklaması şu eserde bulunabilir: M. Schlosshauer, *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition* (Berlin: Springer-Verlag, 2007) 6. Bölüm.
17. Bu, deneydeki moleküllerin 100 metredeki saniyedeki hızlarının dalga boyudur. Kuantum etkilerinin daha belirgin olduğu daha düşük hızlarda dalga boyu uzar.
18. 1997'de, John Clauser girişimi gözlemlemek için Talbot-Düşük etkisinden faydalanmayı önerdi. Bu gelişme ve diğer girişim teknikleri hakkında daha fazla bilgi için, bakınız: Markus Arndt, "De Broglie'nin Metre Çubuğu: Madde Dalgalarıyla Ölçümler Yapmak", *Physics Today* 67 (2014), 30-36.
19. Zeilinger'in deneyi çift yarığın yerine bir "kırınım ağı" kullanır. Kırınım ağı çift yarığa benzer; tek farkı sadece iki yerine birçok paralel yarık içermesi ve daha farklı bir girişim örüntüsü üretmesidir. Talbot-Lau interferometresinde her bir kuantum sadece her bir bitişik yarık çiftinden çıkar (kişisel iletişim, bakınız: Markus Arndt, Viyana Üniversitesi ekibi, 3 Temmuz 2014); bu yönden bu bir çift-yarık deneyine çok benzer şekilde işlev görür.

20. Stefan Gerlich, Sandra Eibenberger, Mathias Tomandi, Stefan Nimmrichter, Klaus Hornberger, Paul Fagan, Jens Tuxen, Marcel Mayor ve Markus Arndt, "Büyük Organik Moleküllerin Kuantum Girişimi", *Nature Communications* 2.263 (2011). Doi: 10.1038/ncomms1263.
21. A. D. O'Connell, M. Hofheinz, M. Ansmann, Radoslaw Bialczak, M. Lenander, Erik Lucero, M. Neeley, D. Sank, H. Wang, M. Weides, J. Wenner, John Martinis ve A. N. Cleland, "Kuantum Taban Hali ve Bir Mekanik Rezonatörün Tekil-Fonon Kontrolü", *Nature* 464 (2010), 697-703. Not: Bilimci olmayan okurlara sunumu daha anlaşılır kılmak için yayımlanan makaledeki notasyonun tersi bir notasyon kullanıyorum.
22. Tramplen ince bir alüminyum nitrit şerididir, iki ince metalik alüminyum şeridi arasında bulunur. Bu şeritler bir elektrik devresinin zıt uçlarına bağlıdır. Alüminyum nitrit güçlü bir "piezoelektrik" maddedir, yani üzerine verilen bir elektrik voltajına tepki olarak genişler veya daralır. Dolayısıyla iki alüminyum şerit boyunca verilen bir salınımlı voltaj alüminyum nitrit şeridin "soluma" modunda titreşerek sırayla genişleyip daralmasına neden olur.

9. Bölüm

1. Albert Einstein'ın 3 Mart 1947'de Max Born'a yazdığı bir mektup. Max Born, *The Born Einstein Letters* (Londra: Macmillan Press, 1971), sayfa 158.
2. Einstein bu noktaya 1927'de, Brüksel'deki Beşinci Solvay Fizik Konferansı'ndaki konuşmasında değindi. İyi bir anlatı için bakınız: Jim Baggott, *The Quantum Story: A History in 40 Moments* (Oxford: Oxford University Press, 2011), 118-122.
3. Werner Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory* (Chicago: University of Chicago Press, 1930), 39. [1949'da Dover Publications tarafından yeniden basıldı.]
4. Aynı eserde.
5. Daha teknik bir dilde ifade edecek olursak, ortaya çıkan iki kuantum fazlarını paylaşır, fakat büyüklüklerini paylaşmaz. Dolayısıyla bir kuantumun fazında meydana gelen bir değişim diğer kuantumun fazında anlık bir değişime neden olur.
6. Anton Zeilinger, "Işınlama", *APS News*, s. 6, Şubat 2013; R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Schmitt-Manderbach, H. Weier, T. Scheidl, M.

Lindenthal, B. Blauensteiner, T. Jennewein, J. Perdigues, P. Trojek, B. Omer, M. Furst, M. Meyenburg, R. Rarity, Z. Sodnik, C. Barbieri, H. Weinfurter ve Anton Zeilinger, "Dolanıklığın ve Tekli Fotonların 144 Kilometre Mesafede Boşlukta Dağılımı", *Nature Physics* 3 (2007), 481-486.

7. Jean-Michel Raimond ve Michel Brune, Serge Haroche, "Bir Boşluktaki Atom ve Fotonlarla Kuantum Dolanıklığını Manipüle Etmek", *Reviews of Modern Physics* 73 (2001), 565-582.
8. Chris Monroe, "Deney Aralarında 1 Metre Mesafe Olan Atomlar Arasındaki Dolanıklığı Kanıtlıyor", *Physics Today* 60 (2007), 16-18.
9. Ka Chung Lee ve diğerleri, "Oda Sıcaklığında Makroskobik Elmasları Dolanık Hale Getirmek", *Science* 334 (2011), 1253-1256; yorum ve özet, 1180, 1213-1214.
10. Brian Julsgaard, Alexander Kozhekin ve Eugene Polzik, "İki Makroskobik Cismin Uzun Ömürlü Deneysel Dolanıklığı", *Nature* 413 (2001), 400-403; Benjamin Stein, "Makroskobik Cisimlerin Dolanıklığı", *Physics Today* 54 (2001), 9.
11. John Raritry ve Paul Tapster, "Faz ve Momentuma Dayalı Bell Eşitsizliğinin Deneyle İhlali", *Physical Review Letters* 64 (1990), 2495-2498; Zhe-Yu Ou, Xingquan Zou, Wei Lang ve Leonard Mandel, "Ayrı Foton Kanallarındaki Yerbilmez Girişimin Gözlemi", *Physical Review Letters* 65 (1990), 321-324. Art Hobson, *Physics: Concepts & Connections*'taki (San Francisco: Pearson, 2010) tartışmalara bakınız; Art Hobson, "Kuantum Yerbilmezliğini Öğretmek", *The Physics Teacher* 50 (2012), 270-273.
12. Kuantum belirsizlikleri nedeniyle biraz eş zamansızlık olacak.
13. Daha doğrusu, her bir foton kendi yol uzunluğu farkı ile diğer fotonun yol uzunluğu farkı arasındaki ilişkiye dair bilgi taşır ki, bu x ve y arasındaki ilişkiyi bilmeye karşılık gelir.
14. RTO deneyinin özellikle açık bir kuantum analizi için bakınız: Michael Horne, Abner Shimony ve Anton Zeilinger, "İki Parçacıklı İnterferometreye Giriş", *Sixty-Two Years of Uncertainty*, ed. A. I. Miller (New York: Plenum Press, 1990), 113-119.
15. Bell'in yerellik koşulunun tam bir açıklaması ve teknik irdeleme için bakınız: Nicolas Brunner, Daniel Cavalcanti, Stefano Pironio, Valerio Scrani ve Stephanie Wehner, "Bell Yerbilmezliği", *Reviews of Modern*

Physics 86 (2014), 419-478, özellikle 1. Bölüm. Ayrıca bakınız: Wikipedia, "Bell Teoremi", 13 Haziran 2016. http://en.wikipedia.org/wiki/Bell's_theorem. Bell teoreminin ilginç bir açıklaması ve türevi için bakınız: Nick Herbert, *Quantum Reality* (New York: Anchor Press, 1985), 12. Bölüm. John Bell'in yerbilmezlik üzerine çalışmasını irdelemesi: *The Ghost in the Atom*, ed. P. C. W. Davies ve J. R. Brown (Cambridge: Cambridge University Press, 1986), 3. Bölüm, "John Bell", 45-57.

16. Bazı fizikçiler Bell'in sonucunun sadece yerellik ilkesini değil, aynı zamanda "realizmi" de varsaydığını ileri sürer. Gelgelelim Bell'in sonucunu ortaya koyduğu makalesi böyle ilave bir varsayımda bulunmaz: John Bell, "Einstein-Podolsky-Rosen Paradoksu Üzerine", *Physics* 1 (1964), 195-200; tekrar basım, John Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993), 14-21.
17. Bell'in analizinin önemine dair daha fazla tartışma için bakınız: Nicolas Brunner, "Kuantum Mekaniği: Yerbilmezliğe Doğru Çevrilmiş", *Nature Physics* 6 (2010), 842-843; Alain Aspect, "Bell'in Eşitsizlik Testi: Her Zamankinden Daha İdeal", *Nature* 398 (1999), 189-190; Herbert, *Quantum Reality* 12. Bölüm.
18. Stuart Freedman ve John Clauser, "Yerel Gizli-Değişken Teorilerin Deneysel Testi", *Physical Review Letters* 28 (1972), 938-941. Freedman ve Clauser'in deneyinin RTO deneyinden farkı, foton konumları ve hareket yönleri yerine foton polarizasyonlarını dolanık hale getirmesi ve tespit etmesidir. Bu ve ilgili çalışmalarıyla Clauser 2010'daki Wolf Fizik Ödülü'nü Alain Aspect ve Anton Zeilinger'le birlikte paylaştı.
19. Clauser'in motivasyonu ve deneyine yönelik tepkisi için bakınız: Herbert, *Quantum Reality*, 12. Bölüm.
20. Alain Aspect, Jean Dalibard ve Gerard Roger, "Bell Eşitsizliğinin Zaman Değiştirici Analizcileri İçeren Deneysel Testi", *Physical Review Letters* 49 (1982), 1804-1807. Aspect bu çalışmayı fizikçi Paul Davies'le birlikte *The Ghost in the Atom*, 40-44'te ele alır.
21. Bu eski fikrin kesin ifadesi görünüşe göre ilk olarak Carl Sagan tarafından (yazar ve sunucu), Public Broadcasting Şirketi'nin televizyon dizisi "Kozmos" için formüle edildi: 12. Bölüm, yayın 14 Aralık 1980.

Bakınız: Wikipedia, "Marcello Truzzi", 21 Mart 2016. https://en.wikipedia.org/wiki/Marcello_Truzzi.22#Extraordinary_claims.22

22. Gregor Weihs, Thomas Jennewein, Christoph Simon, Harald Weinfurter ve Anton Zeilinger, "Katı Einstein Yerellik Koşulları Altında Bell Eşitsizliğinin İhlali", *Physical Review Letters* 81 (1998), 5039-5043.
23. Marissa Giustina, Alexandra Mech, Sven Ramelow, Bernhard Wittmann, Johannes Kofler, Jorn Beyer, Adriana Lita, Brice Calkins, Thomas Gerrits, Sae Woo Nam, Rupert Ursin ve Anton Zeilinger, "Doğru Örnekleme Varsayımı Olmadan Dolanık Fotonları Kullanan Bell İhlali", *Nature* 497, 227 (2013); B. G. Christensen, K. T. McCusker, J. B. Altepeter, B. Calkins, T. Gerrits, A. E. Lita, A. Miller, L. K. Shalm, Y. Zhang, S. W. Nam, N. Brunner, C. C. W. Lim, N. Gisin ve P. G. Kwiat, "Kuantum Yerbilmezliğinin Tespit Boşluğu Olmadan Testi", *Physical Review Letters* 111, 130406 (2013).
24. R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Schmitt-Manderbach, H. Weier, T. Scheidl, M. Lindenthal, B. Blauensteiner, T. Jennewein, J. Perdigues, P. Trojek, B. Omer, M. Furst, M. Meyenburg, R. Rarity, Z. Sodnik, C. Barbieri, H. Weinfurter ve Anton Zeilinger, "Dolanıklığın ve Tekli Fotonların 144 Kilometrelik Mesafede Boş Uzayda Dağılımı", *Nature Physics* 3 (2007), 481-486.
25. B. Hensen ve diğerleri, "Aralarında 1,3 Kilometre Olan Elektron Dönülerini Kullanan Boşluksuz Bell Eşitsizliği İhlali", *Nature* 526 (29 Ekim 2015), 682-686; Marissa Giustina ve diğerleri, "Bell Teoreminin Dolanık Fotonlarla Anlamlı-Boşluksuz Testi", *Physical Review Letters* 115 (16 Aralık 2015), 250401-1-250401-7; Lynden K. Shalm ve diğerleri, "Yerel Realizmin Güçlü Boşluksuz Testi", *Physical Review Letters* 115 (16 Aralık 2015).
26. Alain Aspect, "Bakış Açısı: Einstein ve Bohr'un Kuantum Tartışmasına Kapıyı Kapatmak", *APS Physics* 8 (16 Aralık 2015), 123.
27. Erwin Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Qauntenmechanik" (Kuantum Mekaniğinde Günümüzdeki Durum), *Naturwissenschaften* 23 (1935), 807-812, 823-828, 844-849. Çeviri, John D. Trimmer, https://www.tuhh.de/rzt/rzt/it/QM/cat.html□note1.
28. Sandu Popescu ve Daniel Rohrlich, "Genelleyici Kuantum Yerbilmezliği", *Physics Letters* A 166 (1992), 293-297; Nicolas Gisin, "Bell Eşitsizliği Tüm Ürün Dışı Haller İçin Geçerlidir", *Physical Letters A*

154 (1991), 201-202. Dolanıklığın teknik koşulu N-cisim kuantum halinin, N tekil-kuantum hallerinin basit bir ürünü olarak *yazılamamasıdır*. Gisin'in makalesinin başlığı önemli bir hata içerir: "Geçerli"nin yerine "ihlal olur" kullanılmalıdır.

29. Howard Wiseman ve Jay Gambetta, "Dinamik Kuantum Sıçramaları Detektöre mi Bağlıdır?", *Physical Review Letters* 108 (2012), 220402.
30. Ka Chung, M. R. Spraque, B. J. Sussman, J. Nunn, N. K. Langford, X. M. Jin, T. Champion, P. Michelberger, K. F. Reim, D. England, D. Jaksch, I. A. Walmsley, "Oda Sıcaklığında Makroskobik Elmasları Dolanık Hale Getirmek", *Science* 334 (2011), 1253-1256.
31. Sze Tan, David Walls ve Matthew Collett, "Tek Bir Fotonun Yerbilmezliği", *Physical Review Letters* 66 (1991), 252-255.
32. Egilberto Lombardi, Fabio Sciarrino, Sandu Popescu ve Francesco De Martini, "Bir Vakumun Işınlanması: Bir Foton Kübiti", *Physical Review Letters* 88 (2002), 070402.
33. Bjorn Hessmo, Pavel Usachev, Hoshang Heydari ve Gunnar Bjork, "Tekil Foton Yerbilmezliğinin Deneysel Kanıtı", *Physical Review Letters* 92 (2004), 180401-1-180401-4.
34. Tekil-kuantum yerbilmezliği hakkında daha fazla detay için bakınız: Art Hobson, "Parçacık Yoktur, Yalnızca Alanlar Vardır", *American Journal of Physics* 81 (2013), 211-223.
35. Jordi Tura, A. B. Sainz, T. Vertesi, M. Lewenstein ve A. Acin, "Çoklu-Cisim Kuantum Hallerinde Yerbilmezliğin Tespiti", *Science* 344 (2014), 1256-1258.
36. Atomların elektronik hallerinde bu dolanıklığın ana nedenlerinden biri herhangi iki elektronun değiştokuşu sürecinde halin anti simetrik olmasının gerekmesidir. Bu da belirli bir atom içindeki her bir elektronun farklı bir kuantum halinde ve farklı bir kuantum sayısı setine sahip olması gerektiğini bildiren Pauli yoksun bırakma ilkesine işaret eder. Bu ilke kimyasal elementlerin periyodik tablosunda görülen düzenlerin çoğunu açıklar.
37. Guillaume Aubrun, Stanislaw Szarek ve Deping Ye, "Rastgele Haller İçin Faz Geçişleri ve Kısmi Devrik İçin bir Yarım Daire Yasası", *Physical Review A*85 (2002), 030302-1-030302-4. Bu çalışmanın iyi bir irdelemesi için bakınız: Case Western Reserve University, "Einstein'ın "Tekinsiz Eylemi" Büyük Kuantum Sistemlerinde

Yaygındır", *Science Daily*, 28 Mayıs 2013. www.sciencedaily.com/releases/2013/05/130528122433.htm. Brian Dodson, "Kuantum Dolanıklığı Sadece Tekinsiz Değildir, Bir de Ondan Kaçamazsınız", 10 Haziran 2013. http://www.gizmag.com/quantum-entanglement-ubiquitous/27836/.

38. Bununla birlikte bu "kesinliğe yakın" ifadesi tanımlanmalıdır. İfade dolanık olmayan halleri dolanık hallere tercih eden bir doğa ilkesi olmadığını varsayar. Analiz dolanık ve dolanık olmayan halleri sayar ve doğada fiilen meydana gelen her bir türün olasılığının her bir türün hal sayısıyla orantılı olduğunu varsayar.
39. M. Schlosshauer, *Elegance and Enigma: The Quantum Interviews* (Berlin: Springer-Verlag, 2011). Açık uçlu sorulardan biri de şudur: Bell eşitsizliğinin deneylerde gözlemlenen ihlalleri bize doğa hakkında ne söyler? Anket yapılan 17 uzmandan yedisi bunun doğanın yerbilmez olduğuna işaret ettiği, beşi kuantum fiziğinin gerçek dünya hakkında bir teori olmadığına işaret ettiği ve doğanın kendisinin yerbilmez olduğuna işaret etmediği şeklinde yanıtladı ve kalan beşi de başka yanıtlar verdi.
40. Aynı eserde, soru 8.
41. Bell, "Einstein-Podolsky-Rosen Paradoksu Üzerine". Einstein-Podolsky-Rosen paradoksunun ve bir "gerçeklik elementi" kavramının sunumu şu eserde yer alır: Albert Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen, "Fiziksel Gerçekliğin Kuantum Mekanik Tanımı Tam Kabul Edilebilir mi?", *Physical Review* 47 (1935), 777.
42. Brian Greene, *The Fabric of the Cosmos* (New York: Alfred A. Knopf, 2004), bu ifade 4. Bölüm, sayfa 117'de görülür.
43. Önemli bir örnek olarak, Schrödinger'in denklemi kuantum alan teorisinin kuantize Dirac denkleminin göreli olmayan limitidir. Kanıt için bakınız: E. G. Harris, *A Pedestrian Approach to Quantum Field Theory* (New York: Wiley-Interscience, 1972), 50-53.
44. Bu deneyin iyi bir analizi için bakınız: Maximilian Schlosshauer, *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition* (Berlin: Springer-Verlag, 2007), 63-65.
45. Gereksinim duyulan aygıt, yarıklardan birinden çıkan bir kuantumla, kuantumu değiştirmeden ilinti kuran bir aygıttır. Yani eğer kuantum yarık 1 halindeyse kuantum detektörün "yarık 1'i" göstermesi-

ne neden olurken kuantum yarık 1 halinde kalır. Ve eğer kuantum yarık 2 halindeyse kuantum detektörün yarık 2'yi göstermesine neden olurken yarık 2 halinde kalır. Böyle bir detektör hangi yarıktan çıkarsa çıksın kuantumu bozmaz. Daha fazla irdeleme için bakınız: Schlosshauer, *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*.

46. |Q1>| hazır >'ın |Q1>| D1>'e, |Q2>| hazır>'ın |Q2>| D2>'ye evrildiğini biliyoruz. Bu durumda kuantum fiziğinin doğrusal dinamiği (yani Schrödinger denklemi) |Q1> + |Q2>| hazır >'ın |Q1> |D1> + |Q2> |D2>'ye evrildiğini gösterir.
47. Ölçüm problemi nedeniyle *karışım* terimini dikkatli kullanıyorum. Bir karışımı haller yönünden değil, özellikler yönünden tanımlamamın nedeni, "ölçüm hali" yani "Schrödinger kedisi halinin" yerel bir karışım, fakat küresel bir süperpozisyon olmasıdır. *Yerel bir karışım*, yerel bir gözlemcinin kuantumun bir kesin özellikler (ölü veya diri gibi) karışımına sahip olduğunu gözlemlediği durum olduğu halde, küresel bir gözlemci kuantumun, kuantum ve başka bir kuantum arasında koherent bir ilintiler süperpozisyonuna katıldığını gözlemler.

10. Bölüm

1. Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndan Wojciech Zurek ve meslektaşları kuantum fenomenlerinin bilinen klasik dünyamızı meydana getirme biçimini incelemişlerdir. Zurek'in çalışması, etrafımızda gördüğümüz dünyayı –klasik fiziğin çoğunlukla doğru bir biçimde tanımladığı makroskobik dünyayı– yaratmadaki, dekoherans gibi ölçümle ilişkili süreçlerin temel rolünü vurgular. Bakınız: Maximilian Schlosshauer, *Decoherence and the Quantum to Classical Transition* (Berlin: Springer Verlag, 2007).
2. Ölçüm problemiyle ilgili yakın zamanda yapılan iki profesyonel görüş anketi vardır. İlki detaylı olarak şu eserde bulunur: Maximilian Schlosshauer, Johannes Kofler ve Anton Zeilinger, "Kuantum Mekaniğine Yönelik Temel Yaklaşımların Bir Enstantanesi", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (2013), 222-230. Bir kuantum temelleri konferansında otuz üç katılımcıya, birden fazla yanıta izin verilen, çoktan seçmeli sorular soruldu. Sorulan beşinci soru: Ölçüm problemi (a) sahte bir problemdir (%27'si evet yanıtını verdi), (b)

dekoheransla çözülür (%15'i evet yanıtını verdi), (c) başka bir şekilde çözülür veya çözülecek (%39'u evet yanıtını verdi), (d) kuantum mekaniğini tehdit eden ciddi bir zorluk (%24'ü evet yanıtını verdi), (e) yukarıdakilerden hiçbiri (%27'si evet yanıtını verdi). İkinci anket Maximilian Schlosshauer'in, *Elegance and Enigma: The Quantum Interviews* (Berlin: Springer Verlag, 2011) adlı eserinde tanımlandı. On yedi saygın kuantum temelleri uzmanından, on yedi sorudan her birine birer sayfalık yazılı yanıtlar vermeleri istendi. Yedinci soruda ölçüm probleminin ciddi bir engel mi yoksa çözülebilir sahte bir problem mi olduğu soruldu. On yedi uzmandan dokuzu bunun aşılamaz bir engel olduğunu, bu dokuz kişiden üçü de dekoheransın bunu çözmeye yardımcı olmayacağını ve biri de bunu kısmen çözeceğini fakat problemin özünün kalacağını söyledi. On yedi uzmandan altısı bunun sahte bir problem olduğunu, bir engel olmadığını, çünkü kuantum fiziğinin gerçeklikle değil bilgi ve enformasyonla ilgili olduğunu ileri sürdü ve bu altı kişiden ikisi de yeni fiziğin olası bir çözüm sunduğunu öne sürdü. Kalan iki uzmandan biri ölçüm problemini dekoheransın ve diğeri de çoklu dünyalar yorumunun çözdüğünü söyledi.

3. Önceki notun gösterdiği gibi bazı uzmanlar dekoheransın ölçüm problemini çözdüğü görüşündedir, fakat bu sonuca katılmayan uzman sayısı çok daha fazladır. Dekoheransın ölçüm problemini çözmemesinin nedeni sonuçlar problemini çözmemesidir. Bu noktanın açık ve ikna edici bir analizi için bakınız: Stephen Adler, "Dekoherans Neden Ölçüm Problemini Çözmedi: P. E. Anderson'a Bir Yanıt", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34 (2003), 135-142. Ayrıca bakınız: Armen Allahverdyan, Roger Balian ve Teo. Nieuwenhuizen, "Dinamik Modellerin Çözümünden Kuantum Ölçümünü Anlamak", *Physics Reports* 525 (2013), 1-201. Allahverdyan ve meslektaşlarının yaptıkları kuantum ölçümlerinin detaylı analizi dekoheransın ölçüm problemini çözmediği sonucuna varır (27. Bölüm). Daha fazla irdeleme için bakınız: Bu kitaptaki 11. Bölüm.
4. Art Hobson, "İki-Fotonlu İnterferometre ve Kuantum Halinin Çökmesi", *Physical Review* A 88 (2013), 022105.
5. Erwin Schrödinger, "Die gegenwärtige Situation in der Qauntenmechanik" (Kuantum Mekaniğinde Günümüzdeki Durum), *Naturwis-*