JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Kedisinin Peşinde

KUANTUM FİZİĞİ VE GERÇEKLİK



metis bilim | 2

JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Kedisinin Peşinde

İngiliz bilim yazarı John Gribbin Cambridge Üniversitesi'nde astrofizik eğitimi gördükten sonra bilimin çeşitli yönlerini indirgemeden popülerleştiren, bilimci kimliği taşımayan pek çok okuru bilimin hemen her alanındaki son gelişmeler hakkında bilgilendiren çok sayıda yazı ve kitap kaleme aldı. *Nature* ve (halen fizik danışmanlığı görevini yürüttüğü) *New Scientist* gibi bilim dergilerinin yanı sıra, *The Times*, *The Guardian* ve *The Independent* gibi gazetelerde de bilim hakkında yazılan yayımlandı ve yazdığı kitaplarla hem Britanya'da hem de ABD'de ödüller kazandı. BBC radyosu için çeşitli bilim programları hazırlayıp sunan Gribbin televizyonlarda yayınlanan çeşitli bilim programlarına da danışmanlık yapmıştır. Halen Sussex Üniversitesi Astronomi bölümünde konuk öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuklu olan Gribbin East Sussex'de yaşıyor. *Double Planet* (1988) ve *Innervisions* (1993) gibi birkaç bilimkurgu romanı da yayımlayan Gribbin asıl ününü 1984'te yayımlandığında büyük ilgi gören *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'nin ardından peş peşe yazdığı popüler bilim kitaplarıyla kazanmıştır. Bu kitaplar arasında başlıcaları şunlar: *In Search of the Big Bang* (1986), *The Matter Myth* (Paul Davies'le birlikte, 1991), *Stephen Hawking: A Life in Science* (1992), *In Search of the Edge of Time* (1992), *Einstein* (Michael White'la birlikte, 1994), *Darwin: A Life in Science* (1995), *Schrödinger's Kitten* (1996), *Origins* (1997), *The Search for Superstring, Symmetry and the Theory of Everything* (1999), *The First Chimpanzee* (2001), *The Human Genome* (2002).

Metis Yayınları
İpek Sokak No. 9, 34433 Beyoğlu, İstanbul
Tel: 212 2454696 Faks: 212 2454519
e-posta: info@metiskitap.com
www.metiskitap.com

Schrödinger'in Kedisinin Peşinde
Kuantum Fiziği ve Gerçeklik
John Gribbin

İngilizce Basımı: In Search of Schrödinger's Cat,
Quantum Physics and Reality, 1984
Çevirinin Yapıldığı Basım: Black Swan, 1991

© John and Mary Gribbin, 1984
Türkçe yayım hakları © Metis Yayınları, 2004

Akçalı Telif Hakları ile yapılan sözleşme
temelinde yayımlanmıştır.

Birinci Basım: Mayıs 2005

Yayıma Hazırlayan: Tuncay Birkan

Kapak Resmi: *Alice Harikalar Diyarında*'dan
Alice ile Cheshire kedisi
Görsel Tasarım: Semih Sökmen

Sayfa 8'de yer alan Chase karikatürü
Türkçe basım için eklenmiştir.

Dizgi ve Baskı Öncesi Hazırlık: Metis Yayıncılık Ltd.
Baskı ve Cilt: Yaylacık Matbaacılık Ltd.

ISBN 975-342-519-8

JOHN GRIBBIN

Schrödinger'in Kedisinin Peşinde

KUANTUM FİZİĞİ VE GERÇEKLİK

Çeviren:
Nedim Çatlı

metis

İçindekiler

Teşekkür 9

Giriş 13

Önsöz: Hiçbir Şey Gerçek Değil 15

Kuantum

Işık 21
Atomlar 33
Işık ve Atomlar 46
Bohr'un Atomu 62

Kuantum Mekaniği

Fotonlar ve Elektronlar 91
Matrisler ve Dalgalar 111
Kuantum Aşçılığı 132

...ve Ötesi

Tesadüf ve Belirsizlik 163
Paradokslar ve Olasılıklar 184
Tatmadan Bilinmez 220
Birçok Dünya 238

Sonsöz: Bitmemiş İş 257

Kaynakça 277
Sözlükçe 287
Dizin 292

"Hoşuma gitmiyor,
bu işe karıştığım için de üzgünüm."

ERWİN SCHRÖDİNGER
1887-1961

"Hiçbir şey gerçek değil."

JOHN LENNON
1940-1980


HEISENBERG
FİZİK DEPARTMANI
MUHTEMELEN
BURADA-
SINIZ
chase

Teşekkür

Kuantum kuramıyla tanışmam yirmi küsur yıl öncesine, lise günlerime dayanır. O sıralarda elementlerin periyodik cetvelini ve bir sürü iç sıkıcı ders boyunca boğuştuğum kimyanın neredeyse tamamını sihirli bir şekilde açıklayan atomun elektron kabuğu modelini keşfetmiştim. Bu keşfin devamını getirmek için benim mütevazı eğitim seviyeme göre "fazla ağır" olduğu söylenen kütüphane kitaplarının yardımıyla kuantum kuramının atom tayfını açıklayışındaki o güzel basitliği hemen keşfedip hayatımda ilk defa bir aydınlanma sonucu bilimdeki en iyi şeylerin hem güzel hem basit olduğunu gördüm. Bu gerçeği haddinden fazla öğretmen öğrencilerinden saklıyor, bilerek ya da bilmeyerek. Kendimi C. P. Snow'un *The Search* kitabındaki –çok daha sonra okuyabilmiştim– karakter gibi hissettim, o da aynı şeyi keşfediyordu:

> Rasgele bin bir türlü olgunun yerli yerine oturduğunu gördüm... "Ama doğru," dedim kendi kendime. "Çok güzel. Hem de doğru." (Macmillan, 1963, s. 27)

Kısmen bu içgörü sayesinde üniversitede fizik okumaya karar verdim. Vakti gelince bu emelim gerçekleşti ve Brighton'daki Sussex Üniversitesi'nde lisans öğrencisi oldum. Ama orada temel fikirlerdeki basitlik ve güzellik bir yığın ayrıntının ve kuantum mekaniği denklemlerinin yardımıyla spesifik problemleri çözmek için hazırlanmış matematik formüllerinin içinde boğulup gidiyordu. Bugün dönüp baktığımda anlıyorum ki bir Boeing 747'yi uçurmakla yelken kanat kullanmak arasında ne kadar alaka varsa, bu fikirlerin fizik dünyasında uygulamaya koyulma biçimleri ile temeldeki hakikat ve güzellik arasında da o kadar alaka vardı. O başlangıçtaki

içgörünün gücü meslek hayatımdaki önemli etkisini koruduysa da uzun süre kuantum dünyasını ihmal edip başka bilimsel mezraları araştırdım.

O erken yaşlardaki hevesin ateşi birtakım etkenler sonucunda yeniden alevlendi. 1970'lerin sonuyla 1980'lerin başında bilim dışındaki bir okur kitlesine tuhaf kuantum dünyasını tanıtmayı amaçlayan ama hepsi aynı ölçüde başarılı olmayan kitaplar ve makaleler çıkmaya başladı. Bu sözde "popülerleştirme"lerin bazıları hakikatlerden öyle insafsızca uzaktı ki, herhangi bir okurun bunları okuyarak bilimin hakikatini ve güzelliğini keşfedeceğini hayal edemiyordum. Bunun üzerine bu işi doğru dürüst yapma ihtiyacı hissettim. Bu sırada süregiden bir dizi deneyden haber geliyordu, buna göre kuantum kuramının en garip özelliklerinden bazılarının gerçekliği kanıtlanmıştı. İşte bu haberden aldığım ilhamla o garip fikirlere dair kavrayışımı tazelemek için tekrar kütüphanelerin altını üstüne getirmeye başladım. Derken bir Noel'de BBC tarafından Malcolm Muggeridge'e karşı bilim cephesinden bir denge sağlayayım diye bir radyo programına davet edildim. Muggeridge yakın zaman öncesinde Katolikliğe geçtiğini ilan etmişti, o bayram döneminde de esas konuk oydu. Bu büyük adam Hıristiyanlığın gizemleri üzerinde durup söyleyeceğini söyledikten sonra bana dönerek, "ama bütün cevapları bilen ya da bildiğini iddia eden adam işte burada," dedi. Elimdeki sınırlı zaman içinde Muggeridge'e gereken cevabı vermeye gayret ederek bilimin bütün cevapları bildiğini iddia *etmediğini* ve esasen mutlak imana ve hakikatin bilindiği inancına dayalı olanın bilim değil, din olduğunu belirttim. "Ben hiçbir şeye *inanmıyorum*," dedim ve tam bu lafın ne anlama geldiğini açıklamak üzereydim ki program sona erdi. Bütün bayram dönemi boyunca eş dost bu sözün yankısıyla karşıladı beni; benim herhangi bir şeye mutlak inancımın olmayışının, güneşin bir gecede yok olmayacağı ihtimali gibi makul varsayımlara başvurarak normal bir hayat sürmemi engellemediğini anlatmak için saatler harcamak zorunda kaldım.

Bu süreç bilimin neden ibaret olduğu konusundaki düşüncelerimi berraklaştırdı ve kuantum dünyasının temel gerçekliği –ya da gerçekdışılığı– hakkında bir sürü tartışmaya girmemi sağladı, so-

nunda da şu an elinizde bulunan kitabı yazmak için gerçekten hazır olduğuma kanaat getirdim. Kitabı hazırlarken daha zor anlaşılır argümanların çoğunu İngiliz Kuvvetleri Radyo-TV Servisi tarafından yayınlanan, Tommy Vance'in sunduğu bir radyo programına düzenli konuk olarak katılarak deneme şansı buldum; Tom sorularıyla konuyu deştikçe çok geçmeden sunumumda eksiklikler olduğu çıktı ortaya, bu sayede fikirlerimi daha iyi düzenledim. Kitabın hazırlanmasındaki ana başvuru kaynağı Sussex Üniversitesi'nin kütüphanesiydi. Burası herhalde kuantum kuramı hakkındaki en iyi kitap koleksiyonuna sahiptir; daha karanlıkta kalan bazı başvuru kitaplarına da, teleks mesajlarıyla insanı ikna etme konusunda özel bir yeteneği olan, *New Scientist*'ten Mandy Chaplin'in sıkı takipçiliği sayesinde ulaşabildim, Christine Sutton da parçacık fiziği ve alan kuramıyla ilgili yanlış kavradığım bazı şeyleri düzeltti. Karım literatür taraması ve kaynakların düzenlenmesiyle ilgili temel desteği vermekle kalmayıp pek çok pürüzü törpüledi. Ayrıca bana "Kutudaki Saat" deneyi ile "EPR [Einstein-Podolsky-Rosen] Paradoksu"nun bazı inceliklerini ayrıntılarıyla açıklama zahmetine giren Profesör Rudolf Peierls'e de minnettarım.

Demek ki, bu kitaptaki iyi niteliklerle ilgili bütün övgülerin muhatapları şunlar: on altı yaşındayken Kent County Kütüphanesi'nde bulduğum, şu an isimlerini hatırlamadığım "ağır" kimya ders kitapları; kuantum kavramlarını "popülerleştirme"yi ve tanıtmayı beceremeyip beni daha iyisini yapabileceğime ikna eden kitap ve makalelerin yazarları; Malcolm Muggeridge ve BBC; Sussex Üniversitesi'nin kütüphanesi; Tommy Vance ve BFBS; Mandy Chaplin ve Cristine Sutton; ve özellikle Min. Kitapta kalan eksikliklerle ilgili bütün şikâyetler de, tabii ki, bendenize yöneltilmelidir.

JOHN GRIBBIN
Temmuz 1983

Giriş

Eğer sokaktaki adam için görelilik kuramı hakkında yazılan bütün kitaplar ve makaleler uç uca eklenseydi, muhtemelen buradan aya kadar giderdi. Einstein'ın görelilik kuramının yirminci yüzyıl biliminin en büyük başarısı olduğunu "herkes biliyor", ama herkes yanılıyor. Fakat sokaktaki adam için kuantum kuramı hakkında yazılan bütün kitaplar ve makaleler uç uca eklenseydi, sadece masamın üstü kadar yer kaplardı. Bu, akademik dünyanın duvarları dışında kimsenin kuantum kuramından haberi olmadığı anlamına gelmiyor. Tam tersi, kuantum mekaniği, bazı çevrelerde hayli popüler oldu; mesela telepati, kaşık bükme gibi fenomenleri açıklamak için ona başvuruldu, çeşitli bilimkurgu öykülerine verimli fikirler sağladı. Kuantum mekaniği popüler mitolojide kimsenin anlamadığı ve kimsenin işine yaramayan tuhaf ve ezoterik bir bilim dalı olarak okültizm ve Duyu Ötesi Algıyla bir tutularak tanımlanır, herhangi bir tanım yapıldığı söylenebilirse tabii.

Bu kitap bilimsel çalışmanın aslında en temel ve en önemli alanına gösterilen bu tavra karşı çıkmak için kaleme alınmıştır. Kitap doğuşunu 1982 yazında bir araya gelen çeşitli etkenlere borçlu. Birincisi, görelilik hakkında yazdığım bir kitap olan *Spacewarps*'u yeni bitirmiştim ve yirminci yüzyıl biliminin öteki büyük dalının üzerindeki gizem örtüsünün icabına bakmanın sırası diye düşündüm. İkincisi, o sıralarda, bilimle alakası olmayan insanların kuantum kuramı zannettikleri yanlış kavramlardan duyduğum rahatsızlık gitgide artıyordu. Fritjof Capra'nın harika kitabı *Fiziğin Taosu* ne fizikten ne de Tao'dan bir şey anlayan, ama Batı bilimiyle Doğu felsefesi arasında bağlantı kurmanın para getireceğini düşünen sürüsü-

ne bereket taklitçi yaratmıştı. Son olarak, 1982 Ağustosu'nda Paris' ten gelen habere göre bir ekip dünyanın kuantum mekaniği yorumunun doğruluğunu teyit, bundan hâlâ şüphe edenleri de ikna eden önemli bir deneyi başarıyla gerçekleştirmişlerdi.

Burada öyle "doğu gizemciliği", kaşık bükme ya da Duyu Ötesi Algı falan aramayın. Burada kuantum mekaniğinin gerçek öyküsünü, bütün kurmaca eserlerden çok daha garip olan o gerçeği arayın. Bilim böyle bir şeydir – başkalarının felsefe eskilerini kuşanmaya ihtiyacı yoktur, çünkü kendisi zaten bir sürü haz, gizem ve sürprizle doludur. Bu kitabın muhatap olduğu soru şudur: "Gerçeklik nedir?" Cevap(lar) sizi şaşırtabilir; inanmayabilirsiniz. Fakat çağdaş bilimin dünyayı nasıl gördüğünü keşfedeceksiniz.

Önsöz

Hiçbir Şey Gerçek Değil

Kitabın başlığındaki kedi hayali bir hayvan, fakat Schrödinger gerçek bir kişiydi. Erwin Schrödinger 1920'lerin ortalarında şimdi kuantum mekaniği diye bilinen bir bilim dalının denklemlerinin geliştirilmesinde etkili olmuş Avusturyalı bir bilim adamıydı. Gerçi bilim dalı demek pek doğru olmaz çünkü kuantum mekaniği bütün modern bilimin temel dayanağıdır. Bu denklemler çok küçük nesnelerin –genel olarak, atomların ya da daha küçüklerin– davranışlarını tarif eder ve çok küçükler dünyasının anlaşılmasını sağlayan *tek* şeydir. Bu denklemler olmadan fizikçiler işleyen nükleer enerji santrallerini (ya da bombaları) tasarlayamazlardı, lazerleri yapamaz ya da güneşin nasıl sıcak kaldığını açıklayamazlardı. Kuantum mekaniği olmadan kimya hâlâ Karanlık Çağı yaşardı ve moleküler biyoloji bilimi diye bir şey olmazdı – DNA'lar anlaşılmaz, genetik mühendisliği olmazdı.

Kuantum kuramı bilimin en büyük başarısını temsil eder, görelilik kuramından çok daha önemli ve çok daha doğrudan kullanım alanına sahiptir. Fakat bazı garip öngörülerde bulunur. Kuantum mekaniği gerçekten o kadar gariptir ki Albert Einstein bile anlaşılmaz bulup Schrödinger ve meslektaşlarının geliştirdiği kuramdan çıkan bütün sonuçları kabul etmemiştir. Einstein ve pek çok başka bilim adamı kuantum mekaniği denklemlerinin, tesadüfen atom ve atomaltı parçacıkların davranışı hakkında makul, işe yarar bir kılavuz sağlayan ama gündelik hayatta anladığımız gerçekliğe karşılık gelen daha derin bir hakikatin de üzerini örten bir tür matematik hi-

lesini temsil ettiğine inanarak rahatlatıyorlardı içlerini. Zira kuantum mekaniğinin söylediğine göre, hiçbir şey gerçek değildir ve şeylerin de biz bakmadığımız zamanlarda ne yaptıkları hakkında hiçbir şey söyleyemeyiz. Kuantum dünyasıyla her gün yaşadığımız dünya arasındaki farkı belirgin hale getirmek için Schrödinger'in hayali kedisi imdada çağrıldı.

Kuantum mekaniği dünyasında gündelik dünyadan aşina olduğumuz fizik kuralları artık işlemez. Onun yerine olaylar olasılıkların hükmü altındadır. Sözgelimi, radyoaktif bir atom, bir elektron yayarak bozunabilir; ama bu olmayabilir de. Bir radyoaktif madde parçasının içinde bulunan bir atomun belli bir zamanda bozunma ihtimalinin tam yarı yarıya olduğu ve bozunma meydana geldiği takdirde bunu tespit edecek bir algılayıcının bulunduğu bir deney düzeneği kurmak mümkün. Kuantum kuramının ima ettiği sonuçlardan Einstein kadar canı sıkılan Schrödinger bu sonuçların saçmalığını göstermek amacıyla böyle bir deney hayal etti. Kapalı bir odada ya da kutuda, içinde aynı zamanda canlı bir kedi ve bir ampul zehirli gazın da bulunduğu bu deney düzeneğine göre, eğer radyoaktif bozunma meydana gelirse zehrin şişesi kırılacak ve kedi ölecekti. Gündelik hayatta kedinin ölme ihtimali yarı yarıyadır. Kutunun içine bakmadan gayet rahat, içerideki kedi için "ya yaşıyordur ya da ölmüştür" diyebiliriz. Fakat işte şimdi kuantum dünyasının garipliğiyle karşılaşıyoruz. Kurama göre, bu *iki* olasılığın da radyoaktif madde açısından, dolayısıyla kedi açısından da, gözlemlenmediği sürece bir gerçekliği yoktur. Biz ne olduğunu görmek için kutunun içine bakana kadar atomun bozunması ne meydana gelmiştir ne de gelmemiştir, kedi ne ölmüştür, ne de ölmemiştir. Kuantum mekaniğinin katışıksız versiyonunu kabul eden kuramcılar bir gözlemcinin neler olup bittiğini görmek için kutunun içine bakacağı zamana kadar kedinin bir tür belirsiz durumda var olduğunu, ne sağ ne ölü olduğunu söylüyor. Gözlemlenmediği sürece hiçbir şey gerçek değildir.

Bu fikir başta Einstein olmak üzere birçok kişinin tüylerini diken diken etti. Einstein, dünyanın esas olarak kuantum seviyesindeki olasılıkların rasgele "seçimleri"nin sonuçlarının birikmesi tara-

fından yönetildiğini savunan kurama gönderme yaparak "Tanrı zar atmaz," diyordu. Schrödinger'in kedisinin durumunun gerçekdışılığını kaale almıyor, her şeyin altında yatan ve hakiki temel gerçekliği sağlayan bir tür "işleyen saat" olduğunu varsayıyordu. Bu her şeyin temelinde işleyen gerçekliği ortaya çıkarabilecek deneyleri tasarlamak için yıllarını harcadı ama böyle bir deneyi gerçekleştirmek mümkün olmadan öldü. Kendisinin başlattığı muhakeme tarzının sonucunu görememesi iyi olmuştur belki de.

1982 yazında Fransa'da Paris-Sud Üniversitesi'nde Alain Aspect'nin başını çektiği bir ekip gerçekdışı kuantum dünyasının altındaki temel gerçekliği tespit etmek için bir dizi deney gerçekleştirdi. Temel gerçekliğe –altta işleyen saate– "gizli değişkenler" adı verilmişti ve deney bir kaynaktan zıt yönlere uçup giden iki fotonun, yani ışık parçacığının davranışıyla ilgiliydi. Bu deney Onuncu Bölüm'de baştan sona anlatılıyor fakat buna esasen bir gerçeklik testi olarak bakılabilir. Aynı kaynaktan çıkan iki foton kutuplanma denilen bir özelliği ölçen iki detektör tarafından gözlemlenebilir. Kuantum kuramına göre bu özellik ölçülmeden önce yoktur. Gizli değişken düşüncesine göre her foton yaratıldığı andan itibaren "gerçek" bir kutuplanmaya sahiptir. Bu iki foton birlikte yayıldığı için kutuplanmaları da birbiriyle bağıntılıdır (*correlated*). Fakat fiili olarak ölçülen bağıntının yapısı iki gerçeklik görüşüne göre farklıdır.

Bu önemli deneyin sonuçları ayan beyan ortadadır. Gizli değişken kuramının öngördüğü türden bir bağıntı bulunmuyor; kuantum mekaniğinin öngördüğü türden bir bağıntı bulunuyor, dahası, yine kuantum mekaniğinin öngördüğü gibi bir fotonun üzerinde yapılan ölçüm öteki fotonun yapısı üzerinde anında bir etki yaratıyor. Işık hızıyla birbirlerinden ayrılıp uçmalarına ve görelilik kuramının bize hiçbir haberin ışık hızını geçemeyeceğini söylemesine rağmen bir etkileşim ikisini ayrılmaz bir biçimde birbirine bağlıyor. Bu deneyler dünyanın altında yatan temel gerçeklik diye bir şeyin olmadığını kanıtlıyor. Evreni oluşturan temel parçacıkların davranışını düşünürken gündelik anlamdaki "gerçeklik" iyi bir yol değil; öte yandan bu parçacıklar adeta görünmez bir bütüne ayrılmaz bir biçimde bağlanmış görünüyorlar ve her biri bir diğerine ne olduğunun farkında.

Schrödinger'in kedisini aramak kuantum gerçekliğini aramaktı. Bu kısa özetten sonra kelimenin gündelik anlamıyla gerçeklik diye bir şey olmadığı için bu arayış boşa çıkmış gibi görülebilir. Fakat hikâye pek de burada bitmiyor, ayrıca Schrödinger'in kedisinin izini sürmek bizi kuantum mekaniğinin geleneksel yorumunu da içeren ama onu aşan yeni bir gerçeklik anlayışına götürebilir. Ne var ki kat edilmiş olan yol epey uzun ve üzerine kafa yorduğu soruların şimdi bildiğimiz cevaplarını görmüş olsa muhtemelen Einstein'dan çok daha fazla dehşete kapılacak olan bir bilim adamıyla başlıyor. Üç yüzyıl önce ışığın doğasını inceleyen Isaac Newton, Schrödinger'in kedisine giden yola çoktan çıkmış olduğunu asla bilemezdi.

BİRİNCİ KISIM

Kuantum

"Kuantum kuramıyla sarsılmayan
onu anlamamış demektir."

NIELS BOHR
1885-1962

Birinci Bölüm

Işık

Fiziği Isaac Newton icat etmiştir, bütün bilim de fiziğe dayalıdır. Newton tabii ki bunu başkalarının çalışmaları üzerine inşa etmiştir, fakat bilimi uzay yolculuğuna, lazerlere, atom enerjisine, genetik mühendisliğine, kimyanın anlaşılmasına ve diğer bütün şeylere giden yolun üstüne oturtan onun neredeyse tam üç yüz yıl önce yayımladığı üç hareket yasası ve kütle çekim kuramıdır. İki yüz yıl boyunca Newton fiziği (artık "klasik" fizik diye anılıyor) tahtta kaldı; yirminci yüzyılda devrim yaratan yeni kavrayışlar fiziği Newton'un çok ötesine götürdü, fakat o iki yüz yıllık bilimsel gelişme olmaksızın o yeni kavrayışlar asla ortaya çıkmayabilirdi. Bu kitap bir bilim tarihi değil ve de o klasik fikirlerden ziyade yeni fizikle –kuantum fiziğiyle– ilgilidir. Fakat Newton'un üç asır önceki çalışmaları bile gelmekte olan değişimlerin habercisiydi; gezegenlerin hareketleri ve yörüngeleriyle ilgili çalışmalarını ya da o ünlü üç yasasını değil, ışığın doğasıyla ilgili araştırmalarını kastediyorum.

Newton'un ışık hakkındaki fikirleri büyük ölçüde katı cisimlerin ve gezegen yörüngelerinin davranışı hakkındaki fikirlerine dayanır. Cisimlerin davranışına dair gündelik tecrübelerimizin yanıltıcı olabileceğini ve bir cismin, bir parçacığın, dışarıdan herhangi bir etki olmadığı durumda yerkürenin yüzeyindeki böyle bir parçacıktan çok farklı davranması gerektiğini fark etmiştir Newton. Burada, gündelik tecrübelerimiz bize eşyanın itilmedikçe bir yerde durma eğiliminde olduğunu ve itmeyi bıraktığımız anda da hareketi bıraktığını söyler. O halde gezegenler ya da ay gibi cisimler neden yörüngelerindeki hareketlerini bırakmıyorlar? Onları iten bir şey mi var? Yok tabii. Doğal durumda olan, dış müdahaleden uzak olan ge-

zegenlerdir, müdahaleye uğrayan da yerkürenin yüzeyindeki cisimlerdir. Eğer bir kalemi masamın üzerinde kaydırmaya çalışırsam, benim itişim masaya sürten kalemin sürtünme kuvvetiyle karşılaşır. İşte ben itmeyi bıraktığımda onu durduran şey de budur. Eğer sürtünme kuvveti olmasaydı kalem harekete devam ederdi. Bu Newton'un ilk yasası: Dışarıdan uygulanan bir kuvvetin etkisinde olmayan bir cisim durgun halde kalır ya da sabit bir hızla hareket eder. İkinci yasa bize dışarıdan uygulanan bir kuvvetin –itme– bir cisim üzerinde ne kadar etkili olduğunu söyler. Böyle bir kuvvet cismin hızını değiştirir, hızdaki değişime de ivme denir; kuvveti, üzerine kuvvet uygulanan cismin kütlesine bölerseniz sonuç o kuvvetin cisim üzerinde ürettiği ivmeyi verir. Bu ikinci yasa genellikle biraz farklı ifade edilir: kuvvet eşittir kütle çarpı ivme. Newton'un üçüncü yasası da bize cisimlerin sağa sola itilmeye karşı nasıl tepki verdikleri hakkında bir şeyler söyler: Her etkiye karşılık eşit ve zıt bir tepki vardır. Raketimle tenis topuna vurduğumda, raketin tenis topunu itmek için uyguladığı kuvvetle raketi geri iten kuvvet tamı tamına eşittir; masamın üzerinde yerçekimiyle aşağı doğru çekilen kalem tamamen eşit bir kuvvetle masamın üstü tarafından geri itilir; gazları roketin yanma odasından dışarı iten patlama sürecinin kuvveti, roketin kendi üzerinde eşit ve zıt bir kuvvet yaratır, bu da roketi ters yönde iter.

Bu yasalar ve Newton'un kütle çekim yasası, güneşin etrafındaki gezegenlerin ve dünyanın etrafındaki ayın yörüngelerini açıklıyordu. Sürtünme kuvveti gerektiği gibi hesaba katıldığında dünya yüzeyindeki cisimlerin davranışlarını da açıklıyor ve mekaniğin temellerini oluşturuyordu. Fakat bunların aynı zamanda hayret verici felsefi içerimleri de vardı. Newton yasalarına göre bir parçacığın davranışı öteki parçacıklarla girdiği etkileşimler ve üzerine uygulanan kuvvetler esas alınarak öngörülebilirdi. Eğer evrendeki her parçacığın konumunu ve hızını bilmek bir mümkün olsaydı, o zaman her parçacığın geleceği, dolayısıyla evrenin geleceği mutlak bir kesinlikle tahmin edilirdi. Bunun anlamı, evrenin bir saat gibi Yaratan tarafından kurulup bütünüyle öngörülebilen bir yola bırakıldığı mıydı? Newton'un klasik mekaniği bu belirlenimci evren görüşüne

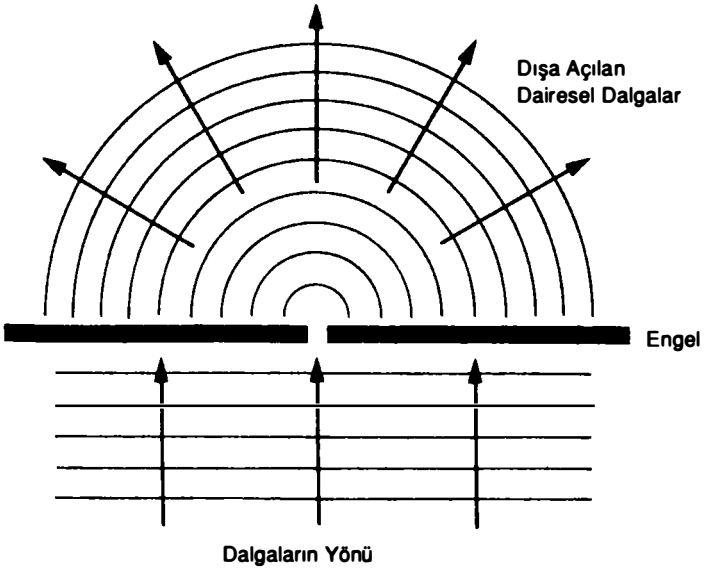
yığınla destek sağladı, bu tabloda insanın özgür iradesine ya da rastlantıya pek yer kalmıyordu. Hepimizin aslında hiçbir gerçek tercih söz konusu olmadan, hayatta önceden belirlenmiş izleri takip eden birer kukla olmamız mümkün müydü? Çoğu bilim adamı bu soruyu tartışma işini filozoflara bırakmakla yetindi. Fakat bu soru yirminci yüzyıl yeni fiziğinin kalbinde bütün cesametiyle yeniden gündeme geldi.

DALGA MI PARÇACIK MI?

Parçacık fiziğiyle böyle bir başarı yakalayınca Newton'un ışığın davranışını da parçacık gibi açıklamaya çalışması pek şaşırtıcı değil. Ne de olsa, gözlemlere göre ışık demetleri düz bir doğrultuda gider, ışığın bir aynaya çarpıp sekmesi de tıpkı bir topun sert bir duvara çarpıp sekmesi gibidir. Newton ilk aynalı teleskobu yapmış, beyaz ışığı gökkuşağının bütün renklerinin üst üste binmesi [*superposition*] olarak açıklamış ve optik alanında daha pek çok şey yapmıştır, fakat kuramları daima ışığın tanecik [*corpuscle*] dediği minik parçacıkların bir akışı olduğu varsayımına dayanıyordu. Işık demetleri daha hafif bir maddeyle daha yoğun madde arasındaki sınırı geçerken bükülürler, havadan suya ya da cama geçerkenki gibi (cin tonik bardağındaki karıştırma çubuğunun bükülmüş gibi görünmesinin sebebi budur) ve bu kırılma, taneciklerin "optik bakımdan daha yoğun" cismin içinde daha hızlı gittikleri şeklindeki tanecik kuramıyla gayet güzel açıklanır. Ne var ki, Newton'un zamanında bile bütün bunları açıklamanın alternatif bir yolu vardı.

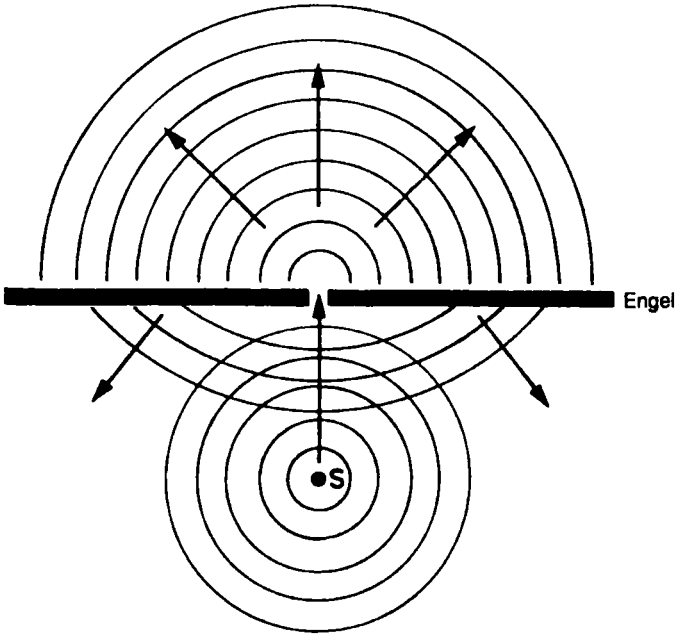
Hollandalı fizikçi Christiaan Huygens, 1629'da doğmuş, yani ondan on üç yaş büyük olsa da, Newton'un çağdaşıydı. Işığın parçacıkların akışı değil, bir dalga olduğu fikrini geliştirdi. Tıpkı bir denizin ya da gölün yüzeyinde hareket eden dalgalar gibiydi bu dalgalar, fakat bunlar "ışık saçan esir" [*luminiferous ether*] dediği görünmez bir madde içinde yayılıyorlardı. Bir gölcüğe atılan taşla yaratılan halka dalgacıklar gibi, esirdeki ışık dalgalarının bir ışık kaynağından her yöne yayıldığı düşünülüyordu. Dalga kuramı da yan-

sımayı ve kırılmayı tanecik kuramı kadar iyi açıklıyordu. Bu kuram, ışık dalgalarının optik bakımdan daha yoğun olan madde içinde daha hızlı değil, daha yavaş gittiğini söylese de on yedinci yüzyılda ışık hızını ölçmenin bir yolu olmadığından bu farklılık iki kuram arasındaki çatışmayı çözüme bağlayamadı. Fakat tek bir kilit noktada iki fikir, gözle görülür şekilde birbirinden ayrılıyordu. Işık pürüzsüz bir kenardan geçerken keskin kenarlı bir gölge oluşturur. Bu da düz doğrultuda giden parçacık akışının davranışıdır. Dalgaysa gölgeye giden yolun bir kısmında bükülme, ya da kırılma eğilimi gösterir (gölcük üzerindeki, bir kayanın etrafında bükülen halka dalgacıkları düşünün). Üç yüz yıl önce bu kanıt açık seçik şekilde tanecik kuramının lehineydi ve dalga kuramı unutulmadıysa da terk edildi. Ne var ki, on dokuzuncu yüzyılın başlarına gelindiğinde iki kuramın konumu neredeyse tam tersi yönde değişti.



Şekil 1.1 Bir engeldeki küçük bir delikten geçen paralel su dalgaları deliğin öte tarafında hiç "gölge" bırakmadan daireler halinde yayılırlar.

On sekizinci yüzyılda ışığın dalga kuramını çok az insan ciddiye alıyordu. Bu üç-beş kişiden kuramı sadece ciddiye almakla kalmayıp bir de onu savunmak için yazan biri İsviçreli Leonard Euler' di. Zamanının önde gelen matematikçilerinden olan Euler, geometri, yüksek matematik ve trigonometrinin geliştirilmesinde önemli katkılarda bulunmuştu. Modern matematik ve fizik aritmetik terimleriyle, denklemlerle ifade edilir; bu aritmetik ifadenin dayalı olduğu teknikler büyük oranda Euler tarafından geliştirilmiş, Euler bu süreç içinde günümüzde de kullanılan yalın işaretleme yöntemleri bulmuştur; bir dairenin çevresinin, çapına olan oranı için "pi" ismini; eksi birin karekökünü göstermek için *i* harfini (onunla da pi ile



Şekil 1.2 Bir gölcüğe atılan taşın yarattığı halka dalgacıklar da, dar bir açıklıktan geçerlerken deliğin merkezinden yayılan dairesel dalgalar gibi yayılırlar (ve tabii ki engele çarpan dalgalar tekrar yansırlar).

de yine karşılaşacağız) ve matematikçilerin integral denilen işlemi göstermek için kullandıkları işaretleri ilk o ortaya atmıştır. Ancak ilginçtir, *Encyclopaedia Britannica*'nın Euler maddesinde ışığın dalga kuramıyla ilgili görüşlerinden, bir çağdaşının dediği gibi, "önde gelen tek bir fizikçinin bile" benimsemediği[1] görüşlerinden söz edilmiyor. Euler'in onunla aynı fikirleri paylaşan tek önde gelen çağdaşı Benjamin Franklin'di; fakat fizikçiler, İngiliz Thomas Young'ın on dokuzuncu yüzyılın başlarında ve Fransız Augustin Fresnel'in de bundan kısa süre sonra yaptıkları çok önemli yeni deneylere kadar bu görüşleri kolaylıkla göz ardı ettiler.

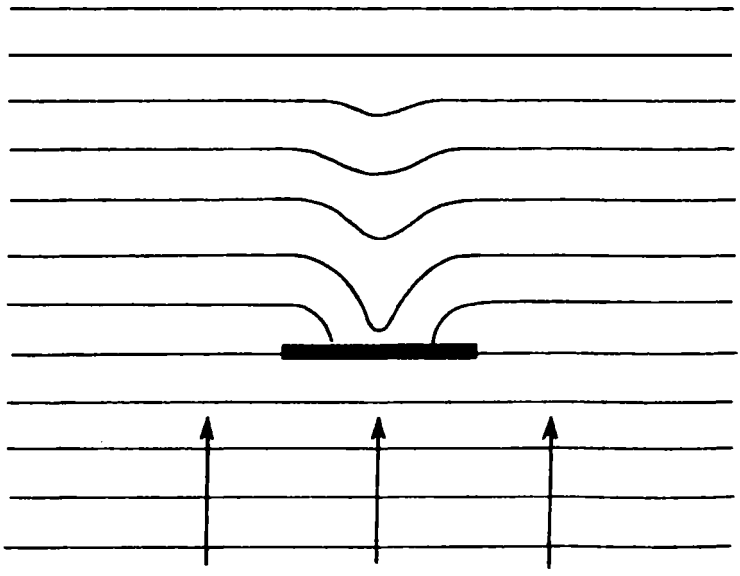
DALGA KURAMI GALİP

Young bir gölcüğün yüzeyindeki dalgaların nasıl hareket ettiği bilgisini ışığın da aynı şekilde yayılıp yayılmadığını test edecek bir deney tasarlamakta kullandı. Bir su dalgasının neye benzediğini hepimiz biliriz, yine de benzetimi daha doğru yapmak için büyük bir deniz dalgası yerine halka dalgacıkları [*ripples*] düşünmek daha uygun olur. Dalganın belirgin özelliği, geçerken suyun seviyesini hafif yükseltmesi, sonra alçaltmasıdır; durgun suyun üstündeki tepenin yüksekliği onun genliğini verir; kusursuz bir dalgada, genlik, dalga geçerken aşağıya itilen su seviyesinin miktarıyla aynıdır. Gölcüğe atılan taşımızın yarattıklarında olduğu gibi bir dizi halka dalgacık, birbirini dalga boyu denilen düzenli uzaklıklarla takip eder. Bu dalga boyu bir tepeden öteki tepeye olan mesafeyle ölçülür. Çakıl taşımızın suya daldığı noktanın çevresinde dalgalar dairesel olarak yayılırlar, fakat denizdeki dalgalar ya da esen rüzgârın gölde yarattığı dalgalar ileri doğru bir dizi düz çizgi halinde, art arda, paralel olarak gidebilir. İki halde de, belli bir noktadan –mesela bir kayadan– her saniye geçen dalga tepesinin sayısı dalganın frekansını verir. Frekans saniyede geçen dalga boyu sayısıdır, o yüzden dalganın hızı, yani her tepenin ilerleme hızı, dalga boyunun frekansla

1. Aktaran Ernest Ikenberry, *Quantum Mechanics*, s. 2; bkz. kaynakça.

çarpımına eşittir.

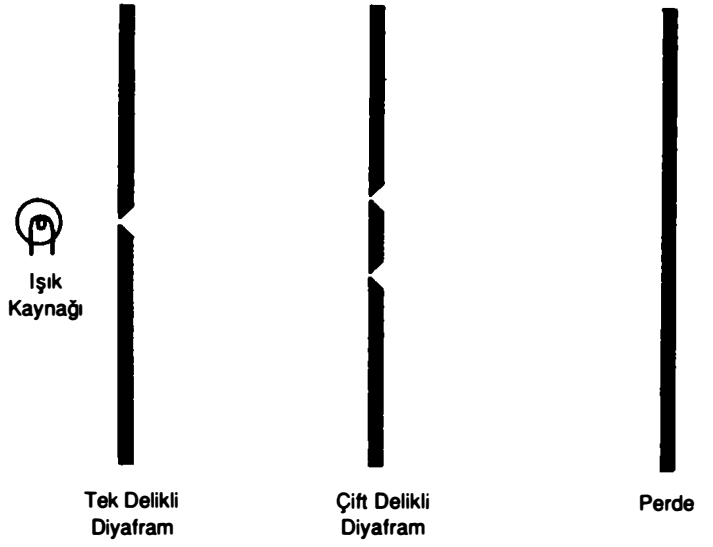
Kritik deney, daha ziyade bir kumsala doğru gidip kırılan dalga hatlarına benzeyen paralel dalgalarla başlar. Bunları suda çok uzağa fırlatılmış çok büyük bir cismin yarattığı dalgalar olarak gözünüzde canlandırabilirsiniz. Durmadan daireler halinde genişleyerek yayılan "dalgacıklar" eğer yeterince uzaktaysanız size paralel ya da düz dalgalar gibi görünürler, çünkü durağanlığın bozulduğu noktanın çevresindeki çok büyük dairenin kavisini fark etmek güçtür. Bir su tankı içinde önlerine bir engel koyulduğunda böyle düz dalgalara ne olduğunu incelemek kolaydır. Eğer engel küçükse, dalgalar etrafında bükülür ve arkasını kırılmayla doldurup geriye çok az bir "gölge" bırakır; eğer engel dalgacıkların dalga boylarına kıyasla



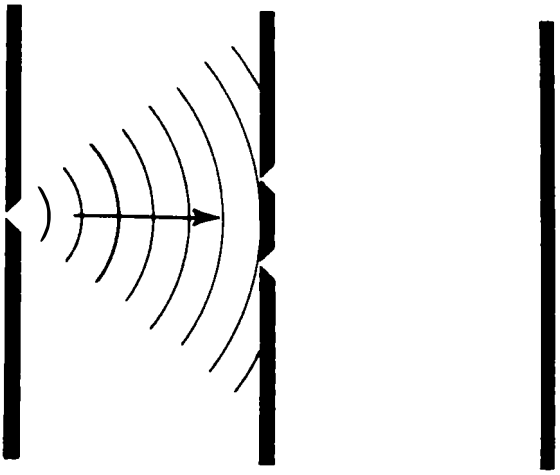
Şekil 1.3 Dalgaların köşelerin çevresinde bükülebilme yetenekleri de bir engelin arkasındaki gölgeyi çabucak doldurabilecekleri anlamına gelir, yeter ki engel dalgaların dalga boyundan çok büyük olmasın.

çok büyükse o zaman arkasındaki gölgeye doğru sadece hafiften bükülüp durağanlığı bozulmamış bir su bölgesi bırakır. Eğer ışık bir dalgaysa keskin kenarlı gölgeleri olması hâlâ mümkündür, ancak ışığın dalga boyunun, gölgeyi yaratan cismin büyüklüğüne kıyasla çok küçük olması şarttır.

Şimdi bu bakışın tersini ele alalım. Bir grup dalganın tankın içinde güzel güzel ilerlediğini ve suyla çevrili bir engel yerine ortasında bir oyuk olan bütün bir duvarla karşılaştığını hayal edin. Eğer oyuk yaratılan çalkalanmanın dalga boyundan çok daha büyükse, dalganın sadece oyuk hizasındaki kısmı karşıya geçerek hafifçe yayılır, fakat engelin öteki tarafındaki suyun büyük kısmını bozmaz – bir mendireğin girişine ulaşan dalgalar gibi. Fakat duvardaki delik çok küçükse, o zaman delik o noktada sanki suya çakıl taşları atılıyormuş gibi yeni bir dairesel dalga kaynağı işlevi görür. Duvarın



Şekil 1.4 Işığın köşelerin çevresindeyken ve küçük deliklerin arasından geçerken kırınma yeteneği, dairesel bir dalga yapmak için tek yarık ve girişim yapmak için de çift yarık kullanarak test edilebilir.



Şekil 1.5 Işık dalgaları, bir delikten geçen su dalgacıkları gibi ilk yarıktan halkalar halinde etrafa yayılır, birbirleriyle "uygun adımda"dırlar.

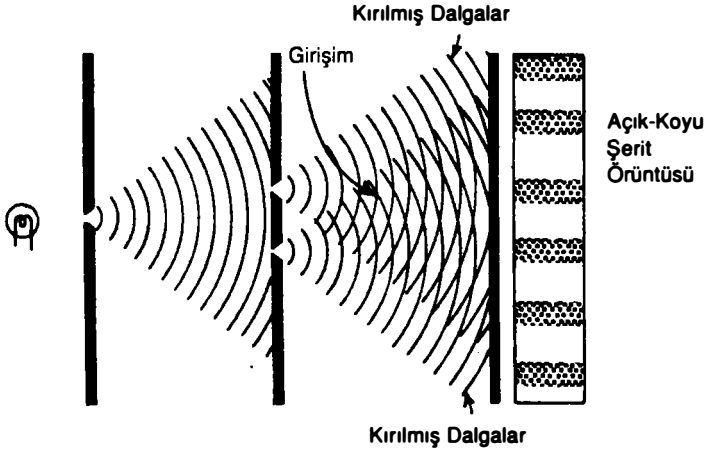
uzak köşesinde bu dairesel dalga (daha doğrusu, yarım dairesel dalga) suyun yüzeyinde yayılarak durağanlığı bozulmayan tek bir bölge bırakmaz.

Buraya kadar her şey iyi. Şimdi nihayet Young'ın deneyine geliyoruz. Su tankı içinde bir engelle karşılaşan paralel dalgaların olduğu aynı deney düzeneğini düşünün, ama bu sefer engelde *iki* küçük delik olsun. Deliklerin her biri tankın duvarının arkasında kalan bölgesinde yeni birer yarım dairesel dalga kaynağı gibi hareket eder ve bu iki grup dalga, duvarın öteki tarafındaki aynı paralel dalgalar tarafından üretildikleri için de tamamen uygun adımda ya da aynı fazda giderler. Artık suyun üzerinde yayılan iki dalgacık grubu var, bu da su yüzeyinde daha karmaşık bir dalgacık örüntüsü üretir. İki dalganın da su yüzeyini yukarı kaldırdığı yerde daha belirgin bir tepe görürüz; bir dalganın tepe, öteki dalganın da çukur yaratmaya çalıştığı yerde ikisi birbirini götürür ve su seviyesi değişmez. Bu etkilere yapıcı ve yıkıcı girişim [*interference*] denir, bir su birikintisine iki çakıl taşını aynı anda atarak da kabaca gözlemlenebilir. Eğer ışık bir

dalgaysa, eşdeğer bir deneyin ışık dalgaları arasında benzer bir girişim üretmesi gerekir, işte Young'ın keşfettiği şey tam da buydu.

Young ortasında iki dar yarık olan ışık geçirmez bir perdeye ışık tuttu. Perdenin arkasında bu iki yarıktan geçen ışık yayılıp birbiriyle girişim yaptı. Eğer su dalgalarıyla kurulan analoji doğruyduysa perdenin arkasında her bir yarıktan gelen yapıcı ve yıkıcı dalgaların sebep olduğu, bir açık bir koyu şeklinde devam eden bir girişim örüntüsü oluşması gerekiyordu. Young yarıkların arkasına beyaz bir perde koyunca tam da bunu buldu – bir açık bir koyu şeritler halinde bezenmiş bir perde.

Fakat Young'ın deneyi bilim dünyasını pek ayağa kaldırmadı, özellikle Britanya'da. Oradaki bilim erkânı Newton'un herhangi bir fikrine muhalefeti neredeyse dine küfür sayıyordu, bu muhalefetin yurtseverlikle bağdaşmadığı ise kesindi. Newton daha 1727'de ölmüştü, yani ölümünün üzerinden çok zaman geçmemişti ve 1705'te –Young'ın keşiflerini açıklamasından hemen hemen yüz yıl önce– bilimsel eserlerinden dolayı şövalye unvanı alan ilk kişi olmuştu.



Şekil 1.6 Üzerine çift yarık açılmış perdedeki her bir delikten ilerleyen dairesel dalgalar son perdede bir ışıklı bir gölgeli desen oluşturacak şekilde girişim yaparlar – bu deneye göre, ışığın dalga gibi davrandığının açık kanıtıdır bu.

İngiltere'de bu putun tahttan inmesi için henüz fazla erkendi, bu yüzden tam da Napolyon savaşları sırasında "yurtseverlikle bağdaşmayan" bu fikri ele alıp nihayet ışığın dalga açıklamasını gerçekleştiren kişinin Augustin Fresnel adında bir Fransız olması gayet manidardı belki de. Fresnel'in çalışması, Young'ınkinden birkaç yıl sonra olsa da, ışığın neredeyse bütün yönlerini dalga olarak açıklayan daha olgun bir çalışmaydı. Bir kere, bugün hepimize aşina gelen bir fenomeni, ince bir yağ tabakasına vuran ışığın rengârenk güzel yansımalar üretmesini açıklıyordu. Bu sürece yine dalgaların girişimi sebep olur. Işığın bir kısmı ince yağ tabakasının üstünden yansır, fakat bir kısmı da içeri girip tabakanın alt yüzeyinden geri yansır. Böylece yansıyan iki farklı ışık demeti oluşur ve bunlar da birbirleriyle girişimde bulunur. Işığın her rengi farklı bir dalga boyuna karşılık geldiği için, beyaz ışığın da gökkuşağının bütün renklerinin üst üste binmesiyle oluşmasından dolayı, gözünüzün tabakaya göre bulunduğu yere bağlı olarak bazı dalgalar (renkler) yıkıcı, bazıları yapıcı girişimde bulunacak ve beyaz ışığın yağ tabakasından yansıması bir renk kümesi yaratacaktır.

Adını taşıyan sarkacıyla tanınan fizikçi Léon Foucault on dokuzuncu yüzyılın ortalarında Newton'un tanecik kuramının öngörülerinin aksine ışığın hızının havadakine göre suda daha az olduğunu tespit etti. Bu zaten her saygın bilim adamının beklediği şeydi. O zamana gelindiğinde, ışığın esir (o da artık neydiyse) içinde yayılan bir tür dalga hareketi olduğunu "herkes biliyordu". Ama yine de bir ışık demetinde "dalgalanan" şeyin tam olarak ne olduğunu bilmek hoş olacaktı. 1860'larda ve 1870'lerde büyük İskoç fizikçi James Clerk Maxwell değişen elektriksel ve manyetik alanlar içeren dalgaların varlığını ispat edince ışık kuramı en sonunda tamamlanmışa benziyordu. Bu elektromanyetik ışımanın, tıpkı su dalgalarında oluşan tepe noktaları ve çukurlar gibi daha güçlü ve daha zayıf elektriksel ve manyetik alanlar içeren bir örüntüsü olduğu Maxwell tarafından öngörülmüştü. 1887'de –yani topu topu yüz yıl önce– Heinrich Hertz radyo dalgaları şeklinde elektromanyetik ışıması gönderip almayı başardı. Radyo dalgaları ışık dalgalarına benzer, yalnız dalga boyları çok daha uzundur. En sonunda ışığın dalga ku-

ramı tamamlanmıştı – ama daha tamamlanır tamamlanmaz Newton ve Galileo'dan sonra bilimsel düşüncede yaşanan en büyük devrimle altüst edilecekti. On dokuzuncu yüzyılın sonuna gelindiğinde ışığın tanecik olduğunu ancak bir deli ya da dâhi ileri sürerdi. Bu kişinin adı Albert Einstein'dı; fakat onun bu cüretli adımı neden attığını anlayabilmemiz için önce on dokuzuncu yüzyıl fiziğindeki fikirlerle ilgili biraz daha arka plan bilgisine ihtiyacımız var.

İkinci Bölüm

Atomlar

Birçok popüler bilim tarihi anlatısı atom fikrinin ta eski Yunanlılara, yani bilimin doğduğu zamana kadar dayandığını söyler ve sonra da maddenin gerçek yapısını çok önceden algıladıkları için bu insanları över. Fakat bu anlatı bir parça abartılıdır. İ.Ö. 370'e yakın bir zamanda ölen Abdera'lı Demokritos'un, dünyanın karmaşık yapısının ancak bütün her şeyin farklı, değiştirilemez, her biri kendine özgü biçim ve büyüklükte ve sürekli hareket halinde olan atomlardan meydana gelmiş olması durumunda açıklanabileceğini ileri sürdüğü doğrudur. Demokritos "var olan tek şey atomlar ve boşluktur; gerisi insanların kanaatinden ibarettir," diye yazmış,[2] daha sonra Samos'lu Epiküros ile Romalı Lucretius Carus da bu fikri benimsemiştir. Fakat o günlerde dünyanın yapısını açıklayan kuramlar arasında başı çeken kuram bu değildi. Aristoteles'in, evrendeki her şeyin dört "element"ten, ateş, toprak, hava ve sudan meydana geldiği iddiası çok daha fazla tutulmuş ve çok daha uzun ömürlü olmuştu. İsa'nın yaşadığı yıllara gelindiğinde atom fikri büyük ölçüde unutulup gitmişken Aristoteles'in dört elementi iki bin yıl kabul görmüştür.

İngiliz Robert Boyle on yedinci yüzyılda atom kavramını kimyayla ilgili çalışmalarında kullanmış, Newton da fizik ve optikle ilgili çalışmalarında bu kavramı hep göz önünde bulundurmuş olsa da, atom ancak on sekizinci yüzyılın ikinci yarısında Fransız kim-

2. Aktaran Jay M. Pasachoff & Marc L. Kutner, *Invitation to Physics*, s. 3. Daha pek çok kitapta da alıntılanmıştır.

yager Antoine Lavoisier'nin yanma olayını araştırmasıyla bilimsel düşüncenin gerçekten bir parçası haline gelmiştir. Lavoisier pek çok gerçek elementi, yani başka kimyasal maddelere ayrışmayan saf kimyasal maddeleri tespit etmiş ve yanmanın havadaki oksijenin başka elementlerle birleşmesinden meydana gelen bir süreçten ibaret olduğunun farkına varmıştır. On dokuzuncu yüzyılın ilk yıllarında John Dalton atomların kimyadaki rolünü sağlam bir zemine oturtmuştur. Maddenin atomlardan oluştuğunu, bunların da bölünmez olduğunu bildirmiştir; bir elementin bütün atomlarının özdeş olduğunu, fakat farklı elementlerin farklı türden (farklı büyüklük ya da şekillerdeki) atomlardan oluştuğunu; atomların ne yoktan var edilebileceğini ne de yok edilebileceğini, sadece kimyasal tepkimelerle yeniden düzenlenebileceğini; iki ya da daha fazla elementin oluşturduğu kimyasal bir bileşiğin moleküllerden meydana geldiğini, bu moleküllerin her birinin de bileşikteki her bir elemente ait küçük, sabit sayıdaki atoma sahip olduğunu söylemiştir. Demek ki bugün ders kitaplarında okutulduğu haliyle atoma dayalı maddi dünya görüşü ancak iki yüzyıldan daha az bir süre önce gerçekten vücuda gelmiştir.

ON DOKUZUNCU YÜZYIL ATOMLARI

Yine de bu fikir on dokuzuncu yüzyıl kimyagerleri arasında ancak yavaş yavaş benimsendi. Joseph Gay-Lussac iki gazın birbiriyle daima sabit oranda tepkimeye girdiğini deneyle kanıtladı. Eğer ortaya çıkan bileşik de gazsa bu üçüncü gazın hacmi de diğer ikisiyle sabit orandadır. Bu, bileşikteki her bir molekülün, bir gazın bir ya da iki atomunun başka bir gazın birkaç atomuyla birleşmesinden oluştuğu fikriyle örtüşüyor. İtalyan Amadeo Avogadro 1811'de bu kanıtı kullanarak o ünlü hipotezini ortaya atıyordu. Buna göre, gazın kimyasal yapısı ne olursa olsun, aynı sıcaklık ve basınç koşullarında eşit hacimli bütün gazlar aynı sayıda molekül içerirler. Daha sonra yapılan deneyler Avogadro hipotezinin doğruluğunu kanıtlamıştır; 0°C'deki ve bir atmosfer basıncındaki her bir litrelik gaz

yaklaşık 27 000 milyar kere milyar (27×10^{21}) molekül içerir. Fakat kimyagerlerin büyük çoğunluğu bu fikri ancak Avogadro'nun yurttaşı Stanislao Cannizzaro tarafından 1850'lerde geliştirildiği zaman ciddiye almaya başlamıştır. Ne var ki, 1890'lara kadar bile Dalton ve Avogadro'nun fikirlerini hâlâ kabul etmeyen pek çok kimyager vardı. Fakat o zamana gelindiğinde fizikteki gelişmeler öne geçmiş, gazların davranışı İskoçyalı James Clerk Maxwell ve Avusturyalı Ludwig Boltzmann tarafından atom kavramı kullanılarak ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştı.

1860'larda ve 1870'lerde bu öncüler gazların pek çok atom ya da molekülden meydana geldiği fikrini geliştirdiler (Avogadro hipotezinden elde edilen sayı bunların kaç tane olduğu hakkında size bir fikir verecektir). Bunlar hoplayıp zıplayan, birbirleriyle çarpışan, gazı içinde bulunduran kabın çeperlerine çarpan minik, katı küreler olarak düşünülebilir. Bu, ısının bir tür hareket olduğu fikriyle doğrudan ilintiliydi – gazlar ısıtılınca moleküller daha hızlı hareket eder, bu da kabın çeperlerindeki basıncı artırır ve eğer çeperler yerlerine sabitlenmemişse gaz genişler. Bu yeni fikirlerin kilit noktası gazların davranışının, mekanik yasalarının –Newton yasalarının– istatistiksel anlamda çok büyük sayıdaki atom ya da moleküllere uygulanarak açıklanabilmesiydi. Gazın içindeki herhangi bir molekül, herhangi bir zamanda herhangi bir yöne doğru hareket ediyor olabilir, fakat pek çok molekülün kabın çeperlerine her saniye çarpması sabit bir basınç yaratır. Bu da gaz hareketlerinin matematiksel olarak tarif edilmesini sağladı, bu tarife istatistiksel mekanik adı veriliyordu. Fakat yine de atomların var olduğunun doğrudan bir kanıtı yoktu; zamanın bazı önde gelen fizikçileri atom hipotezine şiddetle karşı çıkıyordu ve 1890'larda bile Boltzmann kendisini (belki de yanlış yere) bilimsel görüşün [illegible]tığı yöne karşı kürek çekme mücadelesi veren bir birey olarak görüyordu. "Gaz kuramı tekrar canlanınca yeniden keşfedilecek pek bir şey kalmayacak" umuduyla 1898'de ayrıntılı hesaplamalarını yayımladı;[3] 1906'da hasta ve canı

3. Aktaran Jagdish Mehra ve Helmut Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory*, cilt 1, s. 16.

sıkkınken, gazlar hakkındaki bu kinetik kurama pek çok önde gelen bilim adamının sürekli karşı çıkmasından rahatsız olup kendini öldürdü, birkaç hafta önce Albert Einstein diye adı sanı bilinmeyen bir kuramcının atomların gerçekliğini şüpheye yer bırakmayacak şekilde kanıtlayan bir yazı yayımladığından habersizdi.

EINSTEIN'IN ATOMLARI

Bu makale Einstein'ın 1905'te *Annalen der Physik*'in aynı cildinde yayımlanan üç makalesinden sadece biriydi. Bu makalelerin her biri Einstein'ın bilim tarihine geçmesini sağlayacak nitelikteydi. Makalelerden biri özel görelilik kuramını tanıttığı için bu kitabın kapsamı dışında kalıyor büyük ölçüde; bir diğeri ışığın elektronlarla etkileşimiyle ilgiliydi ve daha sonra bugün kuantum mekaniği dediğimiz şeyi ele alan ilk bilimsel çalışma olarak kabul edildi – Einstein 1921'de Nobel Ödülü'nü bu çalışmadan dolayı aldı. Üçüncü yazı 1827'den beri bilim adamlarını şaşkına çevirmiş olan bir muammanın aldatıcı denecek ölçüde basit bir açıklamasıydı – atomların gerçekliğini kanıtlayan bir açıklama, tabii bir kuramsal makaleyle ne kadar yapılabilirse.

Einstein daha sonra o sıradaki asıl amacının "sonlu sayıda atomların varlığını mümkün olduğunca garantileyecek gerçekleri bulmak"[4] olduğunu söylemişti; bu amaç da, içinde bulunduğumuz çağın başında bu çalışmanın ne kadar önemli olduğunu gösteriyordu. Bu makalelerin basıldığı sırada Einstein Bern'de patent memuru olarak çalışıyordu – fiziğe alışılmadık yaklaşımı formel eğitimini bitirdiğinde ona hemen akademik bir mevki sağlamamıştı ve patent bürosu tam ona göreydi. Mantığa dayalı işleyen kafası yeni icatların hangilerinin işe yarayabileceğini belirlemekte, sapı samandan ayırmakta gayet başarılıydı ve işteki becerisi sayesinde mesai saatlerinde bile fizik düşünecek kadar bol boş vakit buluyordu. Düşün-

4. Einstein'ın "Otobiyografik Notları"ndan aktaran P.A. Schilpp (y.h.), *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, Tudor, New York, 1949, s. 47.

celerinin bir kısmı yaklaşık seksen yıl öncesindeki Britanyalı botanikçi Thomas Brown'un yaptığı keşiflerle ilgiliydi. Brown, bir su damlası içinde yüzen bir polen taneciğinin mikroskopla incelendiği zaman, rasgele bir biçimde hareket ederek (buna artık Brown hareketi denmektedir) düzensiz bir şekilde sağa sola çarpıp durduğunun görüldüğünü fark etmişti. Einstein bu hareketin rasgele olmasına rağmen belli bir istatistik yasasına uyduğunu, polen taneciğinin Boltzmann ve Maxwell'in gazlardaki ya da sıvılardaki atomların hareket tarzını açıklamak için kullandıkları istatistiklere uygun hareket eden, mikroskop-altı görünmeyen parçacıklarca sürekli "tekmeleniyor" olması halinde tam da bu şekilde hareket edeceğini göstermiştir. Bugün bunlar o kadar bariz görünüyor ki bu makalenin nasıl çığır açtığını takdir etmek zor. Siz de ben de, atom fikrine alışık olduğumuz için, eğer polen tanecikleri görünmeyen çarpışmalarla itilip kakılıyorsa o zaman bunu yapanın hareket eden atomlar olması gerektiğini hemen anlarız. Fakat Einstein bunu açıklamadan önce saygın bilim adamları atomların gerçekliğinden hâlâ şüphe edebiliyordu; bu makale yayımlandıktan sonra artık şüpheye yer kalmamıştı. Açıklanınca kolay elbette, tıpkı ağaçtan bir elmanın düşmesi gibi, fakat madem o kadar barizdi o zaman önceki seksen yıl boyunca neden akla gelmemişti?

Bu bilimsel makalenin Almanca yayımlanmış olması ironiktir (*Annalen der Physik* dergisinde), çünkü görünüşe göre Boltzmann'ı ümitsiz bir yalnızlık içinde olduğuna inandırmış olan şey, Ernst Mach ve Wilhelm Ostwald gibi önde gelen Almanca konuşan bilim adamlarının karşı çıkışlarıydı. Aslında yirminci yüzyılın başlarına gelindiğinde atomların gerçekliğine dair çok miktarda kanıt vardı, doğruyu söylemek gerekirse, ikinci dereceden kanıtlardı bunlar gerçi; Britanyalı ve Fransız fizikçiler atom kuramına Alman meslektaşlarının çoğundan daha büyük bir inançla onay vermişlerdi, 1897'de –bugün atomun parçalarından biri olduğunu bildiğimiz– elektronu keşfeden de J. J. Thomson adında bir İngiliz olmuştu.

ELEKTRONLAR

On dokuzuncu yüzyılın sonlarında havası boşaltılmış bir tüpün içinden elektrik akımı taşıyan bir telin yaydığı ışımanın yapısıyla ilgili olarak uzun bir tartışma olmuştu. Katot ışınları denilen bu ışınlar esirin titreşimlerinin yarattığı, ışıktan ve yeni keşfedilmiş radyo dalgalarından farklı özellikte bir tür ışıma olabilirdi ya da minik parçacıkların bir akışı olabilirdi. Alman bilim adamlarının çoğu esir dalgası fikrini benimsedi; Britanyalı ve Fransız bilim adamlarının çoğu katot ışınlarının parçacıklardan oluştuğunu düşünüyordu. Durum Wilhelm Röntgen'in 1895'te kazara X ışınlarını keşfetmesiyle iyice karıştı (Röntgen 1901'de bu buluşuyla Fizik alanındaki ilk Nobel Ödülü'nü aldı), fakat daha sonraları bunun dikkatleri yanlış yönlere çektiği anlaşılacaktı. Keşif önemliydi önemli olmasına ancak bir anlamda fazla erken, X ışınlarının oturacağı kuramsal bir atom fiziği çerçevesi henüz ortada yokken yapılmıştı. Hikâyemiz ilerledikçe bu ışınlarla daha uygun bir bağlamda yine karşılaşacağız.

Thomson, Cavendish Laboratuvarı'nda çalışıyordu, burası Maxwell'in 1870'lerde ilk Cavendish Fizik Profesörü sıfatıyla Cambridge'de kurduğu bir araştırma merkeziydi. Thomson hareket eden elektrik yüklü bir parçacığın elektriksel ve manyetik özelliklerini dengelemeye dayalı bir deney tasarladı.[5] Böyle bir parçacık hem manyetik alanlar hem de elektrik alanları tarafından izlediği yoldan saptırılabilirdi ve Thomson'un aygıtı bu iki etkinin birbirini iptal edip geriye negatif yüklü bir metal levhadan (yani katottan) dosdoğru algılayıcı perdeye akan bir katot ışını demeti bırakacağı biçimde tasarlanmıştı. Bu numara sadece elektrik yüklü parçacıklarda işe yarar; böylece Thomson katot ışınlarının aslında negatif yük-

5. "Tasarladı" burada doğru bir ifade. J. J. Thomson sakarlığıyla meşhur olduğundan planladığı harika deneyleri başka insanlar yürütmüştür; oğlu George'un, J. J. (hep böyle anılırdı) "bir aygıtın hatalarını şaşırtıcı bir katilikle teşhis edebilmesine rağmen hiç dokunmasa daha iyi olurdu" dediği rivayet edilir (bkz. Barbara Lovett Cline, *The Questioners*, s. 13).

lü parçacıklar (artık bunlara elektron deniyor[6]) olduğunu tespit edip, elektriksel ve manyetik kuvvetler dengesini kullanarak bir elektronun elektrik yükünün, kütlesine oranını (e/m) bulmayı başardı. Katot hangi metalden yapılmış olursa olsun her seferinde aynı sonucu buldu ve vardığı sonuca göre elektronlar atomların bir parçasıydı ve her ne kadar farklı elementler farklı atomlardan meydana gelmiş olsa da bütün atomlar özdeş elektronlar içeriyordu.

Bu X ışınları gibi öyle hesapta olmayan bir keşif değil, özenli tasarımların ve ustaca kotarılmış deneylerin sonucuydu. Cavendish Laboratuvarı'nı Maxwell yaratmıştı, ama burayı yirminci yüzyılda yeni bir fizik anlayışına yol açan keşiflerin yapıldığı önde gelen bir deneysel fizik merkezi –belki de dünyanın *en* önde gelen fizik laboratuvarı– haline Thomson getirmişti. Kendisinin yanı sıra Cavendish'de Thomson'un yönetiminde çalışan yedi kişi daha 1914'ten önceki dönemde Nobel kazanmıştır. Burası bugün de dünya fiziğinin merkezi olarak varlığını sürdürüyor.

İYONLAR

Havası boşaltılmış bir tüpün içindeki negatif yüklü levhanın ürettiği katot ışınlarının, negatif yüklü parçacıklar olan elektronlar olduğu ortaya çıktı. Fakat atomların elektrik yükü yoktur, o zaman mantıken elektronların pozitif yüklü karşılıkları olması gerekir, yani kendilerinden negatif yüklü bir parçanın koparıldığı atomlar. Würzburg Üniversitesi'nden Wilhelm Wien 1898'de bu pozitif ışınların bir kısmını ilk kez inceledi ve bunları oluşturan parçacıkların elektronlardan çok daha ağır olduğunu tespit etti, ki eğer bunlar zaten bir elektronu eksik atomlardan ibaretse bunda şaşılacak bir şey yoktu. Thomson, katot ışınları çalışmasını takiben meşakkatli bir işe girişerek 1920'lere kadar uzanan bir dizi zor deneyle bu pozitif ışınları

6. Seyrettiğiniz televizyonun ekranı katot ışını tüpü denilen tıpkı böyle bir tüpün parçasını oluşturur; televizyon görüntüsünü resmeden katot ışınları, tıpkı Thomson'un inceledikleri gibi, değişen manyetik alanlarla ekrana doğru savrulan elektronlardır.

araştırmaya koyuldu. Bugün bu ışınlara iyonlaşmış atom, ya da kısaca "iyon" deniyor; Thomson'un zamanında kanal ışınları deniyordu. O bu ışınları vakum pompasının ardından az bir gazın bırakıldığı biraz değiştirilmiş bir katot tüpü kullanarak inceledi. Bu gaz içinde hareket eden elektronlar bu gazın atomlarıyla çarpışıyorlar ve onlardan başka elektronlar koparıp geriye pozitif yüklü iyonlar bırakıyorlardı. Bunlar da Thomson'un elektronlara yaptığı gibi elektrik ve manyetik alanlarla istenilen yöne çekilebilirdi. 1913'e gelindiğinde Thomson'un ekibi hidrojen, oksijen ve diğer gazların pozitif iyonlarının sapmalarını ölçüyorlardı. Thomson'un bu deneylerde kullandığı gazlardan biri neondu; havası alınmış tüpte içinden elektrik akımı geçen az miktarda neon parlak bir şekilde ışır, Thomson'un aygıtı modern neon lambanın atasıdır. Ne var ki, onun keşfettiği şey bir tür ışıklı reklam tabelasından çok daha önemli bir şeydi.

Elektronların hepsinin aynı e/m değerine sahip olmasına rağmen, üç farklı neon iyonunun olduğu çıkıyor ortaya. Bunların hepsinin elektronla aynı miktarda elektrik yükü var (fakat $-e$ yerine $+e$), kütleleriyse farklı. Kimyasal elementlerin çoğunlukla kimyasal özellikleri özdeş fakat kütleleri farklı (atom ağırlıkları farklı) atomlar içerdiğinin ilk kanıtıydı bu. Element teması üzerindeki bu çeşitlemelere şimdi "izotop" deniyor, fakat varlıklarının açıklanması çok uzun zaman aldı. Thomson'un elinde artık yeterince bilgi vardı, atomun içinin nasıl bir şey olduğunu açıklamak için ilk teşebbüsünü yaptı – atom, birkaç Yunanlı filozofun sandığı gibi bölünmez nihai bir parçacık değil, elektronların koparılıp alınabileceği pozitif ve negatif yüklerin bir karışımıydı.

Thomson atomu karpuz gibi bir şey olarak hayal ediyordu, bütün pozitif yükler büyükçe bir kürenin içini kaplamıştı, elektronlar da kürenin içine tohum gibi serpilmiş, her biri kendi negatif yükçüğünü taşıyordu. Sonunda yanıldığı anlaşıldı, ama bilim adamlarına atış yapacakları bir hedef vermişti, onların atış talimi de atom yapısının daha doğru anlaşılmasını sağladı. Bunun nasıl olduğunu anlamak için bilim tarihinde önce bir adım geriye, sonra da iki adım ileriye gitmemiz gerek.

X IŞINLARI

Atomun yapısındaki sırrın anahtarının, 1896'da radyoaktifliğin keşfi olduğu sonradan anlaşıldı. Birkaç ay öncesinde X ışınlarının keşfedilmesi gibi bu da büyük ölçüde hoş bir tesadüftü, gerçi her iki örnekte de, o sıralar bu türden hoş tesadüflerin fizik laboratuvarlarının birinde meydana gelmesi kaçınılmazdı. Wilhelm Röntgen, 1890'lardaki pek çok fizikçi gibi, katot ışınlarıyla deneyler yapıyordu. Bu ışınlar –elektronlar– bir nesneye çarpınca bu çarpışma ikinci bir ışımaya yol açar. Bu ışıma gözle görülemez, sadece fotoğraf plakası ya da filmi üzerine ya da ışıma vurduğunda ışık kıvılcımı üreten floresan perde adındaki bir aygıtın üzerine düştüğünde etkileri tespit edilebilir. Röntgen'in katot ışını deney düzeneğinin yanındaki bir masanın üzerinde tesadüfen bir floresan perdesi duruyordu, katot ışını deneyindeki deşarj tüpü çalışırken bu perdenin ışık verdiğini fark etmekte gecikmedi. Bu sayede ikinci ışımayı keşfetti ve buna "X" adını verdi çünkü x geleneksel olarak bir matematik denklemindeki bilinmeyen niceliktir. X ışınlarının çok geçmeden dalga gibi davrandığı gösterildi (bugün bu ışınların ışık dalgalarına çok benzeyen ama çok daha kısa dalga boyu olan bir elektromanyetik ışıma biçimi olduğunu biliyoruz), bir Alman laboratuvarında yapılan bu keşif çoğu Alman bilim adamının benimsediği, katot ışınlarının da dalga olması gerektiği görüşünü doğrulamaya yardımcı oldu.

X ışınlarının keşfi Aralık 1895'te duyuruldu ve bilim camiasını birbirine kattı. Başka araştırmacılar X ışını ya da benzer ışıma biçimleri üretmenin başka yollarını bulmaya çalıştılar ve bunu ilk başaran Paris'te çalışan Henri Becquerel oldu. X ışımasının en şaşırtıcı özelliği siyah kâğıt gibi pek çok mat cisimden engellenmeden geçerek ışık görmemiş fotoğraf plakası üzerine bir resim çizebilmesiydi. Becquerel, daha önce ışık soğurmuş bir cismin ışık yayımı demek olan "fosforışı"yla [*phosphorescence*] ilgileniyordu. X ışınlarının keşfinde rol almış olan ekran gibi bir floresan ekran, ancak gelen ışımayla "uyarılınca" ışık yayar; fosforışı yayan bir cismin

gelen ışımayı depolayıp bunu, karanlığa bırakıldıktan saatler sonra da yavaş yavaş şiddeti azalacak biçimde ışık olarak salma yeteneği vardır. Fosforışıyla X ışıması arasında bir ilişki aramak doğaldı, fakat Becquerel'in keşfettiği şey X ışınlarının keşfi kadar beklenmedik olmuştu.

RADYOAKTİFLİK

Becquerel Şubat 1896'da iki kat siyah kâğıdın içine bir fotoğraf plakası sardı, kâğıdı uranyum ve potasyum bisülfatla kapladı ve bu tomarı saatlerce güneşe bıraktı. Plaka tabedilince kimyasal madde kaplamasının dış hatlarını gösterdi. Becquerel kaplamada –uranyum tuzu– güneşin tıpkı fosforışıda olduğu gibi X ışıması ürettiğini düşündü. İki gün sonra deneyi tekrarlamak için aynı şekilde bir plaka daha hazırladı, fakat o gün de, ertesi gün de hava bulutluydu ve hazırlanan plaka bir dolapta kapalı kaldı. 1 Mart'ta Becquerel o plakayı yine de tabetti ve yine uranyum tuzunun dış hatlarını buldu. İki plakayı karartan her ne idiyse güneş ışığıyla ya da fosforışıyla bir ilgisi yoktu, bunun daha önce bilinmeyen bir ışıma olduğu çıktı ortaya, hiçbir dış etki olmadan kendiliğinden uranyumdan geliyordu. Bu kendiliğinden ışıma yayma yeteneğine şimdi radyoaktiflik deniyor.

Becquerel'in buluşuyla alarma geçen başka bilim adamları radyoaktifliği araştırma işine giriştiler ve Sorbonne'da çalışmakta olan Marie ve Pierre Curie çok geçmeden bu yeni bilim dalının uzmanı oldular. Radyoaktiflik üzerine yaptıkları çalışmalar ve yeni radyoaktif elementler keşfetmelerinden dolayı 1903'te Nobel Ödülü'ne layık görüldüler; 1911'de Marie radyoaktif maddeyle yaptığı sonraki çalışmasından dolayı kimya alanında ikinci bir Nobel Ödülü daha aldı (Marie ve Pierre Curie'nin kızı Irene de 1930'larda radyoaktiflik üzerine yaptığı çalışmadan Nobel Ödülü aldı). 1900'lerin başlarında radyoaktiflikteki deneysel keşifler kuramın çok ötelerine gitmişti, çağlayan gibi akan yeni gelişmeler ancak daha sonraları kuramsal çerçevenin içine dahil edilebildi. Bütün bu dönem boyun-

ca radyoaktiflik araştırmalarında bir isim öne çıkıyordu: Ernest Rutherford.

Rutherford 1890'larda Cavendish'de Thomson'la çalışmış Yeni Zelandalı biriydi. 1898'de Montreal'deki McGill Üniversitesi'ne Fizik Profesörü olarak atandı. Burada 1902'de Frederick Soddy'yle birlikte radyoaktiflikte, radyoaktif elementin başka bir elemente dönüşmesinin söz konusu olduğunu gösterdiler. Şimdiki adıyla bu radyoaktif "bozunma"nın iki tür farklı ışıma ürettiğini Rutherford buldu ve bunlara alfa ve beta ışımaları adını verdi. Daha sonra üçüncü bir tür ışıma daha bulununca artık ona da gama ışıması demek gayet doğaldı. Hem alfa hem de beta ışımasının hızlı hareket eden parçacıklar olduğu çıktı ortaya; çok geçmeden beta ışınlarının elektronlardan, katot ışınlarının radyoaktif eşdeğerinden ibaret olduğu gösterildi; zamanla gama ışınlarının da X ışınları gibi, ancak onlardan bile daha kısa dalga boyu olan başka bir elektromanyetik ışıma biçimi olduğu gösterildi. Ne var ki, alfa parçacıklarının tümden farklı olduğu anlaşıldı – hidrojen atomunun yaklaşık dört katı büyüklüğünde kütlesi, elektron yükünün iki katı büyüklüğünde ama negatif yerine pozitif elektrik yükü olan parçacıklardı bunlar.

ATOMUN İÇİ

Alfa parçacığının ne olduğunu ya da nasıl bir atomdan çok büyük bir hızla fırlatılıp bu süreçte başka bir elementin atomuna dönüştüğünü daha kimse tam bilmezken, Rutherford gibi araştırmacılar onlardan yararlanabiliyordu. Kendileri de atom tepkimelerinin ürünü olan böyle yüksek enerjili parçacıklar, atomların yapısını incelemek ve tuhaf bir bilimsel araştırma döngüsü içinde alfa parçacıklarının kendilerinin de nereden gelmiş olduklarını bulmak için kullanılabilirdi. Rutherford 1907'de Montreal'den ayrılıp İngiltere'deki Manchester Üniversitesi'nde Fizik Profesörü oldu; 1908'de radyoaktiflik üzerine yaptığı çalışmalardan dolayı Nobel Kimya Ödülü'nü aldı, bu ödül ona buruk bir sevinç yaşattı. Elementlerin incelenmesini Nobel Komitesi kimya olarak görse de, Rutherford kendini fizikçi

olarak görüyordu ve kimyaya ayıracak zamanı da pek yoktu, ayrıca kimyaya bilimin çok aşağı bir dalı olarak bakıyordu. (Tabii kuantum fiziği sayesinde atomların ve moleküllerin yeni kavranışıyla birlikte fizikçilerin öteden beri yarı şaka yarı ciddi söyledikleri "kimya sadece fiziğin dallarından biridir" sözündeki gerçek payı daha da arttı.) 1909'da Manchester'da Rutherford'un bölümünde çalışan Hans Geiger ve Ernest Marsden bir alfa parçacığı demetini ince metal bir folyoya yönlendirip içinden geçirdikleri deneyler yaptılar. Alfa parçacıkları doğal olarak radyoaktif olan atomlardan geliyordu – o günlerde yapay parçacık hızlandırıcıları yoktu. Metal folyoya yönlendirilen parçacıkların kaderi sintilasyon sayaçlarıyla belirlenmişti, bunlar böyle parçacıklar çarptığında kıvılcım çakan floresan ekranlardı. Parçacıkların bazısı dosdoğru metal folyonun içinden geçip gitti; bazısı sapıp gönderilen demetten açı yaparak çıktı; bazısı da deneycileri şaşırtacak şekilde folyoya çarpıp geri sekti. Bu nasıl olabilirdi?

Rutherford cevabı buldu. Her alfa parçacığının bir elektronunkinden 7000 kat fazla kütlesi vardır (aslında bir alfa parçacığı iki elektronu alınmış bir helyum atomuyla özdeştir) ve ışık hızına yakın hareket edebilir. Eğer böyle bir parçacık bir elektronla çarpışırsa, elektronu kenara itip etkilenmeden yoluna devam eder. Saptırmaların metal folyodaki atomların pozitif yükleri tarafından yapılmış olması gerekir (manyetik kutuplarda olduğu gibi aynı yükler birbirlerini iter), fakat Thomson'un karpuz modeli doğru olsaydı parçacıkların hiçbiri geri sekmezdi. Pozitif yük küresi atomu doldurmuş olsaydı, o zaman alfa parçacığın onun içinden geçip gitmesi gerekirdi, çünkü deney, parçacıkların çoğunun dosdoğru folyodan geçip gittiğini gösteriyordu. Eğer karpuz bir parçacığı geçirdiyse, hepsini geçirmesi gerekir. Fakat bütün pozitif yükler bütün atomun hacminden çok daha küçük, minik bir hacim içinde yoğunlaşmış olsaydı, o zaman sadece arada bir bu minik kütle ve yük yoğunluğuna bodoslamadan vuran bir alfa parçacığı geri sekerdi, alfa parçacıkların çoğu da atomların pozitif yüklü kısımları arasındaki boşluklardan geçip giderdi. Sadece böyle bir düzen içinde atomun pozitif yükü pozitif yüklü alfa parçacıklarını tekrar geldikleri yöne ite-

bilir, bazen de yollarından hafifçe saptırabilir, bazen de neredeyse hiç dokunmadan bırakabilirdi.

Böylece Rutherford 1911'de yeni bir atom modeli önerdi, bu model bugünkü modern atom yapısı anlayışımızın temelini oluşturuyor. Atomun küçük merkezî bir bölgesi olması gerektiğini söyleyip buna çekirdek adını verdi. Çekirdek atomun bütün pozitif yükünü içerir, çekirdeği çevreleyen elektron bulutundaki negatif yük miktarına eşit ve zıt yükte; çekirdek ve elektronlar birlikte elektriksel bakımdan yüksüz atomu oluştururlar. Sonraki deneyler çekirdeğin büyüklüğünün atomun büyüklüğünün sadece yaklaşık yüz binde biri olduğunu gösterdi – 10^{-8} cm çapındaki bir elektron bulutu içine gömülmüş, genelde yaklaşık 10^{-13} cm çapındaki bir çekirdek. Bu rakamları gözünüzde canlandırabilmek için St. Paul Katedrali'nin merkezinde bir iğne başını düşünün, çapı bir milimetre olsun, ta katedralin kubbesinde de, 100 metre uzakta diyelim, mikroskobik toz zerrecikleri bulutu olsun. İğne başı atom çekirdeğine karşılık gelir; toz zerrecikleri de onun elektron maiyetine. İşte bu, atomda ne kadar çok boş alanın olduğunu gösterir – maddi dünyada katı cisim gibi görünen her şey elektrik yüküyle bir arada tutulan bu boşluklardan yapılmıştır. Hatırlarsanız Rutherford bu yeni atom modeliyle (tasarladığı deneylere dayanan bir modeldi bu) ortaya çıkınca zaten bir Nobel Ödülü kazanmıştı. Fakat kariyeri daha bitmiş sayılmazdı, zira 1919'da ilk yapay element transmutasyonunu gerçekleştirdiğini ilan etti ve aynı yıl J. J. Thomson'un ardından Cavendish Laboratuvarı'nın başkanı oldu. Önce şövalye unvanı kazandı (1914), sonra da 1931'de Baron Rutherford of Nelson oldu. Bütün bunlara rağmen, Nobel Ödülü de dahil olmak üzere, bilime en büyük katkısı hiç kuşkusuz atomun çekirdek modeliydi. Bu model fiziği dönüştürecekti, bunu yaparken de bariz bir soru çıkarıyordu ortaya – zıt yükler, benzer yüklerin birbirini ittiği aynı kuvvetle birbirini çektiğine göre, negatif olan elektronlar neden pozitif çekirdeğe düşmüyordu? Cevap, atomların ışıkla etkileşiminin bir analiziyle verildi ve bu da kuantum kuramının ilk versiyonunun rüşdünü ispatlamasına karşılık geliyordu.

Dördüncü Bölüm

Işık ve Atomlar

Rutherford atom modelinin ortaya koyduğu bilmece, hareket halindeyken hızlandırılan elektrik yükünün, elektromanyetik ışıma –ışık, radyo dalgaları ya da aynı temanın çeşitlemeleri– şeklinde enerji yaydığı olgusuna dayanıyordu. Eğer elektron atom çekirdeğinin dışında oturup duruyorduysa, çekirdeğe düşmesi gerekirdi, o zaman da atom kararlı olmazdı. Atom çökerken bir enerji patlaması yaratırdı. Atomun bu çöküş eğilimini engelleyecek ilk akla gelen çözüm elektronların çekirdeğin etrafında döndüklerini düşünmekti, tıpkı güneş sistemimizdeki gezegenlerin güneşin etrafında dönmeleri gibi. Fakat yörüngesel hareket sürekli ivmeyi gerektirir. Yörüngede dönen parçacığın sürati değişemez, fakat hareket ettiği yön değişebilir, sürat [*speed*] yönle birlikte hızı [*velocity*] verir ki önemli olan da zaten budur. Yörüngede dönen elektronların hızı değiştikçe enerji yaymaları gerekir, bunun sonucunda da enerji kaybedince sarmal çizerek çekirdeğe doğru gitmeleri gerekir. Kuramcılar yörüngesel hareketi imdada çağırsalar da Rutherford atomunun çöküşünü önleyemiyordu.

Bu model geliştirilince kuramcılar elektronların çekirdeğin etrafında döndüğü tablodan yola çıkıp enerji kaybetmeden ve döne döne içeri gitmeden onları yörüngede tutacakları çareler bulmaya çalıştılar. Güneş sistemiyle bariz benzerliğinden dolayı işe böyle başlamak doğaldı. Fakat yanlıştı. Şimdi göreceğimiz gibi, bu da, elektronları çekirdekten belli bir mesafede yörüngede dönerken değil de boşlukta otururken düşünmekten farksızdı. Sorun aynı –elektronların içeri düşmesi nasıl önlenecek– fakat bunun göz önüne getirdiği

resim güneşin etrafında dönen gezegenlerin resminden çok farklı, ki bu da başlı başına iyi bir şey. Kuramcıların elektronların neden düşmeyeceklerini açıklarken başvurdukları hile, yörünge analojisini kullansak da kullanmasak da aynı, yani bu analoji hem lüzumsuz hem de yanıltıcı. Pek çok insanın okuldan ya da popüler açıklamalardan kafasında canlandırdığı resme göre güneş sistemine benzer bir atom var ve merkezdeki minik çekirdeğin etrafında elektronlar dairesel yörüngelerde vızır vızır dönüp duruyorlar. Ne var ki, bu resmi terk etmenin ve atomun tuhaf dünyasına –kuantum mekaniğinin dünyasına– açık fikirle yaklaşmanın artık zamanı geldi. Çekirdekle elektronları öylece birlikte boşlukta otururken düşünün, pozitif ve negatif yükler arasındaki çekimin neden atomu çökertmediğini ve bunu yaparken de enerji yaymadığını sorun.

Kuramcılar 1910-20 yılları arasında bu bilmeceyle uğraşmaya başladıklarında, onlara gelişmiş bir atom modeli sağlayacak kritik keşifler çoktan yapılmıştı. Bu keşifler maddenin (atomun) ışımayla (ışıkla) etkileşme biçimi üzerine yapılmış çalışmaların ürünüydü.

Yirminci yüzyılın başlarında doğal dünyaya dair en iyi bilimsel görüş ikici bir felsefeyi gerektiriyordu. Maddi nesneler parçacık ya da atom cinsinden tarif edilebilirdi, fakat ışık da dahil elektromanyetik ışıma dalga olarak düşünülmeliydi. Böylece ışık ve maddenin etkileşme biçiminin incelenmesi 1900 yılı civarında fiziği birleştirmek için en iyi fırsatı sunuyor gibiydi. Fakat tam da ışımanın maddeyle nasıl etkileştiği açıklanmaya çalışılırken o zamana kadar neredeyse başka bütün alanlarda çok başarılı olmuş klasik fizik çöktü.

Madde ve ışımanın nasıl etkileştiğini görmenin (mecazi olmayan anlamda görmenin) en basit yolu sıcak bir cisme bakmaktır. Sıcak cisim elektromanyetik enerji yayar ve ne kadar sıcaksa, daha kısa dalgalarda (daha yüksek frekanslarda) o kadar çok enerji yayar. Yani kıpkırmızı olmuş demir çubuk, ısınıp beyazlaşmış demirden daha soğuktur, dahası, görünür ışık yayamayacak kadar soğuk olan demir size hâlâ sıcak gelebilir, çünkü düşük frekanslı kızılötesi ışıma yaymaktadır. On dokuzuncu yüzyılın sonlarında bile elektromanyetik ışımanın minik elektrik yüklerinin hareketiyle bağdaştırılması gerektiği bariz sayılırdı. Elektronun kendisi daha yeni keş-

fedilmişti, ama atomun ileri geri titreşen yüklü bir parçasının (şimdi bunu elektron olarak tanımlıyoruz) elektromanyetik dalga akışı yaratacağını görmek kolaydı. Küvette parmağınızı ileri geri oynatarak su dalgacıkları meydana getirmenizden pek farklı değildi. Buradaki sorun şuydu: En iyi klasik kuramların bileşimi –istatistiksel mekanik ve elektromanyetizma– sıcak cisimlerden geldiği fiilen gözlemlenenden çok farklı bir ışıma biçimi öngörüyordu.

KARA CİSİM İPUCU

Böyle öngörülerde bulunabilmek için kuramcılar her zaman yaptıkları gibi hayali, ideal bir örnek kullandılar, bu sefer söz konusu örnek "kusursuz" bir ışıma soğurucusu ya da yayıcısıydı. Böyle bir cisme genellikle "kara cisim" denir, çünkü üzerine düşen bütün ışımayı soğurur. Ne var ki bu talihsiz bir isimlendirme, çünkü kara cismin de ısı enerjisini elektromanyetik ışımaya çevirme konusunda en etkili olduğu çıktı ortaya – "kara cisim" pekâlâ sıcaktan kıpkırmızı ya da beyaz olabilir ve bazı bakımlardan güneş yüzeyinin kendisi de kara cismi gibi davranır. Gelgelelim, kuramcıların idealleştirilmiş kavramlarının çoğunun tersine, kara cismi laboratuvarda yapmak da mümkündür. Elinize içi boş bir küre ya da iki ucu kapalı bir tüp alın ve yandan küçük bir delik açın. Işık gibi delikten içeri girmiş herhangi bir ışıma içeride kapana kısılmış olarak kalır, soğrulana kadar kabın çeperlerine çarpıp durur; o deliği denk getirip dışarı çıkması pek muhtemel değildir, o yüzden delik aslında bir kara cisimdir. Bu ışımaya Almanların verdiği ad buradan gelir: oyuk ışıması.

Ama biz daha çok, ısıtıldığı zaman kara cisme ne olduğuyla ilgileniyoruz. Demir çubuk örneğinde olduğu gibi önce hafif ısınır, sonra sıcaklığına bağlı olarak kızarır ya da beyazlaşır. Yayılan ışımanın tayfı –her dalga boyunda yayılan miktar– sıcak bir kabın yan yüzeyindeki küçük bir delikten çıkan şeye bakarak laboratuvarda incelenebilir, bu çalışmalar da bunun sadece kara cismin sıcaklığına bağlı olduğunu gösteriyor. Çok kısa dalga boylarında (yüksek frekanslarda) çok az ışıma olur, çok uzun dalgalarda da çok az ışı-

ma olur, enerjinin büyük kısmı orta frekanslarda yayılır. Cisim ısındıkça tayfın tepesi kısa dalga boylarına doğru kayar (kızıl ötesinden, kızıla, maviye, morötesine), fakat çok kısa dalga boylarında daima bir kesilme noktası olur. Kara cisim ışıması ölçümlerinin on dokuzuncu yüzyılda kuramla çatıştığı yer işte burasıdır.

Kulağa tuhaf gelecek belki ama klasik kuramın en iyi öngörüleri, içi ışımayla dolu bir oyuğun en kısa dalga boylarında daima sonsuz miktarda enerjisi olması gerektiğini kabul ediyordu – kara cisim tayfında tepe yapması ve sıfır dalga boyunda sıfır enerjiye düşmesi yerine, ölçümlerin kısa dalga kısmında skaladan fırlaması gerekiyordu. Bu hesaplar görünüşte doğal bir varsayımdan çıkıyordu: Oyuktaki ışımanın elektromanyetik dalgaları, mesela keman telinde olduğu gibi bir tel üzerindeki dalgalar gibi ele alınabilirdi, burada da her büyüklükte dalga olması mümkündü – her dalga boyunda ya da frekansında. Düşünülmesi gereken pek çok dalga boyu (pek çok "titreşim kipi") olduğundan, istatistiksel mekanik yasalarının oyuktaki ışımanın genel görünüşünü tahmin edebilmek için parçacıklar dünyasından dalgalar dünyasına taşınması gerekir, ki bu da bizi dosdoğru, hangi frekansta olursa olsun yayılan enerjinin frekansla orantılı olduğu sonucuna götürür. Frekans dalga boyunun tersidir ve çok kısa dalgalar çok yüksek frekanslardır. Şu halde, her kara cisim ışımasının muazzam miktarda yüksek frekanslı enerji üretmesi gerekir, morötesi ve daha ötesi. Frekans ne kadar yüksekse, enerji o kadar büyüktür. Bu öngörüye "morötesi felaket" denir ve bu öngörünün dayandığı varsayımda bir yanlışlık olduğunu gösterir.

Ama her şey heba olmuş sayılmaz. Kara cisim grafiğindeki düşük frekans cephesinde, yapılan gözlemler Rayleigh-Jeans Yasası diye bilinen klasik kurama dayalı öngörülerle gayet güzel uyuşmaktadır. En azından klasik kuram yarı yarıya doğrudur. Buradaki bilmece, yüksek frekanslardaki salınımların enerjisinin neden çok büyük olmayıp ışımanın frekansı büyüdükçe sıfıra düştüğüdür.

Bu bilmece on dokuzuncu yüzyılın son on yılında pek çok fizikçinin dikkatini çekmiştir. Bunlardan biri de eski gelenekten Alman bilim adamı Max Planck'dı. Titiz ve çalışkan bir insan olan Planck, özünde bir devrimci değildi, bilimsel bakımdan muhafazakârdı.

Özel ilgisi termodinamik üzerineydi ve o sıralardaki en büyük ümidi morötesi felaketi termodinamik ilkelerini uygulayarak çözümlemekti. 1890'ların sonlarında iki yaklaşık denklem vardı, bunlar birlikte kara cisim tayfının kabaca bir resmini veriyordu. Rayleigh-Jeans Yasasının ilk versiyonlarından biri uzun dalgalarda işe yaramıştı ve Wilhelm Wien de kısa dalgalardaki gözlemlere yaklaşık olarak uyan bir formül geliştirmiş ve her sıcaklıkta eğrinin tepesinin oluştuğu dalga boyunu da "tahmin etmişti". Planck küçük elektrik osilatörlerinin elektromanyetik dalgaları nasıl yayıp soğurması gerektiğine bakarak başladı işe. Rayleigh'in 1900'de, Jeans'in de bundan kısa bir süre sonra kullandığından farklı bir yaklaşımdı bu, fakat morötesi felaketiyle birlikte standart eğriyi tam olarak veriyordu. 1895'ten 1900'e kadar Planck bu sorun üzerinde çalışmış ve termodinamikle elektrodinamik arasındaki bağlantıyı tespit eden çeşitli çok önemli yazılar yayımlamıştı – fakat kara cisim tayfı muammasını hâlâ çözememişti. 1900'de çığır açtı, fakat bunu sessiz, sakin, mantıklı bir bilimsel içgörüyle değil, çaresizlik içindeyken, kullandığı matematiksel araçlardan birini tesadüfen yanlış anlaması sonucu şansı ve içgörüyü birleştirerek gerçekleştirdi.

Elbette Planck'ın kuantum mekaniğini ortaya çıkaran o devrim boyutlarındaki adımı atarken kafasında neler olduğunu bugün kimse kesin olarak bilemez, fakat fizik tarihinin kuantum kuramının doğduğu dönemi üzerinde uzmanlaşan bir tarihçi olan Yale Üniversitesi'nden Martin Klein, Planck'ın çalışmalarını ayrıntılı biçimde incelemiştir. Bu doğumda Planck ve Einstein'ın oynadıkları rolleri Klein'ın yeniden canlandırışı herhalde görüp göreceğimiz en sahici hikâyedir ve keşifleri inandırıcı bir tarihsel bağlam içine yerleştirmektedir. 1900 yazının sonlarında atılan ilk adımın, şansla hiç ilgisi yoktu, her şey eğitimli bir matematik fizikçisinin içgörüsü sayesinde olmuştu. Planck iki yetersiz kara cisim tarifinin tek bir basit matematik formülünde birleştirilerek eğrinin tam şeklinin tarif edilebileceğini fark etti; aslında iki formül arasında –Wien Yasası ve Rayleigh-Jeans Yasası– bir köprü kurmak için biraz matematik hokkabazlığı yapmıştı. Büyük bir başarı oldu. Planck denklemi oyuk ışıması gözlemleriyle gayet güzel uyuşuyordu. Fakat üzerine inşa

edildiği iki yarım yasanın aksine fiziksel bir temeli yoktu. Wien ve Rayleigh –hatta ondan önceki dört yıl boyunca Planck da– makul fizik varsayımlarından yola çıkıp kara cisim eğrisine gidecek bir kuram inşa etmeye çalışmışlardı. Şimdiyse Planck doğru eğriyi şapkadan çekip çıkarmıştı, fakat hiç kimse bu eğrinin hangi fizik varsayımlarına "ait" olduğunu bilmiyordu. Daha sonra bunların hiç de makul olmadığı anlaşıldı.

HOŞ KARŞILANMAYAN BİR DEVRİM

Planck'ın formülü Ekim 1900'de Berlin Fizik Cemiyeti'nin bir toplantısında ilan edildi. Onu takip eden iki ay içinde Planck yasaya fiziksel bir zemin bulmaya gömüldü, matematik denklemlerine hangisinin uyduğunu görmek için çeşitli fizik varsayımlarını çatıp bozuyordu. Daha sonra bunun bütün hayatındaki en yoğun çalışma dönemi olduğunu söylemiştir. Pek çok teşebbüs boşa çıktı, ta ki Planck'a hiç de hoş karşılamadığı tek bir alternatif kalana kadar.

Planck'ı eski gelenekten bir fizikçi olarak tarif etmiştim, öyleydi de. Daha önceki çalışmalarında molekül hipotezini kabul etmekte gönülsüz davranmıştı ve entropi diye bilinen özelliğin istatistiksel yorumu fikrinden özellikle tiksiniyordu – Boltzmann'ın termodinamik bilimine kazandırdığı bir yorumdu bu. Entropi fizikte kilit bir kavramdır, esas itibariyle zaman akışıyla ilgilidir. Basit mekanik yasaları –Newton'un yasaları– zaman söz konusuyken tamamen ters çevrilebilir olmasına rağmen, gerçek dünyanın öyle olmadığını biliyoruz. Yere bırakılan bir taşı düşünün. Yere çarpınca hareketinin enerjisi ısıya dönüşür. Fakat özdeş bir taşı yere koyup aynı derecede ısıtsak havaya sıçramaz. Neden? Düşen taş örneğinde düzenli olan hareket biçimi (bütün atomlar ve moleküller aynı yönde düşmektedir) burada düzensiz bir hareket biçimine dönüşür (bütün atomlar ve moleküller enerjik bir biçimde birbirlerine çarpıp dururlar fakat gelişigüzel bir şekilde). Bu, düzensizliğin gitgide artmasını gerektirirmiş gibi görünen bir doğa yasasıyla uyumludur ve düzensizlik bu anlamda entropiyle tanımlanır. Bu yasa termodinami-

ğin ikinci yasasıdır ve doğal süreçlerin daima düzensizliğin artışı yönünde ilerlediğini, yani entropinin daima arttığını ifade eder. Düzensiz ısı enerjisini bir taşa verdiğiniz durumda taş o enerjiyi kullanarak içindeki bütün molekülleriyle düzenli bir hareket yaratıp yukarıya doğru hep birlikte sıçrayamaz.

Yoksa sıçrayabilir mi? Boltzmann bu tema üzerinde bir çeşitleme sundu. Böyle olağanüstü bir olayın *mümkün* olduğunu söylüyordu, ama son derece ihtimal dışıydı. Aynı şekilde hava moleküllerinin gelişigüzel hareketlerinin sonucu havanın tamamı aniden odanın köşelerinde toplanabilirdi (bir köşeden fazla olmak zorunda çünkü moleküller üç boyutlu uzayda hareket ederler); ama işte böyle bir olasılık o kadar zayıftır ki uygulamada rahatlıkla ihmal edilebilir. Planck termodinamiğin bu ikinci yasasının istatistiksel yorumuna karşı uzun zaman canla başla direndi, hem alenen hem de Boltzmann'la olan yazışmalarında. Onun için ikinci yasa mutlaktı; entropi hep artmak *zorundaydı* ve olasılığın bu işle ilgisi yoktu. O yüzden Planck'ın 1900 yılının sonuna doğru ne hissettiğini anlamak zor olmasa gerek, çünkü o sıralarda bütün diğer seçenekleri tüketttikten sonra kara cisim tayfı hesaplarına istemeye istemeye Boltzmann'ın istatistiksel termodinamik versiyonunu dahil etmeyi denedi ve bunun işe yaradığını gördü. Ne var ki Boltzmann denklemlerine aşina olmadığı için bu denklemleri tutarsız bir şekilde uygulaması kaderin cilvesini daha hoş bir hale getirdi. Doğru cevapları almıştı, ama yanlış nedenle; Einstein bu fikri ele alana kadar Planck'ın çalışmasının gerçek değeri gün ışığına çıkmamıştır.

Burada şunu vurgulamakta yarar var: Planck'ın Boltzmann'ın entropi artışına getirdiği istatistiksel yorumu gerçekliğin en iyi tarifi olarak tespit etmesi zaten bilimde ileriye doğru atılmış başlı başına önemli bir adımdı. Planck'ın çalışmalarının ardından entropi artışı, gerçekten de çok muhtemel olmasına rağmen, mutlak bir kesinlik olarak görülemezdi şüphesiz. Bunun, uçsuz bucaksız uzay zaman büyüklüklerini ele aldığımız, bütün evrenin incelenmesi anlamına gelen kozmolojide ilginç yansımaları vardır. Ele aldığımız bölge ne kadar büyükse, bir yerlerde bir ara beklenmedik şeylerin meydana gelme kapsamı o kadar geniştir. Hatta genelde düzenli bir

yer sayılabilecek olan bütün evrenin, bir tür termodinamik istatistiksel çalkalanmayı, artık düşüşe geçen düşük entropili bir bölge yaratmış çok büyük, çok nadir bir hıçkırığı temsil ediyor olması (pek muhtemel olmasa da) mümkündür. Ne var ki Planck'ın "hata"sı evrenin yapısı hakkında çok daha temel bir şeyi ortaya koymuştur.

Boltzmann'ın termodinamiğe istatistiksel yaklaşımı enerjiyi matematiksel olarak iri parçalara ayırmayı ve bu parçaları olasılık denklemleriyle çözülebilecek gerçek niceliklermiş gibi ele almayı içeriyordu. Hesaplamanın bu kısmından önce parçalara ayrılmış enerjinin daha sonraki bir aşamada toplam enerjiyi vermesi için tekrar toplanması (bütünleşmesi) gerekir – buradaki toplam enerji kara cisim ışımasına karşılık gelen enerjidir. Fakat Planck bu işlemin yarısındayken aradığı matematik formülünün zaten elinde olduğunu fark etti. Enerji parçalarından süreğen bir bütün oluşturacak aşamaya gelmeden önce kara cisim denklemi matematikte vardı. O da bunu aldı. Bu çok radikal bir adımdı ve klasik fizik bağlamı içinde kesinlikle geçerli bir yanı yoktu.

Hangi iyi klasik fizikçi Boltzmann denklemlerinden yola çıkarak bir kara cisim ışıması formülü kuracak olsa bu bütünleştirmeyi tamamlardı. Daha sonra Einstein'ın da göstereceği gibi enerji parçalarını birbirine eklemek morötesi felaketi yeniden getirecekti – aslında Einstein bu soruna yönelik *her* klasik yaklaşımın kaçınılmaz bir biçimde bu felaketi getireceğini belirtmişti. Planck aradığı cevabı bildiği içindir ki denklemin tam, görünüşte doğru klasik çözümüne gelmeden durabildi. Sonuç olarak elinde açıklanması gereken enerji parçalarıyla kaldı. Elektromanyetik enerjinin görünüşe göre tek tek parçalara bölünmesi durumunu şu şekilde yorumluyordu: Atomun içindeki elektrik osilatörleri sadece kuanta [paketçikler] adı verilen belli büyüklükteki kümeler halinde enerji yayar ya da soğurur. Mevcut enerji miktarını belirsiz sayıda parçalara bölmek yerine, enerji rezonatörler arasında sadece sınırlı sayıda parçalara bölünebilirdi ve böyle bir parça ışımanın enerjisinin (E) frekansıyla (Yunan harfi ν ile gösterilir) bağlantısı yeni bir formüle göre verilir,

$$E = h\nu$$

buradaki h şimdi Planck sabiti dediğimiz yeni bir sabittir.

h NEDİR?

Bunun morötesi felaketi nasıl çözdüğünü görmek zor değil. Çok yüksek frekanslarda bir kuantumluk [paketçik] ışıma yaymak için gerekli enerji çok büyüktür, osilatörlerden sadece birkaçı bu enerjiye sahip olacaktır (istatistiksel denklemlere göre) o yüzden sadece birkaç yüksek enerjili kuantum [paketçik] yayılır. Çok düşük frekanslarda (uzun dalga boylarında), pek çok sayıda düşük enerjili kuantum [paketçik] yayılır, fakat her birinin o kadar düşük enerjisi vardır ki hepsi toplansa bile pek yekûn tutmaz. Sadece orta kuşak frekanslarda orta büyüklükte kümeler halinde ışıma yayacak kadar enerjiye sahip bir sürü osilatör vardır. Bu kümeler birlikte toplanınca kara cisim eğrisinin tepesini oluşturur.

Fakat Planck'ın Aralık 1900'de duyurulan bu keşfi, cevapladığından daha çok soru çıkarmıştır ortaya ve fizik dünyasını çalkalamayı başaramamıştır. Planck'ın kuantum kuramı üzerine kendi yazdığı ilk yazıları netlik açısından örnek oluşturmuyordu (belki de şaşkınlık içinde kuantum fikrini pek sevdiği termodinamiğin içine katmak zorunda kalışını yansıtıyordu) ve uzun bir süre onun çalışmalarını bilen pek çok –hatta çoğu– fizikçi eserine hâlâ bir matematik hilesi olarak bakıyordu, fizik açısından önemi az ya da hiç olmayan morötesi felaketten kaçınmak için bir araçtı. Planck'ın kendisinin de kesinlikle kafası karışıktı. 1931'de Robert William Wood'a yazdığı bir mektupta dönüp 1900'deki çalışmasına bakarak şöyle demiştir: "Bütün bu süreci bir çaresizlik edimi olarak niteleyebilirim... kuramsal bir yorumun her ne pahasına olursa olsun bulunması *şarttı*."[7] Ne var ki tesadüfen önemli bir şeyin üzerine bastığını biliyordu ve Heisenberg'e göre Planck'ın oğlu daha sonra babasının o

7. Aktaran Mehra ve Rechenberg. 1. Cilt.

sıralarda tezini nasıl tarif ettiğini anlatmış, Berlin'in banliyölerindeki Grunewald'da uzun bir yürüyüş sırasında bu keşfin Newton'unkilere denk olabileceğini söylemişti.[8]

Fizikçiler 1900'lerin başlarında atom ışımasını içeren yeni keşifleri özümsemekle meşguldü ve Planck'ın kara cisim eğrisini açıkladığı yeni "matematik hilesi" de o keşiflerin yanında pek matah görünmüyordu. Hatta Planck'ın çalışmasından dolayı Nobel Ödülü alması 1918'i buldu. Bu, Curie'lerin ya da Rutherford'un çalışmalarının kabul edilme hızına kıyasla çok uzun bir süredir. (Bunun sebebi kısmen, çığır açan yeni kuramların kabul görmesinin daima uzun zaman almasıdır; yeni bir kuram yeni bir parçacık ya da X ışını kadar somut olmaz, zaman testinden geçip deneylerle teyit edildikten sonra kabul görmeyi tam olarak başarır.) Planck'ın yeni sabiti *h*'de de bir tuhaflık vardı. Çok küçük bir sabittir, 6.6×10^{-34} jul/sn, fakat bunda şaşılacak bir şey yok çünkü daha büyük olsaydı fizikçiler kara cisim ışıması üzerine kafa yormaya başlamadan çok daha önce boy gösterirdi. Hayır, *h*'nin tuhaflığı ölçüldüğü birimler, yani enerji (erg) çarpı zamandır (saniye). Böyle birimlere "hareket" [*action*] denir ve klasik mekaniğin bildik özelliklerinden değildir – madde ve enerjinin korunumu yasasına denk düşecek "hareketin korunumu yasası" diye bir şey yoktur. Ama hareketin ilginç bir özelliği var. Başka şeylerin yanı sıra bunu da entropiyle paylaşır. Sabit bir hareket mutlak biçimde sabittir, uzay ve zamanda bütün gözlemcilere göre aynı büyüklüktedir. Dört boyutlu bir sabittir ki bunun önemi ancak Einstein'ın görelilik kuramını ortaya çıkarmasıyla anlaşılmıştır.

Einstein kuantum mekaniği sahnesine giren bir sonraki aktör olduğundan yolumuzdan kısaca ayrılıp bunun ne anlama geldiğine bir bakmak yararlı olacaktır. Özel görelilik kuramı uzayın üç, zamanın tek boyutunu dört boyutlu bir bütün, uzay-zaman süreklisi olarak ele alır. Uzayda farklı süratlerde yolculuk eden gözlemciler her şeyi farklı görür – sözgelimi, geçerken ölçtükleri bir sopanın uzunluğu hakkında anlaşamazlar. Fakat sopanın dört boyutta var olduğu düşünülebilir ve zaman "içinde" hareket ederken dört bo-

8. Bkz. *Physics and Philosophy*, s. 35.

yutlu bir yüzey çizer. Bu, yüksekliği sopanın uzunluğunu, genişliği geçen zaman miktarını veren bir hiper-dörtgendir. Dörtgenin "alan"ı uzunluk x zaman cinsinden ölçülür ve bu alan ölçüm yapan bütün gözlemcilere, ölçtükleri uzunluk ve zaman konusunda anlaşamasalar da, aynı gelir. Keza, hareket (enerji x zaman) enerjinin dört boyutlu dengidir ve enerji ile zaman bileşenlerinin büyüklüğü konusunda anlaşamasalar da bütün gözlemcilere göre hareketin aynı olduğu görülür. Özel görelilikte hareketin korunumu yasası *vardır* ve her parçasıyla enerjinin korunumu yasası kadar önemlidir. Planck sabiti sadece görelilik kuramından önce keşfedildiği için garip gelmişti.

Bu da belki fiziğin bütüncü doğasını ön plana çıkarıyordu. Einstein'ın 1905'te yayımlanan önemli üç bilimsel makalesinden biri olan özel görelilik, Brown hareketi [*motion*] ve fotoelektrik etki konusunda ötekilerden çok farklı bir tutum benimsiyormuş gibi görünmektedir. Yine de kuramsal fizik çerçevesinde hepsi tutarlı bir tablo çizer ve görelilik kuramının herkesçe bilinmesine karşın Einstein'ın en büyük katkısı Planck'ın çalışmasından fotoelektrik etki yoluyla sıçramış olan kuantum kuramı hakkında yaptığı çalışmadır.

Planck'ın 1900'deki çalışmasının devrim yaratan yanı klasik fiziğin sınırını göstermesi olmuştur. Bu sınırın tam olarak ne olduğunun hiç önemi yok. Newton'un çalışmalarından inşa edilmiş klasik düşüncelerle tek başına açıklanamayan fenomenlerin var olması bile fizikte yeni bir çağın habercisi olmak için yeterliydi. Ne var ki Planck'ın çalışmasının ilk hali bugünkü anlatımlarda göründüğünden daha sınırlıydı. Sonunun ne olacağı belli olmayan çok tehlikeli durumlardan her bölümün sonunda, şu cümleyle özetlenebilecek bir mucizeyle kurtulan kahramanların anlatıldığı macera hikâyeleri vardır hani: "Jack bir sıçradı kurtuldu." Pek çok popüler hikâyede de kuantum kuramının doğuşu bilimsel bir-sıçradı-kurtuldu şeklinde anlatılır. "On dokuzuncu yüzyılın sonunda klasik fizik kafasını duvara toslamıştı. Planck bir sıçradı, kuantumu icat etti, fizik kurtuldu." Hiç alakası yok. Planck sadece atomların içindeki elektrik osilatörlerinin kuantalanabileceği [paketçikler halinde ifade edilebileceği] fikrini ortaya atmıştı. Demek istediği sadece belli büyük-

lüklerde enerji paketçiklerini yayabilecekleriydi, çünkü içlerindeki bir şey onların "arada kalan" ışıma miktarlarını soğurmasını ya da yaymasını engelliyordu.

Benim Londra'daki bankamın ATM'si de aynı biçimde çalışıyor. Banka kartımı sokunca makine istediğim miktarda parayı veriyor, yeter ki miktar 5 sterlin ve katları olsun. ATM aradaki miktarları veremez (5 sterlinden azını da veremez), ama bu, aradaki miktarların, mesela 8.47 sterlinin var olmadığı anlamına gelmez. Yani Planck *ışımanın* paketçikler halinde olduğunu söylememiştir, ayrıca kuantum kuramının daha derinlerdeki imalarına karşı daima ihtiyatlı olduğu gibi bir izlenim vardır. Sonraki yıllarda kuantum kuramı geliştikçe Planck temelini attığı bilime bazı katkılarda bulunmuştur, fakat çalışma hayatının büyük kısmını yeni fikirleri klasik fizikle bağdaştırmaya çalışarak geçirmiştir. Fikrini değiştirmiş olmasından değil, en başta kendi bulduğu kara cisim denkleminin klasik fizikten ne kadar uzaklaştığını asla tam görememiş olmasından – zira bu denklemi, termodinamiği elektromanyetikle birleştirerek çıkarmıştı ve ikisi de klasik kuramlardı. Bir daha düşünmek yerine Planck'ın kuantum fikirleriyle klasik fizik arasında orta bir yol bulma gayretleri gerçekten de onun için birlikte büyüdüğü klasik düşüncelerden çok köklü bir kopuştu. Fakat klasik fikirlere ayağı öyle kök salmıştı ki gerçek ilerlemenin yeni nesil fizikçiler tarafından sağlandığını görmek hiç şaşırtıcı olmamıştır. Bildik yöntemlere daha az bağlı ve eski fikirlere daha az sadık olan ve atom ışımasındaki yeni keşiflerle heyecana kapılan bu yeni nesil fizikçiler hem eski hem yeni sorulara cevap aramaktaydılar.

EINSTEIN, IŞIK VE KUANTA

Einstein 1900 Mart'ında yirmi bir yaşındaydı. 1902 yazında İsviçre patent bürosundaki o ünlü işine girdi ve yirminci yüzyılın o ilk yıllarında bilimsel dikkatinin önemli bir kısmını termodinamik ve istatistiksel mekanik problemlerine adadı. İlk bilimsel yayınları üslup ve ele aldığı problemler açısından Planck'ın da dahil olduğu önceki

kuşaklarınki kadar gelenekseldi. Fakat Planck'ın kara cisim tayfı hakkındaki fikirlerine gönderme yaptığı ilk yazısında (1904'te yayımlandı) Einstein çığır açmaya ve sadece kendine ait olan fizik bilmecelerini çözmek için yeni bir tarz geliştirmeye başlamıştı. Martin Klein Einstein'ın Planck'ın çalışmasının fizikle ilgili içerimlerini ciddiye alan ilk kişi olduğunu ve bunları bir matematik hilesinden daha önemli gördüğünü anlatır;[9] bir yıl içerisinde bu denklemlerin fiziksel gerçeklikte temeli olduğunun kabulü yepyeni, çarpıcı bir içgörüyü doğurdu. Işığın tanecik kuramının yeniden canlanmasıydı bu.

Planck'ın çalışması dışında 1904'teki yazının öteki sıçrama noktası, on dokuzuncu yüzyılın sonlarında Phillip Lenard ve J. J. Thomson'un birbirinden bağımsız çalışarak fotoelektrik etkisini incelemeleriydi. Lenard 1862'de Macaristan'ın şimdi Çekoslovakya olan bölgesinde doğdu. Katot ışınları hakkında yaptığı araştırmalardan dolayı 1905'te Nobel Ödülü aldı. O deneylerin arasında 1899'da katot ışınlarının (elektronların) havasız ortamdaki metal bir yüzeye vuran ışıkla üretilebileceğini göstermişti. Bir şekilde ışıktaki enerji, elektronların metalden fırlamalarına sebep olmaktadır.

Lenard'ın deneyleri tek renkli ışık (monokromatik ışık) demetlerini içerir. Bunun anlamı ışıktaki bütün dalgaların frekansının aynı olmasıdır. Işığın şiddetinin metalden elektronları nasıl söküp aldığına bakmış ve şaşırtıcı bir sonuçla karşılaşmıştır. Daha parlak bir ışık kullanınca (aslında yaptığı şey aynı ışığı metal yüzeye yaklaştırmaktı, bu daha parlak ışık etkisi yaratıyordu) metal yüzeyin her santimetrekaresinde daha fazla enerji parlar. Eğer bir elektron daha fazla enerji kazanırsa o zaman metalden daha hızlı koparılması ve

9. Harry Woolf (y.h.), *Some Strangeness in the Proportion* içinde Klein'ın yazısına bkz. Aynı ciltte MIT'ten Thomas Kuhn çoğu otoriteden daha da ileri giderek şöyle söylüyor: Planck "kara cisim dağılım yasasının ilk türevlerini sunduğunda müstakil bir enerji tayfı kavramından habersizdi" ve "kuantalamanın kara cisim kuramındaki hayati rolü"nü ilk gören Einstein'dı. Kuhn'a göre, "Planck osilatörünü ilk kuantalayan Planck değil Einstein'dır." Tartışmayı akademisyenlere bırakalım; ama Einstein'ın kuantum kuramının gelişmesine katkılarının çok önemli olduğu su götürmez.

daha büyük bir hızla uçup gitmesi gerekir. Fakat Lenard ışığın dalgası aynı kaldığı sürece, atılmış bütün elektronların aynı hızla fırladığını bulmuştur. Işığı metale yaklaştırmak fırlatılan elektron sayısını artırmıştır, fakat bu elektronların her biri yine de aynı renkteki daha zayıf bir ışık demetinin ürettiği hızın aynısıyla çıkmıştır. Öte yandan daha yüksek frekanslı –mesela mavi ya da kırmızı ışık yerine morötesi– bir ışık demeti kullandığında elektronlar daha hızlı hareket eder.

Bunu açıklamanın çok kolay bir yolu vardır, tabii klasik fiziğin yerleşmiş fikirlerini terk edip Planck denklemlerini fizik bakımından anlamlı bulduğunuz takdirde. Bu şartların önemi, Lenard'ın fotoelektrik etkisi üzerine yaptığı ilk çalışmayla Planck'ın kuanta [paketçikler] kavramını ortaya atmasından sonraki beş yıl boyunca hiç kimsenin görünüşte kolay olan o adımı atmamış olmasından anlaşılabilir. Aslında Einstein'ın tek yaptığı $E = h\nu$ denklemini atomların içindeki küçük osilatörler yerine elektromanyetik ışımaya uyarlamaktan ibaretti. Bilim adamlarının yüzyıl boyunca düşündüğünün aksine ışığın kesintisiz bir dalga olmadığını, belirli paketçikler yani kuanta halinde geldiğini söylemiştir. Belli bir ν frekansındaki her türlü ışık, yani belli bir renkteki ışık aynı E enerjisine sahip paketçikler halinde gelir. Bu ışık paketçiklerinden bir tanesi bir elektrona her çarpışında elektrona aynı miktarda enerjiyi, dolayısıyla aynı hızı verir. Daha şiddetli ışık demek hepsi aynı enerjiye sahip daha çok ışık paketçiği demektir (bunlara artık foton diyoruz), fakat ışığın rengini değiştirmek frekansını değiştirir, o da her bir fotonun taşıdığı enerji miktarını değiştirir.

Einstein'ın en nihayet 1921'de Nobel Ödülü aldığı çalışma buydu. Bir kere daha, çığır açan bir kuramın tamamen kabul görmesi için beklemesi gerekti. Foton fikri hemen kabul görmedi ve Lenard'ın deneylerinin bu kuramla genel olarak uyuşmasına rağmen elektronların hızıyla ışığın dalga boyu arasındaki ilişkinin tam tespitinin test edilip ispatlanması on yıldan fazla zaman aldı. Bunu da Amerikalı deneyci Robert Millikan gerçekleştirmiştir. Millikan bunu yaparken Planck sabiti h'nin değerini de çok hassas bir biçimde ölçmüştür. 1923'te Millikan da bu çalışması ve elektron üzerindeki

yükün büyüklüğünün doğru ölçümünden dolayı Nobel Fizik Ödülü'nü almıştır.

Anlayacağınız Einstein o yıl harıl harıl çalışmaktaydı. Bir makalesiyle Nobel Ödülü'nü aldı; başka bir tanesi ilk ve son kez atomların gerçekliğini kanıtladı; bir üçüncüsü ünlü kuramı göreliliğin doğumunu gördü. 1905'te aynı önemde sayılmasa da moleküllerin büyüklüğüyle ilgili küçük çapta bir çalışmayla da boğuşuyordu. Bunu Zürih Üniversitesi'ne doktora tezi olarak sundu. Ocak 1906' da da doktorasını aldı. PhD o zamanlar bugün olduğu gibi aktif bir araştırma hayatının kapılarını açmıyordu, ama yine de 1905'in üç müthiş makalesini o sıralarda imzasını "Herr." Albert Einstein diye atan bir adamın yayımlamış olması kayda değerdir.

Sonraki birkaç yıl boyunca Einstein Planck'ın kuantumunu fiziğin başka alanlarına sokmaya çalıştı. Bu fikrin özgül ısıyla (bir maddenin özgül ısısı, sabit miktardaki bir maddenin istenilen bir dereceye kadar yükseltilmesi için gerekli ısı miktarıdır) ilgili yıllanmış bilmeceleri açıkladığını keşfetti. Bu Einstein'ın çalışmaları arasında genellikle göz ardı edilen, bilimin daha az görkemli alanlarından biridir, fakat maddenin kuantum kuramı Einstein'ın geliştirdiği ışımanın kuantum kuramından daha çabuk kabul gördü ve eski okuldan pek çok fizikçiyi kuantum fikirlerinin ciddiye alınması gerektiği konusunda ikna etmeye başladı. Einstein 1911'e gelene kadar kuantum ışıması hakkındaki fikirlerini yıllar içinde süzgeçten geçirmiş ve sonuç olarak ışığın kuantum yapısının Planck denklemlerinin kaçınılmaz bir sonucu olduğunu kanıtlayıp gönülsüz bir bilim topluluğuna ışığın daha iyi anlaşılması için on yedinci yüzyıldan beri rekabet halinde olan dalga ve parçacık kuramlarının birleştirilmesi gerektiğine işaret etmiştir. 1911'e gelindiğinde artık Einstein'ın aklı başka şeylerdeydi. Kuantanın gerçek olduğuna kendi kanaat getirmişti ve önemli olan da kendi görüşüydü. Yeni ilgi alanı kütle çekimi problemiydi ve 1916'ya kadar beş yıl boyunca Genel Görelilik Kuramı'nı geliştirdi. Bu onun çalışmaları arasında en muhteşem olanıdır. Işığın kuantum doğasının gerçekliğinin hiçbir kuşkuya yer bırakmayacak şekilde ispatlanması 1923'ü buldu ve bu da kuantum kuramını dönüştürmeye yardım edip kuramın yeni versiyonu kuantum mekani-

ğini buyur eden parçacık ve dalgalarla ilgili yeni bir tartışmaya yol açtı. Bu fikirlerin daha fazlası yerli yerine oturdu. Kuantum kuramının ilk filizlenmesi Einstein'ın konudan uzaklaşıp başka meselelere yoğunlaştığı on yıllık sürede oldu. Bu da, Einstein'ın kendi fikirleriyle Rutherford atom modelinin kaynaşmasından ve büyük ölçüde de Danimarkalı bilim adamı Niels Bohr'un çalışmaları sayesinde ortaya çıkmıştır. Bohr o sıralarda Manchester'da Rutherford'la çalışmaktaydı. Bohr atom modelini ortaya attıktan sonra kuantum kuramının çok küçüklerin fiziksel dünyasının tarifi olarak sahip olduğu değerden artık hiç kimse kuşku duyamazdı.

Dördüncü Bölüm

Bohr'un Atomu

1912'ye gelindiğinde atom yapbozunun parçaları bir araya getirilmeye hazırdı. Einstein kuanta fikrinin geçerliliğini ana hatlarıyla kanıtlamış ve genel kabul görmemişse de foton fikrini ortaya atmıştı. Para çekme makinesi analojisini biraz daha ileri götürürsek Einstein'ın söylediği şuydu: Enerji gerçekten sadece belirli büyüklükteki paketçikler halinde gelir – ATM sadece 5 sterlin ve katlarında çalışır çünkü oradaki mevcut en küçük para birimi odur, yoksa makineyi kuran programcının kaprisinden dolayı değil. Rutherford atomun yeni bir resmini çıkarmıştı. Ortada küçük bir çekirdek vardı, etrafında da elektron bulutu, ama bu fikir de genel bir kabul görmüş değildi daha. Ne var ki, Rutherford'un atomu klasik elektrodinamik yasalarına göre kararlı olamıyordu. Çözüm atomların içindeki elektronların davranışını tarif etmek için *kuantum* kurallarını kullanmaktı. Yine çığır açan buluş, probleme yepyeni bir yaklaşımla bakan genç bir araştırmacıdan gelmişti – kuantum kuramının gelişim hikâyesi boyunca süren bir temadır bu genç araştırmacı teması.

Niels Bohr doktorasını 1911 yazında tamamlayıp Eylül'de Cavendish'de J. J. Thomson'la çalışmak üzere Cambridge'e giden Danimarkalı bir fizikçiydi. Çiçeği burnunda bir araştırmacıydı, çekingendi ve İngilizcesi yeterli değildi; Cambridge'de kendine uygun bir yer bulmakta zorlandı, fakat Manchester'a gittiği bir sırada Rutherford'la tanıştı. Onu çok cana yakın, hem kendisiyle hem çalışmasıyla ilgili buldu. Bunun üzerine Bohr 1912 Martı'nda Manchester'a taşınıp atomun yapısına yoğunlaşarak Rutherford'un ekibiyle

çalışmaya başladı.[10] Bohr altı ay sonra Kopenhag'a döndü, ama sadece kısa süreliğine, sonra 1916'ya kadar Rutherford'un Manchester'daki grubuyla irtibatlı kaldı.

SIÇRAYAN ELEKTRONLAR

Bohr'un özel bir dehası vardı, ki aslında sonraki on on beş yıl boyunca atom fiziğindeki ilerleme için gereken şey de buydu. Tamamlanmış bir kuramla bütün ayrıntıları açıklamaya gerek görmüyordu, fakat gerçek atomların gözlemlenmesiyle hiç değilse kabaca uyum içinde olan hayali bir "model" oluşturmak için birbirinden farklı fikirleri birbirine yamamayı kestiriyordu gözüne. Neler olup bittiği hakkında şöyle kabaca bir fikri olunca parçaları birbirine daha iyi uydurmak için kurcalayabilecek ve bu şekilde daha tamamlanmış bir resme doğru gidebilecekti. Bu yüzden atomu minyatür bir güneş sistemi olarak düşündü, elektronlar klasik mekanik ve elektromanyetizma yasalarına uygun olarak yörüngelerde dönüyorlardı, ayrıca elektronlar o yörüngelerden ayrılıp döne döne içeri gidip ışıma yaymıyorlardı çünkü sadece bütün halinde enerji parçaları –bütün halinde enerji paketçikleri– yaymaya izinleri vardı, klasik kuramın gerektirdiği kesintisiz ışımaya değil. Elektronların "kararlı" yörüngeleri belli sabit enerji miktarlarına karşılık geliyordu ki bu miktarların her biri temel enerji paketçiğinin [kuantum] katlarıydı, fakat arada hiç başka yörünge yoktu çünkü o zaman enerji miktarı kesirli olurdu. Güneş sistemi analojisini haddinden fazla zorlayacak olursak, Dünya'nın ve Mars'ın Güneş etrafındaki yörüngelerinin sabit olduğunu, ama arada bir yerde sabit bir yörünge bulunmadığını söylemek gibi bir şeydir bu.

10. Hikâyenin başka bir versiyonuna göre bu ayrılış Bohr'la Thomson arasında Thomson atom modeliyle ilgili olarak baş gösteren fikir uyuşmazlığının sonucuydu. Bohr bu modeli sevmemiş, J. J. de üstü kapalı bir şekilde Rutherford'un Bohr'un fikrine daha açık olabileceğini söylemişti. E. U. Condon'dan aktaran Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, s. 69.

Bohr'un yaptığı şeyin işlemesi mümkün değildi. Yörünge fikrinin tamamı klasik fiziğe dayanır; sabit enerji miktarlarına karşılık gelen elektron durumları fikriyse –artık enerji seviyeleri denir oldu– kuantum kuramından gelir. Klasik kuramdan parçalarla kuantum kuramından parçaları birbirine ekleyip bir atom modeli çıkarmak atomları neyin çalıştırdığına dair bir kavrayış sağlamamıştır, fakat Bohr'a gelişme kaydetmesi için yeteri kadar işleyen bir model sağladığı kesindir. Şimdi modelinin neredeyse her bakımdan yanlış olduğu çıkıyor ortaya, fakat atomun hakiki bir kuantum kuramına geçişini sağlamıştır, ki bu da paha biçilmez bir şeydir. Kuantum fiziği ile klasik fiziğin fikirlerini derli toplu, sade bir biçimde harmanladığı ve atomu güneş sisteminin minyatürü olarak gösteren baştan çıkarıcı bir resim çizdiği için bu model sadece popüler kitapların sayfalarında değil pek çok ders kitabında, hatta üniversitelerde okutulanlarda bile gereğinden fazla konaklamıştır ne yazık ki. Okulda atom modelleriyle ilgili ne öğrendiyseniz, derslerde adına ne denmiş olursa olsun eminim Bohr atom modelini öğrenmişsinizdir. Öğrendiğiniz her şeyi unutmanızı istemeyeceğim, fakat bütün gerçeğin o olmadığına ikna olmaya hazırlıklı olun. Ayrıca elektronları çekirdek etrafında daireler çizen küçük "gezegenler" olarak gösteren fikri unutmaya *çalışmalısınız* – bu Bohr'un başlangıçtaki fikriydi. Fakat gerçekten insanı yanıltıyor. Elektron çekirdeğin dışında oturan bir şeydir sadece ve belli miktarda enerjiye ve başka özelliklere sahiptir. Birazdan göreceğiniz gibi gizemli bir şekilde hareket eder.

Bohr'un 1913'te yaptığı ilk önemli çalışmasının zaferi, en basit atom olan hidrojenin ışık tayfını başarılı bir şekilde açıklamış olmasıdır. Tayf ölçümü bilimi on dokuzuncu yüzyılın başlarına dayanır. O sıralarda William Wollaston güneşten gelen ışık tayfında kara çizgiler keşfetmişti, fakat tayf ölçümü ancak Bohr'un çalışmasıyla atomun yapısını incelemek için kullanılabilecek bir araç olarak kendini kanıtlamıştır. Ne var ki, gelişme kat etmek için klasik ve kuantum kuramını harmanlayan Bohr gibi biz de tayf ölçümünün nasıl işlediğini anlamak için Einstein'ın ışık paketçikleri hakkındaki fikirlerinden geriye bir adım atmalıyız. Bu tür bir çalışmada ışığı elektromanyetik dalga dışında bir şey olarak düşünmek anlamsız olur.[11]

Newton'un tespit ettiği gibi beyaz ışık gökkuşağının bütün renklerinden, tayftan oluşmaktadır. Her renk ışığın farklı bir dalga boyuna karşılık gelir ve bir cam prizma kullanarak beyaz ışığı renkli bileşenlerine ayırınca aslında tayfı yayarak farklı frekanstaki dalgaları yan yana bir perde üzerine ya da fotoğraf plakasına dizmiş oluruz. Kısa dalga olan mavi ve mor ışık optik tayfın bir ucunda, uzun dalga kırmızı da öteki ucundadır – bu arada tayf her iki uçta da gözle görebileceğimiz renk yelpazesinin çok ötesine uzanır. Güneş ışığı bu şekilde yayılınca ortaya çıkan tayfın çok belirgin yerlerinde çok keskin, koyu çizgiler oluşur. Bunlar çok belirgin frekanslara karşılık gelir. Joseph Fraunhofer, Robert Bunsen (laboratuvar ocakları için kullanılan adı ölümsüzleşmiştir) ve Gustav Kirchoff gibi araştırmacılar bu çizgilerin nasıl oluştuklarını bilmeden on dokuzuncu yüzyılda deneyle her bir elementin kendi tayf çizgilerini oluşturduğunu kanıtlamışlardır. Bir element (örneğin sodyum) Bunsen ocağının aleviyle ısıtılınca belli renkte bir ışık üretir (burada sarı). Bu ışık, güçlü ışımanın yayılmasıyla tayfın bir kısmında parlak bir çizgi ya da çizgiler şeklinde belirir. Beyaz ışık aynı elementi içeren bir sıvı ya da gaz içinden geçerken, element başka elementlerle birleşip kimyasal bir bileşik oluşturmuş olsa bile, ışıktaki tayf o elementin özelliği olan aynı frekanslarda koyu soğurma çizgileri gösterir, tıpkı güneşten gelen ışıktakiler gibi.

Güneş tayfındaki koyu çizgiler bu şekilde açıklanmıştır. Bu çizgiler, güneş atmosferindeki daha soğuk madde bulutları tarafından üretilmiş olsa gerek. Söz konusu bulutlar, güneşin çok daha sıcak yüzeyinden gelip kendilerinin içinden geçen ışıktaki belirgin frekanslarda bulunan ışımayı soğururlar. Bu teknik sayesinde kimyagerler bir bileşikteki elementleri tanımlamanın kullanışlı bir yolunu bulmuş oldular. Örneğin, sofra tuzunu ateşe atın, ateşin tipik sodyum sarısı renginde (bugün de sodyum buharlı sokak lambalarından aşina olduğumuz bir renk) alevlerle parladığını görürsünüz. Laboratuvarda karakteristik tayf, test edilen bir maddeye bir telin ba-

11. Kuantum kuramı ışığın *hem* parçacık *hem* dalga olduğunu söylemektedir, fakat daha oraya gelmedik.

tırılıp daha sonra Bunsen ocağına tutulması yoluyla görülebilir. Her element kendine özgü çizgi örüntüsü verir ve şiddeti değişse, hatta alevlerin sıcaklığı değişse de örüntü aynı kalır. Her bir tayf çizgisinin keskinliği elementin her atomunun tam olarak aynı frekansta, hiçbiri düzeni bozmadan, soğurduğunu ya da yaydığını gösterir. Bunun gibi alev testlerinden yola çıkan tayf ölçümcüleri güneş ışığı tayfındaki çizgilerin çoğunu ortaya çıkarmış, bunları yeryüzünde bilinen elementlerin güneşteki varlığıyla açıklamışlardır. Bu işlemin tersten uygulanmış ünlü bir örneğinde İngiliz astronom Norman Lockyer (bilim dergisi *Nature*'ın kurucusu) güneş tayfında, bilinen hiçbir elementin tayfıyla açıklanamayan çizgiler keşfetmiştir ve bunun daha önce bilinmeyen, helyum adını verdiği bir element yüzünden olması gerektiğini söylemiştir. Fazla gecikmeden helyum yeryüzünde bulunmuş ve güneş çizgilerine tam olarak uyacak tayfı olduğu görülmüştür.

Tayf ölçümü yardımıyla astronomlar uzaktaki yıldız ve galaksileri araştırıp neden yapıldıklarını bulabiliyorlar. Atom fizikçileri de aynı aracı kullanarak artık atomun iç yapısını araştırabiliyorlar.

Hidrojenin tayfı özellikle basittir. Bugün bunun hidrojenin en basit element olmasından ve her atomunun çekirdeğinde sadece tek bir proton ile buna karşılık bir tane negatif yüklü elektron bulundurmasından kaynaklandığını biliyoruz. Hidrojenin emsalsiz parmak izini sağlayan tayftaki çizgilere Johann Balmer'dan dolayı Balmer çizgileri denir. İsviçreli bir öğretmen olan Balmer tesadüfen Niels Bohr'un doğduğu yıl olan 1885'te bu örüntüyü açıklayan bir formül üzerinde çalışmıştır. Balmer'ın formülü tayftaki hidrojen çizgilerinin oluştuğu frekansları birbiriyle ilintilendiriyordu. Balmer formülü tayfın kızıl kısmındaki ilk hidrojen çizgisinin frekansıyla başlayıp yeşildeki bir sonraki hidrojen çizgisinin frekansını verir. Yeşil çizgiden başlayarak aynı formül o frekansla uygulandığında bir sonraki çizginin mordaki frekansını verir ve bu böyle devam eder.[12]

12. Formülün basit bir versiyonuna göre ilk dört hidrojen çizgisinin dalga boyları, sırasıyla, bir sabitle (36.456×10^{-5}) 9/5, 16/12, 25/21 ve 36/32'nin çarpımına eşittir. Formülün bu versiyonunda bir kesrin payı kare serisi olarak verilir (3^2, 4^2, 5^2, 6^2); paydalar karelerin farklarından oluşur ($3^2 - 2^2$, $4^2 - 2^2$ vs).

Balmer, formülü üzerinde çalışırken görülebilir tayfta sadece dört hidrojen çizgisini biliyordu, fakat öteki çizgiler çoktan keşfedilmişti ve tayfa tam olarak oturuyorlardı; mor ötesinde ve kızıl ötesinde başka hidrojen çizgileri tespit edilince onlar da bu basit sayısal ilişkiye uydu. Belli ki Balmer formülü hidrojen atomunun yapısı hakkında önemli bir şey söylüyordu. Ama ne?

Bohr sahneye çıktığında Balmer formülü fizikçiler arasında bildik bir şeydi, lisans eğitimindeki her fizik dersinin bir parçasıydı. Fakat tayflarla ilgili bir yığın karmaşık verinin bir parçasıydı, Bohr da tayf ölçüm uzmanı falan değildi. Hidrojen atomunun yapısı muammasını üzerinde çalışırken bu Balmer çizgisi serilerinin bu muammayı çözecek aşikar bir anahtar olduğunu hemen düşünmemiştir, fakat tayf ölçümü uzmanı bir meslektaşı Balmer formülünün (başka atomların tayflarının çıkardığı güçlükler dikkate alınmadığında) ne kadar basit olduğunu gösterince Bohr formülün değerini hemen anlamıştır. Bohr o sıralarda, yani 1913'ün başlarında, bu bilmecenin çözümünün kısmen Planck sabiti h'nin atomu tarif eden denklemlere sokulmasından geçtiğini biliyordu. Rutherford'un atomunun yapısında sadece iki tür temel sayı mevcuttu: elektron e'nin yükü ve içerideki parçacıkların kütleleri. Rakamlarla ne kadar cambazlık yaparsanız yapın kütle ve yükün karışımından uzunluk boyutlarına sahip bir sayı elde edemezsiniz, yani Rutherford modelinin "doğal" büyüklük birimi yoktu. Fakat çorbaya eklenen h gibi bir etkiyle uzunluk boyutları olan bir sayı elde etmek mümkün. Bu sayıya kabaca atomun büyüklüğü olarak da bakılabilir. h^2/me^2 ifadesi sayısal olarak bir uzunluğa denktir, o da yaklaşık 20×10^{-8} cm'dir. Atomun, saçılma deneyleri ve öteki çalışmalardan çıkarılan özelliklerine epeyce denk düşen yaklaşık bir rakamdır bu. Bohr için h'nin atom kuramında yer aldığı açıktı. Balmer serileri bunun sadece hangi noktada yer aldığını göstermiştir.

Nasıl olur da bir atom çok net tayf çizgileri oluşturabilir? Tamı tamına belirli bir ν frekansıyla enerji yayarak ya da soğurarak. Enerji frekansa Planck sabitiyle bağlıdır ($E = h\nu$) ve atomdaki bir elektron bir $h\nu$'lik enerji yayıyorsa, o zaman elektronun enerjisi tam buna karşılık gelen E miktarında değişebilir. Bohr atomun çevresin-

de "yörüngede" bulunan elektronların yerinde kaldığını çünkü sürekli enerji yayamadıklarını, ama bu tabloya göre bütün halindeki enerji paketçiğini –tek foton– yaymalarına (ya da soğurmalarına) ve bir enerji seviyesinden (eski tabloya göre bir yörüngeden) ötekine sıçramalarına izin verileceğini söylüyordu. Görünüşte basit olan bu fikir klasik fizikle gerçekten köklü bir farklılık daha koyuyor ortaya. Adeta Mars yörüngesinden çıkmış da anında uzay boşluğuna bir enerji (bu örnekte kütle çekimsel ışıma olurdu) yollayarak Dünya'nın yörüngesinde yeniden ortaya çıkmış gibi. Güneş sistemli atom fikrinin neler olup bittiğini açıklamada ne kadar yetersiz kaldığını ve elektronların atomun içinde farklı enerji seviyelerine karşılık gelen farklı durumlarda bulunduğunu düşünmenin ne kadar kullanışlı olduğunu hemen görebiliyorsunuz.

Bir halden ötekine sıçramak enerji merdiveninde hem aşağı hem yukarı, iki yönde de olabilir. Eğer bir atom ışık soğurursa o zaman *hv* enerji paketçiği elektronu bir enerji seviyesi yukarı (merdivende daha yüksek bir basamağa) çıkarmak için kullanılır; elektron daha sonra eski enerji seviyesine geri düşerse o zaman da tamı tamına aynı *hv* enerjisi yayılacaktır. Balmer'ın formülündeki gizemli sabit 36.456 x 10^{-5}, doğal olarak Planck sabiti cinsinden yazılabilirdi, bu da Bohr'un hidrojen atomundaki tek elektron için "izin verilmiş" olası enerji seviyelerini hesaplayabileceği anlamına geliyordu. Tayftaki çizgilerin ölçülmüş frekansı artık farklı seviyelerde ne kadar enerji farkı olduğunu ortaya koyan değer olarak yorumlanabilirdi.[13]

13. Elektron ve atomlarla uğraşırken gündelik enerji birimleri işleri zorlaştıracak ölçüde büyük kaçarlar, bunun için uygun birim elektron Volttur (eV), bu da bir elektronun bir Voltluk elektrik potansiyel farkını geçmek için ihtiyaç duyduğu enerji miktarıdır. Bu birim 1912'de bulunmuştur. Daha gündelik bir dille bir elektron Volt 1.602 x 10^{-19} juldür, bir Watt ise bir jul/saniyedir. Sıradan bir ampul 100 Watt'lık enerji yakar, bunu dilerseniz saniyede 6.24 x 10^{20} eV olarak da ifade edebilirsiniz. Ampulüm saniyede altı çeyrek milyon kere trilyon elektron volt yayıyor demek kesinlikle daha etkileyici, fakat enerji yüz watt'lık ampuldeki ile aynıdır. Tayf çizgilerini oluşturan elektron geçişlerinde söz konusu enerji birkaç eV'tur – bir hidrojen atomundan elektronu koparmak için sadece 13.6 eV gerekir. Radyoaktif işlemlerin ürettiği parçacık enerjileri birkaç milyon elektron Volttur ya da MeV.

HİDROJEN AÇIKLANIYOR

Bohr çalışmalarını Rutherford'la tartıştıktan sonra atom kuramını 1913 yılı içinde bir dizi tez olarak yayımladı. Kuram hidrojende çok güzel işe yaramıştı ve daha karmaşık atomların tayflarını açıklayacak şekilde de geliştirilebilirmiş gibi görünüyordu. Bohr eylülde Britanya Bilim Geliştirme Derneği'nin seksen üçüncü yıllık toplantısına katıldı ve zamanın en ünlü atom fizikçilerinin de bulunduğu bir dinleyici kitlesine çalışmasını anlattı. Raporu genel olarak iyi karşılandı ve Sir James Jeans bunu usta işi, ilham verici ve inandırıcı buldu. J. J. Thomson inanmayanlar arasındaydı, fakat bu toplantı sayesinde argümanların ikna edemediği bilim adamları bile Bohr'un adını ve atomlar hakkındaki çalışmasını duymuş oldu.

Planck'ın çaresizlikle kuantumu ışık kuramına katma girişiminden on üç yıl sonra Bohr kuantumu atom kuramına sokmuştur. Fakat gerçek bir kuantum kuramı ortaya çıkana kadar bir on üç yıl daha gerekti. O süre içinde gelişme sancılı bir biçimde yavaştı – iki adım ileri bir adım geri şeklindeydi ve bazen de ileri gidiyor gibi görünen her bir adımdan sonra iki adım geri atılıyordu. Bohr'un atomu karman çormandı. Bu model kuantum ilkelerini klasik fizik ilkeleriyle karıştırmış, her şeyi birbirine yamayıp modeli ayakta tutabilmek için ne tür bir karışım gerekiyorsa kullanmıştı. Farklı atomlardan gelen ışıkta gerçekte görülebilenden çok daha fazla tayf çizgisine "izin veriliyordu" ve atomun içindeki farklı enerji halleri arasındaki bazı geçişlerin "yasak" olduğunu söylemek için keyfi kurallar icat etmek zorunda kalındı. Gözlemlere uysun diye atoma *ad hoc* biçimde yeni özellikler –kuantum sayıları– eklendi, oysa bu kuantum sayılarının neden gerekli olduğunu ya da bazı geçişlerin neden yasaklandığını açıklayacak hiçbir sağlam kuramsal temel desteği yoktu. Bütün bunların tam ortasında, Bohr'un kendisinin ilk atom modelini sunduğu yılın ertesi, Avrupa dünyası I. Dünya Savaşı'nın patlak vermesiyle bölündü.

Hayatın başka bütün alanlarında olduğu gibi 1914'ten sonra bi-

lim asla eskisi gibi olmayacaktı. Savaş araştırmacıların bir ülkeden ötekine kolay geçişini durdurmuştu ve I. Dünya Savaşı'ndan beri bazı ülkelerdeki bazı bilim adamları dünyadaki bütün meslektaşlarıyla haberleşmekte güçlük çekiyorlardı. Yirminci yüzyılın başlarında fiziğin ciddi gelişme kaydetmekte olduğu büyük merkezlerdeki bilimsel araştırmalara da savaşın doğrudan etkisi dokunmuştu. Savaşan ülkelerde genç erkekler laboratuvarları terk edip savaşa gidince geriye ellerinden geleni yapmayı sürdüren Rutherford gibi eski profesörler kaldı çoğunlukla; o genç insanların birçoğu, yani 1913'ten sonra Bohr'un fikirlerini kapıp devralacak nesil çatışmalarda öldü. Tarafsız bilim adamlarının çalışmaları da savaştan etkilenmişti, ama başkalarının talihsizliğinden bir şekilde yararlanmış olanlar da vardı. Bohr'un kendisi Manchester'da Fizik Doçenti olmuştu; Göttingen'de bir Hollanda vatandaşı olan Peter Debye, X ışınlarını kullanarak kristallerin yapısı hakkında önemli çalışmalar gerçekleştirmişti. Hollanda ve Danimarka gerçekten de o sıralarda bilimsel vaha olarak kaldı ve Bohr 1916'da Danimarka'ya dönüp Kopenhag'da Kuramsal Fizik Profesörü oldu, sonra da 1920'de adını taşıyan araştırma enstitüsünü kurdu. Arnold Sommerfeld gibi bir Alman araştırmacıdan (Bohr atom modelinin pürüzlerini, modelin kimi zaman "Bohr-Sommerfeld" atomu olarak anılmasını sağlayacak ölçüde ayıklayan fizikçilerden biri) gelen haberler tarafsız Danimarka'ya geçebiliyor, oradan da Bohr'dan İngiltere'deki Rutherford'a ulaşabiliyordu. İlerleme kaydedilmeye başlamıştı, fakat eskisi gibi değildi.

Savaştan sonra Alman ve Avusturyalı bilim adamları yıllarca uluslararası konferanslara davet edilmediler; Rusya devrim çalkantısının içindeydi; bilim, bir nesil genç insanı kaybettiği gibi enternasyonalizminden de bazı şeyleri kaybetmişti. Kuantum kuramını Bohr'un karman çorman atom modelinin (gerçi pek çok araştırmacının canhıraş gayretleriyle derme çatma da olsa kayda değer ölçüde etkili bir buluşa dönüştürülmüştü) orta yerinden alıp onu anlı şanlı kuantum mekaniği haline getirme işi yepyeni bir kuşağa düşmüştü. O kuşağı oluşturan adlar modern fiziğin duvarlarında yankılanmaktadır – Werner Heisenberg, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Pas-

cual Jordan ve diğerleri. Onlar ilk kuantum kuşağının üyeleriydi, Planck'ın büyük katkısından sonraki yıllarda (Pauli 1900, Heisenberg 1901, Dirac ve Jordan 1902) doğup büyümüş ve bilimsel araştırmalara 1920'lerde başlamışlardı. Alt etmeleri gereken kemikleşmiş bir klasik fizik eğitimi almamışlardı ve dahası, Bohr gibi parlak bir bilim adamının bile duyduğu o ihtiyacı, yani kurdukları atom kuramlarında klasik fikirlerden de bir çeşni bulundurmak için yarım yamalak yöntemlere başvurma ihtiyacını duymuyorlardı. Planck'ın kara cisim denklemini keşfinden kuantum mekaniğinin serpilip gelişmesi arasında geçen sürenin sadece yirmi altı yıl olması son derece manidardı ve belki de tesadüf değildi. Bu yeni bir fizikçi kuşağının araştırmacı bilim adamı olmaları için gereken süreydi. Ne var ki o neslin elinde, Planck sabitinin yanı sıra, hâlâ faal olan büyüklerinden kalma iki büyük miras vardı. Bunların ilki, atom süreçleriyle ilgili dişe dokunur her kurama kuantum ilkelerinin sokulmak *zorunda* olduğunu açıkça gösteren Bohr atomuydu. İkincisi zamanın büyük bilim adamından geliyordu; klasik fizik ilkeleriyle eli kolu bağlanmışa hiç benzemeyen, bütün kuralların istisnası olan birinden. Savaşın dorukta olduğu 1916'da Almanya'da çalışan Einstein atom kuramına olasılık fikrini sokmuştu. Bunu iş görülsün diye yapmıştı – Bohr atomunun işleyişini gerçek atomların gözlemlenen davranışlarına benzeten karman çorman modele bir katkı daha. Fakat bu, iş görülsün diye uydurulan çıkar yol Bohr atomundan daha uzun ömürlü olup gerçek kuantum kuramının temel taşı olmuştur – gerçi, bu arada, ironik bir biçimde, Einstein'ın kendisi daha sonraları kuantum kuramını şu ünlü yorumuyla reddetmiştir: "Tanrı zar atmaz."

ŞANS UNSURU: TANRI'NIN ZARLARI

Ta 1900'lerde, Rutherford ve meslektaşı Frederick Soddy radyoaktifliğin doğasını araştırırlarken atomun, daha doğrusu atom çekirdeğinin tuhaf ve temel bir özelliğini keşfetmişlerdi. Sonradan verilen adıyla radyoaktif "bozunma" tek bir atomda köklü bir değişime se-

bep olmak zorundaydı (artık bunun çekirdeği parçalamak ve çekirdeğin parçalarını dışarı fırlatmak demek olduğunu biliyoruz), fakat herhangi bir dış etkenden etkilenmiyor gibiydi. Atomları ısıtın ya da soğutun, ister havası alınmış bir ortama koyun ister bir kova suya, radyoaktif bozunma süreci etkilenmeden devam eder. Radyoaktif bir maddenin belli bir atomunun bir alfa ya da beta parçacığı ve gama ışınları yayarak ne zaman bozunacağını önceden tam olarak bilmek imkânsız görünüyordu, fakat deneyler göstermiştir ki aynı elementin çok sayıdaki radyoaktif atomu belli bir oranda ve belli bir zaman sonra bozunuyor. Özellikle de, her radyoaktif element için yarı ömür denilen belli bir zaman dilimi vardır ve bu zaman içinde bir numunedeki atomların tamı tamına yarısı bozunur. Mesela radyumun 1600 yıllık yarı ömrü vardır; karbonun radyoaktif biçimi olan karbon-14'ün yarı ömrü 6000 yılın biraz altındadır, bu da arkeolojide tarih belirlemede çok işe yarar; radyoaktif potasyum da 1300 milyon yıllık bir yarı ömürle bozunur.

Rutherford ve Soddy, haddi hesabı olmayan onca atomun arasında, komşuları hiçbir şey olmadan dururken neden bir atomun parçalandığını bilmeksizin bu keşfi, radyoaktif bozunmayla ilgili istatistiksel kuramın temeli olarak kullandılar. Bu kuram sigorta şirketlerinin kullandığı türden istatistik teknikleri kullanır. Sigorta şirketleri sigortaladıkları insanlardan bazılarının genç yaşta öleceğini ve vârislerinin ödenmiş primlerden çok daha fazlasını alacağını bilseler de öteki müşteriler yeterince uzun yaşayıp yeterince prim ödeyerek bu durumu telafi edecektir. İstatistik hesap tabloları hangi müşterinin ne zaman öleceğini bilmeksizin muhasebecilerin bütçeyi denkleştirmelerini sağlar. Aynı şekilde istatistik tabloları fizikçilerin de radyoaktif bozunma hesabını denkleştirmesine yarar, tabii çok sayıda atomu ele almaları şartıyla.

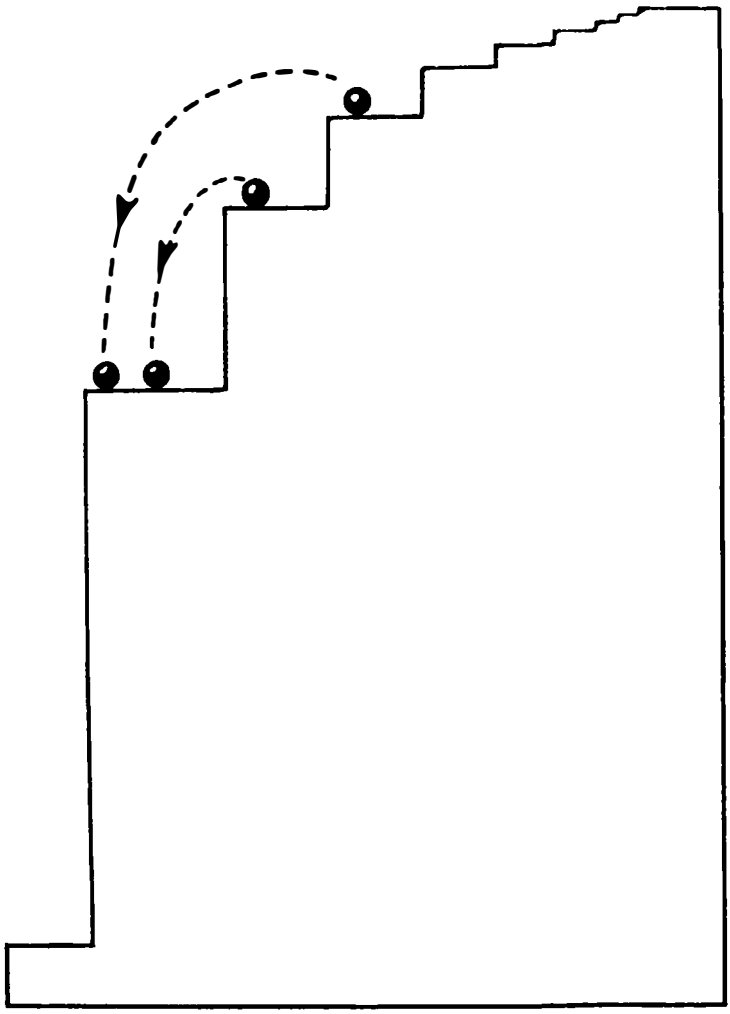
Bu davranışın şöyle garip bir özelliği var ki radyoaktiflik radyoaktif madde numunesinden hiçbir zaman tam olarak gitmez. Mevcut milyonlarca atomdan yarısı belli bir zamanda bozunur. Sonraki yarı ömürde –tamı tamına aynı süre– kalanın yarısı bozunur ve bu böyle devam eder. Numunede kalmış olan radyoaktif atomların sayısı gittikçe azalır, gittikçe sıfıra yaklaşır, fakat sıfıra giden her adım

oraya giden yolun hep yarısını alır.

O ilk zamanlarda Rutherford ve Soddy gibi fizikçiler sonunda birisinin o tek bir atomun neden bozunduğunu bulacağını hayal ediyorlardı ve bu keşif de sürecin istatistiksel doğasını açıklayacaktı. Einstein istatistiksel teknikleri alıp atom tayfının ayrıntılarını açıklamak için Bohr modeline uyguladığında o da sonraki keşiflerin "istatistik hesap tabloları"na ihtiyacı ortadan kaldıracağını öngörüyordu. Hepsi yanılmıştı.

Bir atomun ya da atomun içindeki bir elektronun enerji seviyeleri bir dizi merdiven basamağı olarak düşünülebilir. Basamakların her birinin derinliği enerji bakımından eşit değildir – yukarıdaki basamaklar alttakilere göre birbirlerine daha yakındırlar. Bohr en basit atom olan hidrojende enerji seviyelerinin bir merdivendeki gibi temsil edilebileceğini göstermiştir. Merdivenin tepesinden aşağı doğru her basamak $1/n^2$ ile orantılıdır, burada n aşağıdan yukarıya doğru her basamağın numarasıdır. Merdivende birinci seviyeden ikinci seviyeye geçiş bir elektronun o basamaktan yukarı çıkmak için ihtiyacı olan hv enerji miktarını almasını gerektirir; eğer elektron birinci seviyeye (atomun "temel durum"una) geri düşerse o zaman aynı miktardaki enerjiyi açığa çıkarır. Temel durumdaki elektronun daha az enerji soğurabilmesi mümkün değildir çünkü üzerinde durabileceği ara basamak yoktur; ayrıca ikinci seviyedeki elektronun da bu kuantum enerjisinden daha fazlasını yayması mümkün değildir çünkü onun da temel durumdan daha aşağısına atlayabilecek bir yeri yoktur. Elektronun barınabileceği pek çok basamak olduğundan ve herhangi bir basamaktan başka herhangi birine inip çıkabileceğinden her elementin tayfında pek çok çizgi vardır. Her çizgi basamaklar arasındaki –farklı kuantum numaralı enerji seviyeleri arasındaki– bir geçişi temsil eder. Mesela temel durumda son bulan bütün geçişler Balmer serisindeki gibi bir tayf çizgisi ailesi üretir; yukarıdaki basamaklardan ikinci basamakta son bulan bütün geçişler başka bir grup çizgiye karşılık gelir ve bu böyle devam eder.[14]

14. Aslında hidrojen tayfındaki Balmer serisi, ikinci seviyede son bulan geçişlere karşılık gelir.



Şekil 4.1 Hidrojen gibi basit bir atomun enerji seviyeleri, yükseklikleri farklı olan bir dizi basamağa benzetilebilir. Farklı basamaklara yerleştirilen bir top atomdaki farklı enerji seviyelerindeki bir elektronu temsil eder. Yukarıdaki bir basamaktan aşağıdaki bir basamağa inmek belli bir enerji miktarının açığa çıkmasına karşılık gelir. Bu da hidrojen atomunda tayftaki Balmer serilerinin çizgilerine sebep olan şeydir. Ara çizgiler yoktur çünkü elektronun üzerinde "dinleneceği" ara "basamak" yoktur.

Sıcak bir gazda atomlar durmadan birbirleriyle çarpışırlar, öyle ki, elektronlar uyarılıp yüksek enerji seviyelerine çıkar ve tekrar geri düşerler. Bunu yaparken de parlak tayf çizgileri yayarlar. Işık soğuk bir gazdan geçerken temel durumdaki elektronlar yüksek enerji seviyelerine çıkarılırlar, bunu yaparken de ışığı soğurup tayfta karanlık çizgiler bırakırlar.

Eğer Bohr atom modelinin bir anlamı vardıysa, sıcak atomların nasıl enerji yaydıklarına dair bu açıklama Planck yasasıyla örtüşmeliydi. Oyuk ışımasının kara cisim tayfı, elektronlar bir enerji seviyesinden ötekine sıçrarken pek çok atomun yaydığı enerjinin birleşik etkisinden ibaret olmalıydı.

Einstein 1916'da Genel Görelilik Kuramı'nı tamamlamış ve dikkatini bir kere daha kuantum kuramına çevirmişti (başyapıtıyla kıyaslandığında bu yanında çerez kalmıştır). Muhtemelen Bohr atom modelinin başarısından cesaret almıştı, yine o sıralarda kendi geliştirdiği ışığın tanecik kuramı versiyonu en nihayet zemin kazanmaya başlamıştı. Amerikalı fizikçi Robert Andrews Millikan, Einstein'ın fotoelektrik etkisi yorumuna ta 1905'te ilk çıktığında en güçlü muhalefeti gösterenlerden biriydi. Bu fikri bir dizi olağanüstü deneyle test ederek on yıl geçirmiştir. İşe Einstein'ın yanıldığını kanıtlamak için başlamış, ama 1914'te Einstein'ın fotoelektrik etkiyi ışık kuantasıyla, yani fotonlarla açıklamasının doğruluğunu doğrudan deneyle kanıtlamıştır. Bu süreçte h değerini deneyle çok hassas biçimde belirlemiş ve 1923'te de bu çalışmasından ve elektron üzerindeki yükün ölçümünden dolayı Nobel Ödülü alarak bu durumdaki komik tezadı iyice pekiştirmiştir.

Einstein bir atomun –elektronun yüksek bir enerji seviyesinde olduğu– "uyarılmış" enerji durumundan –elektronun daha düşük bir enerji seviyesinde olduğu– daha az enerjili bir duruma geçerek bozunmasının atomun radyoaktif bozunmasına çok benzediğini fark etmişti. Tek tek enerji durumlarını ele almak için Boltzmann'ın (atom kümelerinin davranışlarını ele almak için) geliştirdiği istatistik tekniklerini kullandı. Belli bir atomun belli bir kuantum sayısına (n) karşılık gelen bir enerji durumunda bulunacağı olasılığı üzerinde çalışıyordu ve radyoaktifliğin olasılıkla ilgili "istatistiksel he-

sap tablosu"nu *n* durumundaki bir atomun daha az enerjili (yani düşük kuantum sayılı) başka bir enerji durumuna bozunma ihtimalini bulmak için kullanmıştı. Bütün bunlar açıkça ve anlaşılır bir şekilde meseleyi Planck'ın, tamamen kuantum ilkeleri üzerine dayanılarak türetilmiş olan kara cisim ışıması formülüne götürmüştür. Bohr çok geçmeden kendi atom modelini Einstein'ın istatistiksel fikirlerini kullanarak geliştirmeyi başardı. Tayftaki bazı çizgilerin ötekilerden daha belirgin olduğunu, çünkü enerji durumları arasından bazı geçişlerin daha muhtemel olduğunu söylüyordu. Bunun *neden* böyle olmak zorunda olduğunu açıklayamadı, fakat o sıralarda zaten kimse bunu pek dert etmiyordu.

O günlerde radyoaktifliği inceleyen insanlar gibi Einstein da istatistiksel hesap tablosunun son söz olmadığı ve sonraki araştırmaların belli bir geçişin neden başka bir zamanda değil de tam olarak o zamanda meydana geldiğini açıklığa kavuşturacağı kanaatindeydi. Fakat işte tam da bu noktada kuantum kuramı klasik ilkelerle bağını koparmaya başlamış ve radyoaktif bozunmanın ya da atom düzeyindeki enerji geçişlerinin "altında yatan" hiçbir "sebep" bulunamamıştı. Gerçekten de görünüşe bakılırsa bu değişimler tamamen tesadüfen, istatistiksel olarak meydana geliyor ve bu da çoktan temel felsefi soruları gündeme getirmeye başlıyordu.

Klasik dünyada her şeyin bir sebebi vardır. Her olayın sebebinin izini zamanda geriye giderek takip edebilirsiniz. Sebebi yaratan sebebi, onu yaratan sebebi ve (eğer evren bilimciyseniz) ta Büyük Patlama'ya kadar, yok eğer kafanıza yatan model dini bir mahiyet taşıyorsa da Yaradılış anına kadar böyle gidebilirsiniz. Fakat kuantum dünyasında radyoaktif bozunmaya ve atom düzeyindeki geçişlere bakar bakmaz böyle doğrudan bir nedensellik ortadan kalkıyor. Elektron bir enerji seviyesinden ötekine belli bir zamanda ve belli bir sebeple geçmiyor. Düşük enerji seviyesi istatistiksel açıdan atom için daha arzu edilir bir şey, o yüzden de elektronun er ya da geç böyle bir geçiş yapması oldukça muhtemeldir (ne kadar muhtemel olduğu da niceliksel olarak belirlenebilir). Fakat geçişin ne zaman meydana geleceğini söylemenin bir yolu yok. Ne dışardan elektronu iten bir etken, ne de içte işleyip sıçramayı zamanlayan bir saat var.

Oluyor işte, durduk yere, o zaman olmuyor da, bu zaman oluyor.

Bu, katı nedensellikle bağları pek koparmıyor ve pek çok on dokuzuncu yüzyıl bilim adamı bundan dehşete kapılmış olsalar da bu kitabın okurlarının fazla endişeye kapıldığını sanmam. Bu sadece buzdağının ucu, kuantum dünyasının gerçek tuhaflığını gösteren ilk ipucu ve önemi zamanında fark edilmemiş olsa da dikkate değer. Bu ipucu da 1916'da geldi, hem de Einstein'dan.

EĞRİSİYLE DOĞRUSUYLA ATOMLAR

Bohr atom modeli üzerinde 1926 yılına kadar yapılan bütün inceltimleri ayrıntılarıyla anlatmak sıkıcı olurdu, hele hele bütün bu zahmetin sonunda ortaya koyulacak şey, gerçeği bulmak için yapılan bu çırpınışların çoğunun zaten yanlış olduğundan ibaretse. Fakat Bohr atomu ders kitaplarına ve popüler kitaplara öyle sıkı sıkıya yapışmış ki göz ardı edilemez, ayrıca son haliyle, bizim gündelik hayatta alıştığımız imgelerle benzerlik taşıyan son atom modelini temsil ediyor gene de. Antik dönemin bölünemez bilardo topu şeklindeki atomunun, sadece bölünebilirliği değil aynı zamanda büyük kısmının boş olduğu ve içinde tuhaf parçacıkların tuhaf şeyler yaptığı da kanıtlanmıştır. Bohr bu tuhaf şeylerin bir kısmını gündelik hayattakine benzer bir çerçeveye oturtmuştu; kuantum dünyasına tümden dalış yapmadan önce bütün gündelik hayat fikirlerinden kurtulmak bazı açılardan iyi olsa da çoğu insan bu dalıştan önce bir an durup Bohr modelini incelemekten mutlu oluyor gibi. Klasik fizikle kuantum kuramının arasında bir yerdeyken, o meçhul topraklara geçmeden önce şöyle durup biraz soluklanalım. Fakat Bohr modelinin ve çekirdeğin 1926'ya kadarki yamalı bohçavari gelişme sürecindeki hatalar ve yarı doğruların izini sürerek zaman ve enerji kaybetmeyelim. Bunun yerine Bohr atomuna ileriden dönüp bakmak, Bohr'un ve çalışma arkadaşlarının fikirlerinin (yapbozun ancak çok sonraları yerine oturan parçaları da dahil) bir tür modern

sentezini tarif etmek için 1980'lerdeki perspektifi kullanacağım.

Atomlar çok küçüktür. Avogadro numarası, hidrojen gazının bir gramındaki atom sayısıdır. Ne var ki hidrojen gazı gündelik hayatta her gün karşımıza çıkan bir şey değildir, o yüzden gelin atomların ne kadar küçük oldukları hakkında bir fikir edinmek için bir parça karbonu ele alalım – kömür, elmas ya da kurum. Her karbon atomu hidrojen atomundan on iki kat daha ağır olduğu için bir gramlık hidrojendeki atom sayısı kadar karbon atomu on iki gram gelir. Bir kaşık şeker, büyükçe bir elmas, oldukça küçük bir kömür parçası on beş gram civarında gelir. Bu da Avogadro numarası 6×10^{23} (6'dan sonra 23 sıfır) kadar atomu olan karbon parçasının ağırlığını verir. Bu sayıyı nasıl bir perspektife yerleştirebiliriz? Devasa büyüklükteki rakamlara genellikle "astronomik" denir ve pek çok astronomik rakam gerçekten büyüktür, o zaman gelin astronomide buna karşılık gelecek büyüklükte bir rakam bulmaya çalışalım.

Astronomların kanaatine göre evrenin yaşı kabaca 15 milyar yıl, 15×10^9 yıl. Tabii ki 10^{23} rakamı 10^9'dan çok daha büyük. Şimdi evrenin yaşını daha da büyük bir rakamla ifade edelim. Daha aşina olduğumuz en küçük zaman birimine, saniyeye dönüştürelim. Bir yılda 365 gün vardır, bir günde 24 saat, bir saatte de 3600 saniye. Yuvarlak olarak bir yılda 32 milyon saniye vardır, o da yaklaşık 3×10^7 sn. yapar. Buradan da 10^9 ve 10^7 gibi sayıları çarparken uyguladığımız üsleri toplama kuralını takiben 15 milyar yılın içinde 45×10^{16} saniye olduğunu buluruz. Yine yuvarlarsak evrenin saniye cinsinden yaşı 5×10^{17} yapar.

Ama bu da hâlâ 6×10^{23}'ten çok geride kaldı – on'un altıncı kuvveti kadar eksik. Ama elimizde on'un 23'üncü kuvveti olunca durum pek kötü sayılmaz, fakat bu ne anlama geliyor? 6×10^{23}'ü 5×10^{17}'e bölünce, üsleri çıkararak 1×10^6'dan, yani bir milyondan biraz daha büyük bir rakam buluruz. Doğaüstü bir varlığın evrenimizi doğmaya başladığı Büyük Patlama'dan bu yana seyrettiğini hayal edin. Bu varlığın elinde yarım onsluk saf karbon olsun ve bu kütleden tek tek atomları çekecek kadar hassas bir de cımbızı olsun. Evrenimizi doğuran Büyük Patlama'nın başlangıç anından başlayarak bu varlık kütleden her saniye bir atomu çıkarıp atsın. Şimdiye kadar 5×10^{17}

adet atom çıkarılıp atılmış olurdu; geriye ne kadarı kalırdı? O kadar uğraşıp 15 milyar yıl hiç durmadan çalıştıktan sonra doğaüstü varlık karbon atomlarının ancak *milyonda birini* atmış olurdu; kütle içinde kalanların sayısı hâlâ atılanların bir milyon katı yapıyor.

Belki şimdi bir atomun ne kadar küçük olduğu hakkında bir fikriniz olmuştur. Şaşılacak şey Bohr atom modelinin eğreti bir tahmin olması ya da gündelik fizik kurallarının atomlarda işlememesi değil. Buradaki mucize, atomlar hakkında bir şeyler anlamamız ve klasik Newton fiziğiyle kuantum fiziği arasındaki gediği doldurma yolları *bulabilmemizde* yatıyor.

O kadar minik bir şeyin fiziksel resmini inşa etmek mümkünse, işte atom buna benziyor. Rutherford'un gösterdiği gibi, merkezdeki minik bir çekirdeğin etrafı elektron bulutuyla çevrilidir, elektronlar arı gibi çekirdeğin etrafında vızıldayıp dururlar. Önce çekirdeğin sadece protonlardan oluştuğu sanılıyordu. Her birinde elektronun negatif yüküyle aynı büyüklükte pozitif yük vardı, böylece eşit sayıdaki proton ve elektron her atomu elektriksel olarak yüksüz yapıyordu; daha sonraları protona çok benzeyen ama elektrik yükü olmayan başka temel bir atom parçacığının daha olduğu çıktı ortaya. Bu da nötrondur, hidrojenin en basit hali hariç bütün atomlarda çekirdekte protonlar gibi nötronlar da vardır. Fakat yüksüz atomlarda gerçekten de elektron sayısı kadar proton vardır. Çekirdekteki proton sayısı, atomun hangi elementin atomu olduğunu belirler; buluttaki elektron sayısı (proton sayısıyla aynıdır) o atomun ve elementin kimyasal özelliğini belirler. Fakat birbirleriyle aynı sayıda proton ve elektrona sahip bazı atomların farklı sayıda nötronları olabileceğinden kimyasal elementler izotop denilen farklı türlerde bulunurlar. Bu ismi 1913'te Soddy bulmuştur, Yunancada "aynı yer" anlamına geliyor. Zira farklı ağırlıktaki atomların periyodik cetveldeki kimyasal özellikler tablosunda aynı yerde bulunabileceği keşfedilmişti. Soddy izotoplar hakkında yaptığı çalışmalardan dolayı 1921'de Nobel (kimya) Ödülü almıştır.

En basit elementin en basit izotopu hidrojenin en yaygın biçimidir, yani bir proton ve bir elektron bulundurur. Döteryumda her bir atom bir proton *ve* bir nötron ile bir elektron bulundurur, fakat kim-

yasal özelliği sıradan hidrojeninkiyle aynıdır. Nötronlar ve protonların kütlesi birbiriyle neredeyse aynı olduğu için ve de her biri bir elektrondan kütlece 2000 kat daha büyük olduğu için, bir çekirdekteki toplam proton sayısıyla nötron sayısının toplamı atomun küçük bir kısmı dışında bütün kütlesini belirler. Bu, genellikle *A* sayısıyla gösterilir ve buna kütle numarası adı verilir. Çekirdekteki elementin özelliklerini belirleyen proton sayısına atom numarası Z denir. Atom kütlelerinin ölçüldüğü birime gayet mantıklı olarak atom kütle birimi denir ve çekirdeğinde altı nötron ve altı proton bulunan karbon izotopunun kütlesinin on ikide biri olarak tanımlanır. Bu izotopa karbon-12 denir ya da standart yazıldığı şekliyle ^{12}C; öteki izotoplar ^{13}C ve ^{14}C'dir ve sırasıyla çekirdeklerinde yedi ve sekiz nötron bulundururlar.

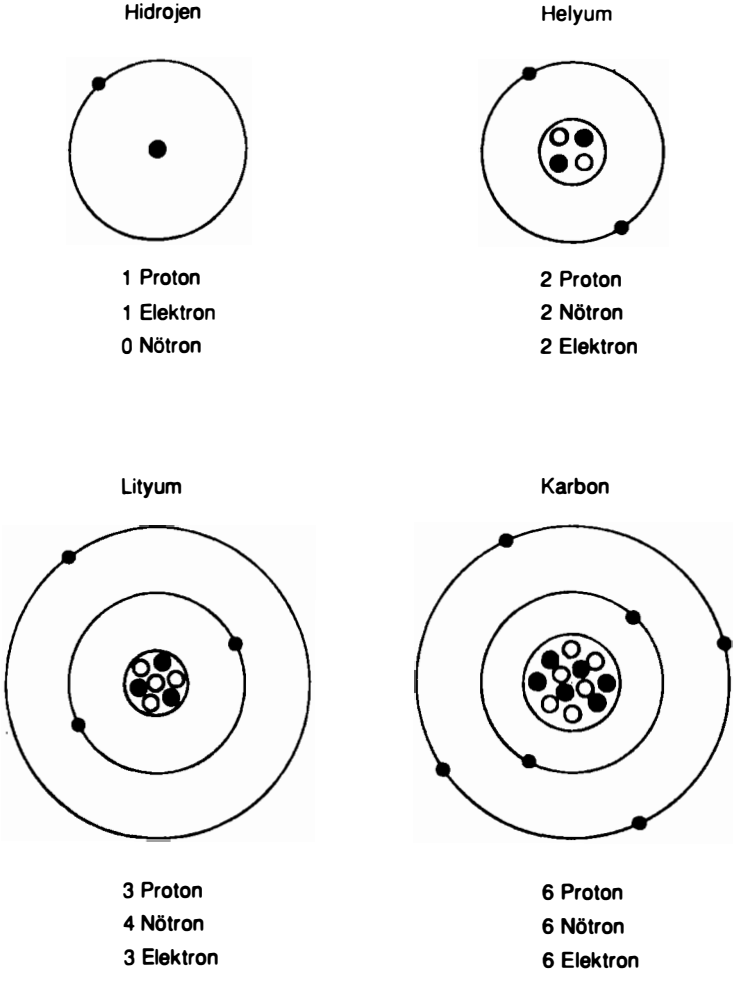
Çekirdeğin kütlesi ne kadar büyükse (ne kadar çok protonu varsa) o kadar çok izotop çeşidi vardır. Mesela kalayın çekirdeğinde 50 proton bulunur ($Z = 50$) ve kütle numarası $A = 112$'den (62 proton) başlayıp $A = 124$'e (74 nötron) kadar uzanan kararlı on izotopu vardır. Kararlı çekirdeklerde daima en az proton sayısı kadar nötron bulunur (en basit hidrojen atomu hariç); yüksüz nötronlar birbirini itme eğiliminde olan protonları bir arada tutarlar. Radyoaktiflik, ışıma yayarak kararlı hale gelen kararsız izotoplara bağlanır. Beta ışını, bir nötronun protona dönüşürken fırlattığı bir elektrondur; alfa parçacığı başlı başına bir atom çekirdeğidir, kararsız bir çekirdek iç yapısını ayarlarken fırlatılan iki proton ve iki nötrondan oluşur (helyum-4'ün çekirdeği); kütlesi çok büyük kararsız çekirdekler artık gayet iyi bilinen nükleer parçalanma ya da atom parçalanması işlemiyle daha hafif, kararlı iki ya da daha fazla çekirdeğe bölünür ve bu tertipten aynı zamanda alfa ve beta parçacıkları da ortaya çıkar. Bütün bunlar tahayyül edilemez küçüklükteki atomun kendisinden de tahayyül edilemez küçüklükteki bir hacimde olup biter. Tipik bir atomun yarıçapı yaklaşık 10^{-10} metredir; çekirdek de yaklaşık 10^{-15} m yarıçapındadır, atomdan 10^5 kere daha küçüktür. Hacim yarıçapın küpü şeklinde gittiği için üssü üçle çarparak çekirdeğin hacminin atomun hacminden 10^{15} kere daha küçük olduğunu buluruz.

KİMYA AÇIKLANIYOR

Elektron bulutları atomun dış görünüşünü ve başka atomlarla etkileşme şeklini sağlar. Elektron bulutunun ta kalbine gömülü olan şey büyük ölçüde önemsizdir – başka bir atomun "gördüğü" ve "hissettiği" şey elektronların kendisidir, kimyayı açıklayan şey de elektron bulutlarının arasındaki etkileşimdir. Bohr atom modeli elektron bulutunun genel özelliklerini açıklayarak kimyayı bilimsel bir zemine oturtmuştur. Kimyagerler, bazı elementlerin farklı atom ağırlıklarına sahip olmalarına rağmen kimyasal özellikler bakımından birbirlerine çok benzediklerini zaten biliyorlardı. Elementler bir tabloda atom ağırlıklarına göre sıralandıklarında (özellikle de farklı izotoplara yer verildiğinde) bu benzer elementler düzenli aralıklarla ortaya çıkarlar, mesela sekiz atom numarası aralıkla tekrar eden elementler. Elementler benzer özelliklerine göre gruplandığında bu tabloya ya da cetvele "periyodik" adını veren de budur.

Haziran 1922'de Bohr kuantum kuramı ve atom yapısı hakkında bir dizi konferans vermek için Almanya'daki Göttingen Üniversitesi'ni ziyaret etti. 1921'de orada Kuramsal Fizik Profesörü olmuş Max Born'un yönetimindeki Göttingen, kuantum mekaniğini son haline getiren üç kilit merkezden biri olma yolundaydı. Max Born 1882'de doğmuştu, Breslau Üniversitesi'ndeki anatomi profesörünün oğluydu ve Planck'ın fikirlerinin ilk ortaya çıktığı sıralarda, yani 1900'lerin başlarında öğrenciydi. Önce matematik çalışmıştı ve fiziğe (Cavendish'de de bir süre çalışmıştı) 1906'da bitirdiği doktorasından sonra dönmüştü. Bu, birazdan da göreceğimiz gibi, sonraki yıllar için ideal bir eğitim olmuştur. Bohr'un parlak içgörüler ve fizik sezgileriyle inşa edilmiş, fakat matematiksel ayrıntılar üzerinde durmayan yamalı bohça kuramsal yapıtlarıyla çarpıcı bir tezat oluşturacak biçimde, görelilik konusunda uzman olan Born'un çalışmaları, matematiksel açıdan her zaman son derece güçlü olmuştur. Atomların yeni kavranışı için bu iki tür deha da elzemdi.

Bohr'un Haziran 1922'de verdiği konferanslar, savaştan sonra



Şekil 4.2 Bazı en basit elementlerin atomları, pratik amaçlar için, çekirdeğin etrafını enerji seviyesi merdiveninin basamaklarına karşılık gelen kabuklar halinde çevrelemiş elektronlarla gösterilebilir. Kuantum kuralı en alt basamakta sadece iki elektrona izin verir, bu yüzden üç elektronlu lityum onlardan birini enerji merdiveninde yukarıya bir sonraki basamağa koymak zorundadır. Bu ikinci kabuğun sekiz elektron sığacak kadar "yeri" vardır, mesela karbonun, bu kabuğunun tam yarısı dolu olduğu için hayatın temeli olmasını sağlayan ilginç kimyasal özellikleri vardır.

Alman fiziğinin yenilenmesinde ve kuantum kuramı tarihinde önemli bir olaydı. Konferanslara Almanya'nın dört bir yanından bilim adamları katıldı ve bu konferanslar (Almanların kutladıkları öteki meşhur günlere istinaden, pek incelikli olmayan bir kelime oyunuyla) "Bohr Festivali" olarak anıldı. Bohr o konferanslarda dayanacağı zemini özenle hazırladıktan sonra elementlerin periyodik cetvelinin ilk başarılı kuramını sunmuştur. Bu kuram özü itibariyle bugüne kadar aynı biçimiyle gelmiştir. Bohr'un düşüncesi atomun çekirdeğine eklenen elektronlar tablosundan kaynaklanmıştır. O çekirdeğin atom numarası her ne olursa olsun ilk elektron hidrojenin temel durumuna karşılık gelen bir enerji seviyesine gidecekti. Sonraki elektron benzer bir enerji seviyesine gidecekti, bunu yaparken iki elektronu olan helyum atomuna benzer bir dış görünüş oluşturacaktı. Fakat, diyordu Bohr, atomun o seviyesinde başka elektronlar için yer yoktur, o yüzden sonradan eklenecek elektron başka bir enerji seviyesine gitmek zorundadır. Buna göre, çekirdeğinde üç proton ve çekirdeğin dışında üç elektronu olan bir atomun elektronlardan ikisini çekirdeğe daha sıkı bağlaması ve birini de bırakması gerekir; kimyasal açıdan adeta tek-elektronlu bir atom (hidrojen) gibi davranması gerekir. $Z=3$ elementi lityumdur ve gerçekten de hidrojene benzer bazı kimyasal özellikler gösterir. Periyodik cetvelde kimyasal özellikler bakımından lityuma yakın olan bir sonraki element $Z=11$ ile lityumdan sekiz sonraki sodyumdur. Bundan dolayı Bohr içteki iki elektronun dışında kalan enerji seviye grupları arasında sekiz yerin olması gerektiğini savunuyordu ve bunlar da dolunca, bir sonraki elektron, yani toplam on birinci, çekirdeğe daha da az bağlı başka bir enerji seviyesine gidecekti ve yine tek elektronlu bir atomun dış görünüşünü taklit edecekti.

Bu enerji seviyelerine "kabuk" denir ve Bohr'un periyodik tablo açıklaması Z arttıkça kabukların elektronlarla art arda dolmasını içeriyordu. Bu kabukları bir soğandaki birbiri üstüne sarılmış kabuklar gibi düşünebilirsiniz; kimya açısından önemli olan en dış kabuktaki elektron sayısıdır. Daha derinlerde olup bitenler atomun diğer atomlarla etkileşimi açısından ancak ikinci derecede bir rol oynar.

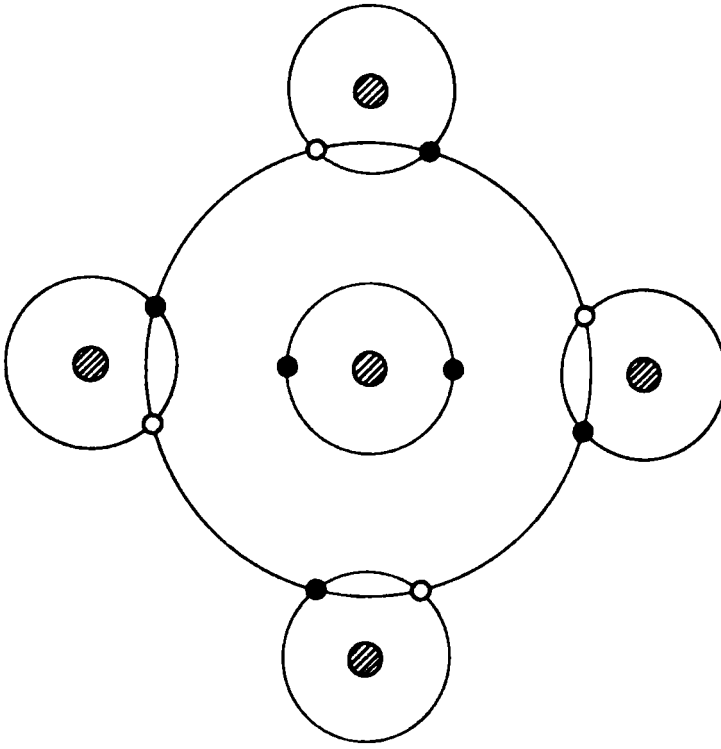
Bohr elektron kabuklarından dışa doğru çalışarak ve tayf ölçü-

münde elde edilen bütün delilleri birleştirerek periyodik tablodaki elementlerin arasındaki ilişkileri atom yapısı açısından açıklamıştır. Sekiz elektron taşıyan kabuğun neden dolu ("kapalı") olması gerektiği hakkında bir fikri yoktu, fakat dinleyicilerinin hiçbirinin kafasında temel hakikati bulduğuna dair kuşkuya yer bırakmamıştır. Heisenberg'in daha sonra dediği gibi, Bohr "matematiksel olarak herhangi bir şey ispat etmemişti... sadece bağlantının üç aşağı beş yukarı böyle bir şey olduğunu biliyordu."[15] Einstein da 1949'da *Autobiographical Notes*'da Bohr'un kuantum kuramına dayalı çalışmasının başarısını yorumlarken şöyle söylüyordu: "bu güven telkin etmeyen ve çelişik temelin, Bohr gibi emsalsiz bir içgüdü ve anlayış sahibi birinin, tayf çizgilerinin ve atomların elektron kabuklarıyla ilgili temel yasalarını ve de bunların kimya için taşıdıkları önemi keşfetmesine yetmiş olması bana bir mucize gibi gelmişti – bugün de hâlâ bir mucize gibi gelmektedir.[16]

Kimya, atomların nasıl tepkimeye girip birleşerek molekül oluşturduklarıyla ilgilenir. Karbon neden hidrojenle tepkimeye girip dört hidrojen atomuyla birleşerek bir metan molekülü oluşturur? Neden hidrojen iki atom halinde birleşip molekül oluştururken helyum atomları molekül oluşturmaz? Böyle şeyler. Cevaplar şaşırtıcı bir basitlikle kabuk modelinden geldi. Her hidrojen atomunda bir elektron vardır, oysa helyumda iki tanedir. İki tane olsaydı "en içteki" kabuk dolu olurdu ve (bilinmeyen bir sebepten) dolu kabuklar daha kararlıdır – atomlar dolu kabukları "severler". İki hidrojen atomu bir molekül oluşturmak için bir araya geldiğinde iki elektronlarını öyle bir şekilde paylaşırlar ki her ikisi de kapalı kabuk denen nimetten yararlanır hale gelir. Zaten dolu bir kabuğu olan helyum bu tür tekliflere kapalıdır ve herhangi bir şeyle kimyasal tepkimeye girmeye tenezzül etmez.

Karbonun çekirdeğinde altı proton, dışında da altı elektron vardır. Bunlardan ikisi kapalı iç kabuklardadır, dördü de sonraki kabuktadır, yani bu kabuğun yarısı doludur. Dört hidrojen atomunun

15. Aktaran Mehra ve Rechenberg, cilt 1, s. 357.
16. *A.g.y.*, s. 359.



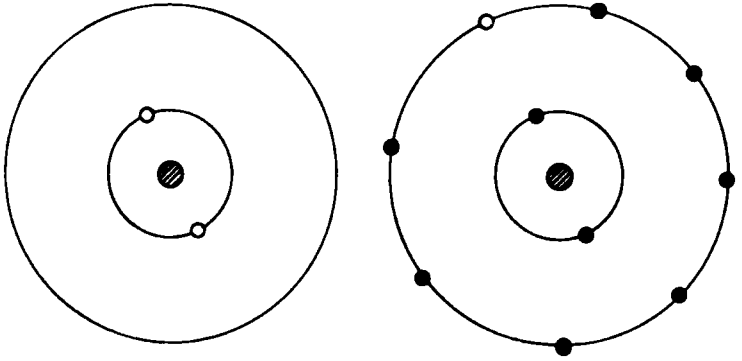
Şekil 4.3 Bir karbon atomu dört hidrojen atomuyla birleşince elektronlar öyle bir şekilde paylaşılır ki, her bir hidrojen atomunun sanki tam dolu bir iç kabuğu (iki elektron) varmış gibi olur ve her bir karbon atomu da ikinci kabuğunda sekiz elektron "görür". Bu çok kararlı bir konfigürasyondur.

her biri dört dış karbon elektronundan birini paylaşmak ve kendi elektronunu da paylaşıma katmak isteyebilir. Her bir hidrojen atomu iki iç elektronlu sözde-kapalı kabuğa, her bir karbon atomu da sekiz elektronlu sözde-kapalı ikinci kabuğa kavuşabilir.

Bohr atomların kapalı bir dış kabuk oluşturabilmek için mümkün olduğunca birbirlerine yaklaşacak şekilde birleştiklerini söylüyordu. Bazen, hidrojen molekülünde olduğu gibi, bir elektron çiftinin iki çekirdek tarafından paylaşıldığını düşünmek en iyisidir; öte-

ki durumlarda, dış kabuğunda tek bir elektronu olan (mesela sodyum) bir atomun dış kabuğunda yedi elektron olup bir boşluğu olan (bu durumda klor olabilir) atoma elektronunu verdiğini gözünüzde canlandırmak uygun olabilir. Atomların her biri mutludur – sodyum bir elektron kaybetmiştir ama daha derinde, dolmuş, "görünebilir" bir kabuğu olmuştur; klor bir elektron kazanıp en dış kabuğunu doldurmuştur. Ne var ki net sonuç, sodyum atomunun bir birimlik negatif yük kaybederek pozitif yüklü bir iyon, klorun da negatif yüklü bir iyon haline gelmiş olmasıdır. Zıt yükler birbirini çektiğinden bu iki atom birbirine kenetlenip elektrik yükü olmayan bir sodyum klorür (sofra tuzu) molekülünü oluşturur.

Bütün kimyasal tepkimeler bu şekilde, dolu elektron kabuklarının kararlılığını elde etmek amacıyla atomlar arasında yapılan elektron paylaşımı ya da değiş tokuşu olarak açıklanabilir. Dış elektronları içeren enerji geçişleri bir elementin özelliğini gösteren tayf parmak izlerini üretir, fakat iç kabukları içeren enerji geçişlerinin (do-



Şekil 4.4 Sodyum atomu dıştaki tek elektronunu vererek arzu edilen bir kuantum mekaniği konfigürasyonu sağlayıp pozitif yüklü kalır. Klor fazladan bir elektron kabul ederek dış kabuğunu sekiz elektronla doldurur ve negatif yüklenir. Bu yüklü iyonlar elektrostatik güçlerle bir arada tutularak sofra tuzu (NaCl) molekülleri ve kristallerini oluştururlar.

layısıyla tayfın X ışını kısmında çok daha fazla enerjinin) bütün elementler için aynı olması gerekir, zaten öyle olduğu da görülmektedir. Bütün iyi kuramlar gibi Bohr'un modeli başarılı bir tahminle doğrulanmıştır. Periyodik cetvelde düzenlenmiş elementlerde 1922' de bile birkaç boşluk vardı, bunlar atom numaraları 43, 61, 72, 75, 85 ve 87 olan keşfedilmemiş elementlere karşılık geliyordu. Bohr' un modeli bu "kayıp" elementlerin ayrıntılı özelliklerini önceden söylüyordu ve özellikle 72 no.lu elementin zirkonyum'a benzer özellikler göstermesi gerektiğini ima ediyordu. Bu tahmin atomun alternatif modellerinin öngörüleriyle çelişiyordu. Bu tahmin bir yıl içinde 72 no.lu elementin, yani hafniyum elementinin bulunmasıyla teyit edildi. Hafniyumun tamı tamına Bohr'un öngördüğü tayf çizgileri özelliklerini gösterdiği anlaşıldı.

Bu, eski kuantum kuramının zirveye ulaştığı noktaydı. Bu kuram, üç yıl içinde silinip gidecekti, fakat kimya açısından, atom çekirdeklerinin etrafında, dolu (ya da boş, "arada bir şey" olmaması yeterliydi) olmayı "seven" kabuklarda dönüp duran minik parçacıklar olarak görülen elektron fikrinden biraz daha fazlası işinizi görürdü.[17] Yok eğer gazların fiziğiyle ilgileniyorsanız, atomları sert, parçalanamaz bilardo topları olarak gösteren imgeden biraz daha fazlası ihtiyacınızı karşılardı. On dokuzuncu yüzyıl fiziği gündelik amaçlarda iş görür; 1923 fiziği kimyanın büyük kısmında işe yarar; 1930'ların fiziğiyse bizi nihai hakikat arayışında bugüne kadar gidilebilen son yere götürür. Elli yıl boyunca kuantum devrimiyle kı-

17. Burada tabii kimyanın basitliğini abartıyorum. Daha karmaşık molekülleri açıklamak için gereken "biraz daha fazlası", 1920'lerin sonlarıyla 1930'ların başlarında kuantum mekaniğinin tam gelişiminin meyveleri kullanılarak geliştirildi. Bu işin büyük kısmını yapan kişi Linus Pauling'di; bugün düzenlediği barış kampanyalarıyla ve C vitamini savunucusu olarak daha çok tanınan Pauling bu çalışması için aldığı iki Nobel Ödülü'nden ilkini 1954'te "kimyasal bağın doğasını araştırması ve buradan elde ettiği sonuçları karmaşık maddelerin yapılarının aydınlatılmasına uygulamasından dolayı" almıştır. Kuantum kuramının yardımıyla fizik kimyageri Pauling'in aydınlattığı bu "karmaşık maddeler" hayatı meydana getiren moleküllerin incelenmesine giden bir yol açmıştır. Kuantum kimyasının moleküler biyoloji için taşıdığı kilit önem, Horace Judson'ın epik kitabı *The Eighth Day of Creation*'da özellikle vurgulanır. Bunun ayrıntılı hikâyesi ne yazık ki kitabın kapsamı dışındadır.

yaslanacak hiçbir çığır açan buluş yapılmamıştır ve bütün o süre boyunca bilimin geri kalanı bir avuç dâhinin içgörülerine yetişmeye çalışmaktaydı. 1980'lerin başlarında Paris'teki Aspect deneyinin başarısı o yetişme döneminin bittiğini gösteriyordu. Bu, kuantum mekaniğinin en tuhaf yanlarının bile gerçek dünyadaki şeylerin nasıl olduğunu birebir tarif ettiğinin ilk doğrudan deneysel kanıtıydı. Kuantum dünyasının gerçekten ne kadar tuhaf olduğunu keşfetmenin zamanı artık gelmiştir.

İKİNCİ KISIM

Kuantum Mekaniği

"Bütün bilim ya fizikten ibarettir
ya da pul koleksiyonculuğundan."

ERNEST RUTHERFORD
1871-1937

Beşinci Bölüm

Fotonlar ve Elektronlar

Planck'ın ve Bohr'un klasik mekanikten farklı çok küçüklerin fiziğine giden yolu göstermedeki başarılarına rağmen, kuantum kuramı bugün bildiğimiz haliyle ancak Einstein'ın ışık kuantumu fikrinin kabulüyle ve ışığın *hem* parçacık *hem* de dalga olarak tarif edilmesi gerektiğinin anlaşılmasıyla gerçek anlamda başlamış oldu. Einstein ışık kuantumunu ilk defa 1905'te fotoelektrik etki üzerine yazdığı makalesinde anlattıysa da, bu fikrin kabul edilip saygınlık kazanması ta 1923'ü bulmuştur. Einstein'ın kendisi de ihtiyatla hareket ediyordu, çalışmasının devrim yaratacak içerimlerinin gayet iyi farkındaydı. 1911'de ilk Solvay Kongresi'ndeki katılımcılara şöyle demişti: "Dalga kuramının deneyle doğrulanmış sonuçlarıyla bağdaşmıyor görünen bu kavramın geçici olduğunda ısrar ediyorum."[18]

Einstein'ın fotoelektrik etki denkleminin doğruluğunu Millikan 1915'te ispatlamış olmasına rağmen, ışık parçacıklarının gerçekliğini kabul etmek hâlâ insanın aklına yatmıyordu; Millikan 1940'lardan geriye dönüp bakınca bu denklemle ilgili yaptığı testler hakkında şu yorumu yapıyordu: "1915'te, akla ters düşmesine rağmen bariz doğruluğunu ilan etmek zorunda kaldım... ışığın girişimiyle ilgili bildiğimiz her şeyi ihlal ediyor gibiydi." Millikan o sıralarda kendini daha güçlü ifade ediyordu. Einstein'ın fotoelektrik etki denkle-

18. Solvay Kongreleri Belçikalı bir kimyager olan Ernest Solvay'ın masraflarını karşıladığı bir dizi bilimsel toplantıydı. Solvay geliştirdiği sodyum karbonat imal etme yöntemi sayesinde bir servet kazanmıştı. Bilimin daha soyut alanlarına ilgi duyduğu için de zamanın önde gelen fizikçilerinin buluşup fikir alışverişinde bulunduğu bu toplantıları finanse etmiştir.

minin doğruluğunun deneysel teyidini beyan ederken şöyle devam ediyordu: "Einstein'ın bu denkleme ulaşmasını sağlayan yarı tanecik kuramı şu an için kesinlikle savunulamaz görünüyor." Bu 1915'te yazılmıştı; 1918'de Rutherford, Einstein'ın on üç yıl öncesinde ışık kuantası hipoteziyle açıklamış olduğu enerji-frekans bağlantısının "hiçbir fiziksel açıklaması yok" gibi göründüğünü söylüyordu. Rutherford Einstein'ın önerisinden habersiz değildi, sadece ikna olmamıştı. Işığın dalga kuramını test etmek için tasarlanmış bütün deneyler ışığın dalgalardan meydana geldiğini gösterirken nasıl olurdu da ışık parçacıklardan oluşurdu?[19]

IŞIK PARÇACIKLARI

Einstein 1909'da patent memurluğu görevini bırakıp Zürih'te doçent olarak ilk akademik görevine başladığı sıralarda, "*hν* enerjili noktavari kuanta" diye bir şeyden söz ederek ileriye doğru küçük fakat önemli bir adım atmıştır. Elektron gibi parçacıklar klasik mekanikte "noktavari" nesnelerle temsil edilirler, ama bu dalgalarla ilgili tariften fersah fersah uzaktır, ne var ki ışımanın frekansı, *ν*, bize parçacığın enerjisini söyler. Einstein 1909'da şöyle söylüyordu: "Kanaatime göre kuramsal fiziğin gelişimindeki bir sonraki safha bize dalga ve yayılma kuramlarının bir tür birleşimi biçiminde bir ışık kuramı getirecek."

Zamanında pek dikkat çekmeyen bu yorum kuantum kuramını tam kalbinden vuruyordu. Bohr 1920'de fiziğin bu yeni temelini "tamamlayıcılık ilkesi" olarak ifade ediyordu. Buna göre (örneğimizde) ışığın dalga ve parçacık kuramları birbirini çürütmüyor, aksine birbirini tamamlıyordu. Tam bir tarif için *her iki* kavram da gereklidir, bu da, ışık "parçacığının" enerjisini frekansı ya da dalga boyu cinsinden ölçme ihtiyacı baş gösterince kendini çarpıcı bir şekilde ortaya koyar.

19. Bu pasajdaki alıntılar A. Pais'ın *Subtle is the Lord*'undan alınmıştır.

Ne var ki Einstein bu sözleri söyledikten hemen sonra kuantum kuramı hakkında ciddi şekilde kafa yormayı bırakıp Genel Görelilik Kuramı'nı geliştirdi. 1916'da kuantum arbedesine yeniden döndüğünde ışık kuantumu tema'sında başka bir mantıksal gelişmeyle geldi. Önce de gördüğümüz gibi Einstein'ın istatistiksel fikirleri Bohr atomunun resmine çekidüzen vermede yardımcı olmuş ve Planck'ın kara cisim ışıması tarifini geliştirmişti. Maddenin ışımayı soğurma ya da yayma biçimleriyle ilgili bu hesaplamalar her ışıma kuantumu $h\nu$'nin kendisiyle beraber $h\nu/c$ momentumu taşıması halinde momentumun ışımadan maddeye nasıl aktarıldığını da açıklıyordu. Bu çalışma müthiş 1905 makalelerinden bir diğerine, Brown hareketi üzerine yazılmış olanına dayanıyordu. Tıpkı polen taneciklerinin gaz ya da sıvı atomları tarafından tokatlanması [*buffeted*] gibi (ki böylece taneciklerin hareketi atomların gerçekliğini ispatlar) atomların kendileri de kara cisim ışımasının "parçacıkları" tarafından tokatlanmaktadır. Atomların ve moleküllerin bu "Brown hareketi" doğrudan gözlemlenemiyordu, fakat bu tokatlama bir gazın basıncı gibi özellikler bakımından ölçülebilecek istatistiksel sonuçlara sebep olur. Einstein'ın momentum taşıyan kara cisim ışıması parçacıklarıyla açıkladığı şey işte bu istatistiksel sonuçlardı.

Fakat bir ışık "parçacığı"nın momentumu için kullanılan aynı ifade dosdoğru özel görelilik kuramından, hem de çok basit bir şekilde çıkıp gelmektedir. Görelilik kuramında bir parçacığın enerjisi (E), momentumu (p) ve durgun kütlesi (m) şu basit denklemle birbirine bağlıdır:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

Işık parçacığının durgun kütlesi olmadığından bu denklem çabucak şu hale indirgenir:

$$E^2 = p^2c^2$$

ya da daha basit haliyle $p = E/c$. Einstein'ın bunu bulmasının onca zaman alması şaşırtıcı gelebilir, fakat o sıralar kafasında başka şeyler vardı – genel görelilik gibi. Ne var ki, bu bağlantıyı kurunca istatistiksel argümanlarla görelilik kuramı arasındaki uyuşma bu savı çok daha güçlü kılmıştır. (Başka bir bakış açısından, istatistikler

$p = E/c$ eşitliğini gösterdiğinden görelilik denklemlerinin o zaman ışık parçacığının durgun kütlesinin sıfır olduğunu kanıtladığını savunabilirsiniz.)

Einstein'ın kendisini ışık kuantasının gerçek olduğuna ikna eden bu çalışmaydı. Işık parçacığı için kullanılan "foton" kelimesi ta 1926'da atıldı ortaya (Gilbert Lewis tarafından, Berkeley, Kaliforniya) ve ancak 1927'de "Elektronlar ve Fotonlar" adlı beşinci Sovay Kongresi'nden sonra bilim dilinin bir parçası haline geldi. Fakat Einstein'ın 1917'de şimdi foton dediğimiz şeyin gerçekliğine inanan tek kişi olmasına rağmen bu ismin ortaya çıkması için uygun zaman şimdi gibi görünüyordu. Fotonların gerçekliğinin tartışma götürmez, doğrudan deneylerle Amerikalı fizikçi Arthur Compton tarafından ispat edilmesi için bir altı yıl daha geçmiştir.

Compton 1913'ten beri X ışınlarıyla çalışmaktaydı. Bazı Amerikan üniversitelerinde ve İngiltere'de Cavendish'de çalışmıştı. 1920'lerin başındaki bir dizi deney sonucunda X ışınlarıyla elektronlar arasındaki etkileşimin ancak X ışınlarının bir şekilde parçacık –foton– olarak ele alındığı takdirde açıklanabileceği sonucuna varmıştı. Kilit deneyler X ışımasının bir elektron tarafından dağıtılma şekliyle –ya da parçacıkların diliyle söylersek, bir fotonla bir elektronun çarpıştıkları zamanki etkileşimleriyle– ilgilidir. Bir X ışını fotonu bir elektrona çarpınca, elektron enerji ve momentum kazanıp belli bir açıyla ayrılır. Fotonun kendisi de enerji ve momentum yitirip parçacık fiziğinin basit yasalarıyla hesaplanabilecek farklı bir açıyla hareket eder. Çarpışma hareket eden bir bilardo topunun duran bir bilardo topuna yaptığı etki gibidir ve momentumun aktarımı da aynı biçimde olur. Fakat söz konusu foton olunca enerji kaybı ışımanın frekansındaki, elektrona verilen $h\nu$ miktarı oranında bir değişiklik demektir. Deneyin tam bir açıklamasını yapmak için hem parçacık hem de dalga tariflerine ihtiyacınız vardır. Compton deneyleri yapınca etkileşimin tam bu tarife uyduğunu buldu – saçılma açıları, dalga boyu değişiklikleri ve elektronun geri çekilmesi, bütün bunların hepsi X ışımasının $h\nu$ enerjisine sahip parçacıklar halinde geldiği fikrine mükemmelen uyuyordu. Bu işleme şimdi Compton etkisi deniyor ve Compton 1927'de bu çalışma için bir

Nobel Ödülü almıştır.[20] 1923'ten sonra fotonların hem enerji hem de momentum taşıyan parçacık olarak gerçekliği kanıtlanmıştır (gerçi Bohr Compton etkisinin alternatif bir açıklamasını bulmak için bayağı bir uğraşmış, iyi bir ışık kuramında *hem* parçacık *hem de* dalga tariflerinin yer alması gerektiğini hemen görememişti. Parçacık kuramını kendi atom modelinin barındırdığı dalga kuramına bir rakip olarak görüyordu). Fakat ışığın dalga yapısına dair bütün kanıtlar geçerliliğini koruyordu. Einstein'ın 1924'te dediği gibi "bu yüzden şimdi iki ışık kuramı var, ikisinden de vazgeçilemez ... aralarında da hiçbir mantıksal bağ yok."

O iki kuram arasındaki bağlantı, hummalı geçen sonraki birkaç yıl boyunca kuantum mekaniğinin gelişimindeki temeli oluşturmuştur. Aynı anda pek çok farklı cephede ilerleme kaydedilmiştir, fakat yeni fikirler ve yeni keşifler yeni fiziğin kurulması için gereken derli toplu bir sırada gelmemiştir. Kolay anlaşılır bir hikâye anlatmak için durumu bilimin o sıradaki halinden daha düzenli anlatmam gerekiyor. Bunu yapmanın bir yolu da kuantum mekaniğinin kendini tarif etmeden önce ilgili kavramların bir dökümünü vermektir, gerçi kuantum mekaniği kuramı o kavramların bazılarının anlaşılmasından önce gelişmeye başlamıştır. Parçacık/dalga ikiliğinin bütün öngörüleri kuantum mekaniği şekil almaya başlayıncaya kadar anlaşılmamıştır – fakat kuantum kuramının her mantıksal tarifinde, ışığın ikili doğasının keşfinden sonraki ilk basamağın, maddenin ikili doğasının keşfi olması gerekir.

PARÇACIK / DALGA İKİLİĞİ

Bu keşif Fransız asillerinden Louis de Broglie'nin bir önerisinden kaynaklanmıştır. Bu öneri çok basit görünmekle birlikte meseleyi tam can evinden vurmuştur. De Broglie'nin "Eğer ışık dalgaları da

20. Kuramcı Peter Debye bağımsız olarak hemen hemen o sıralarda "Compton etkisi"ni hesaplamış ve bu fikri test etmek için bir deney öneren bir yazı yayımlamıştı. Yazısının yayımlandığı sırada Compton çoktan deneyi gerçekleştirmişti.

parçacık gibi davranıyorsa," diye akıl yürütmeye başladığını hayal edebiliriz, "o zaman elektronlar neden dalga gibi davranmasın?" Tabii o noktada durmuş olsaydı o zaman kuantum kuramının kurucularından biri olarak anılmayacak, 1929'da da Nobel Ödülü almayacaktı. Öylesine bir spekülasyon olarak bu fikir pek bir şey ifade etmez, ayrıca X ışınları hakkında benzer spekülasyonlar Compton'un çalışmasından çok önceleri yapılmıştı. En azından daha 1912'de büyük fizikçi (Nobel ödüllü bir kişi daha) W. H. Bragg o sıralardaki X ışını fiziğinin durumuyla ilgili olarak şöyle demişti: "Benim görebildiğim kadarıyla sorun X ışını kuramları arasında bir karar vermek değil,... ikisinin gücüne sahip tek bir kuram bulmak."[21] De Broglie'nin büyük başarısı parçacık/dalga ikiliği fikrini alıp matematiksel olarak tamamlayarak madde dalgalarının nasıl davranması gerektiğini tarif etmesinde ve bunların nasıl gözlemlenebileceği hakkında önerilerde bulunmasında yatmaktadır. Kuramsal fizik cemaatinin görece genç bir üyesi olarak büyük bir avantajı vardı, o da saygın bir deneysel fizikçi olan ağabeyi Maurice'di. Onu bu keşfe yönlendiren o olmuştur. Louis de Broglie daha sonra Maurice'in aralarında geçen konuşmalarda "parçacık ve dalgadaki inkâr edilemez iki yönlülük gerçeğinin önemi"ni vurguladığını anlatıyordu. Bu, zamanı gelmiş bir fikirdi ve Louis de Broglie kavramsal olarak basit bir sezginin kuramsal fiziğe dönüşebileceği bir sırada o civarda bulunduğu için çok şanslıydı. Fakat de Broglie bu sezgisel sıçrayışından sonuna kadar yararlanmıştır.

De Broglie 1892'de doğmuştu. Aile geleneği yolunu devlet dairesinde bir işe girme yönünde çizmişti, fakat 1910'da Paris Üniversitesi'ne girdiğinde bilime, özellikle de kuantum mekaniğine duyduğu ilgiyle yanıp tutuşmaya başlamıştı. Bu dünyanın kapısını ona kısmen ağabeyi (ondan on yedi yaş büyük olan ağabeyi) açmıştı. Ağabeyi doktorasını 1908'de almıştı ve ilk Solvay Kongresi'nin bilim sekreterlerinden biri olduğu için Louis'ye kongrede olup bitenleri haber veriyordu. Fakat birkaç yıl sonra Louis'nin fizik çalışma-

21. De Broglie'nin yazılarından ve Bragg'dan yapılan alıntılar Max Jammer'in *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*'inden alınmıştır.

ları 1913 yılında, geçici olması beklenen fakat Birinci Dünya Savaşı yüzünden 1919'a kadar uzayan zorunlu askerlik görevinden dolayı kesintiye uğradı. De Broglie savaştan sonra tekrar kolları sıvayarak kuantum kuramı çalışmalarına dönüp onu parçacık ve dalga kuramlarının altında yatan birliğin keşfine götürecek bir yol sürerek çalışmaya başladı. Çığır açan haber 1923'te ışık paketçiklerinin doğası üzerine Fransız dergisi *Comptes Rendus*'de yayımladığı üç makaleyle geldi. Ayrıca bu çalışmanın kendi yazdığı İngilizce özeti Şubat 1924'te *Philosophical Magazine*'de çıktı. Bu kısa katkılar büyük bir etki uyandırmadı, fakat de Broglie doktora tezi için hemen fikirlerini bir düzene koymaya ve daha eksiksiz bir biçimde hazırlamaya koyuldu. Sorbonne'daki sınavı Kasım 1924'te gerçekleşti ve tezi 1925'in başlarında *Annales de Physique*'de yayımlandı. Eserinin temelinin açıklık kazandığı ve 1920'ler boyunca fizikteki en önemli gelişmelerden biri olarak ışık saçtığı hali işte o zamanki halidir.

De Broglie tezine Einstein'ın ışık paketçikleri için türettiği iki denklemle başlamıştır:

$$E = h\nu;\ p = h\nu/c$$

Her iki denklemde de parçacıklara "ait olan" özellikler (enerji ve momentum) sol tarafta, dalgalara "ait olan" özellikler ise (frekans) sağ tarafta görünüyor. De Broglie ışığın parçacık mı yoksa dalga mı olduğu meselesini kesin bir çözüme bağlamak için yapılan deneylerin başarısızlığının bu yüzden olduğunu çünkü bu iki tür davranışın ayrılmaz bir biçimde birbirine girdiğini söylüyordu – momentumun parçacık özelliğini ölçmek için bile frekans denen dalga özelliğini bilmeniz gerekmektedir. Ne var ki bu ikilik sadece fotonlar için geçerli değildi. O sıralarda elektronlar akıllı uslu parçacıklar olarak düşünülüyordu, tabii atomların içindeki farklı enerji seviyelerini tuhaf doldurma biçimleri dışında. Fakat de Broglie elektronların sadece bütün sayılarla (tamsayılarla) tanımlanmış "yörüngeler"de var olmasının da bazı açılardan bir dalga özelliği gibi göründüğünü fark etmiştir. "Fizikte tamsayıları içeren fenomenler sadece girişim ve normal titreşim kipleriydi" diye yazıyordu tezinde. "Bu olgu bana elektronların da sırf tanecik olarak görülemeyeceğini, on-

lara da bir periyodiklik özelliği atfedilmesi gerektiğini söylüyordu."

"Normal titreşim kipleri" denilen şey bir keman telinin notalarını oluşturan titreşimler ya da bir org borusundaki ses dalgasından ibarettir. Mesela sıkıca gerilmiş bir tel her iki ucu sabitlenmişken ortası ileri geri kıpırdaşıp duracak şekilde titreşebilir. Telin ortasına dokunun, orta kısım hareketsizken telin iki yanı aynı şekilde titreşecektir – ve bu yüksek titreşim "kipi" aynı zamanda dokunulmamış bütün telin yüksek bir notasına, armonik sesine, karşılık gelir. İlk kipte dalga boyu ikincisinin iki katıdır ve ardışık yüksek notalara karşılık gelen yüksek kip titreşimleri titreşen tele uyabilir, yeter ki telin uzunluğu daima dalga boylarının tamsayısı olsun (1, 2, 3, 4, ...). Sadece belli frekanstaki bazı dalgalar tele uyar.

Bu aslında elektronların atomlara 1., 2., 3., 4. gibi kuantum enerji seviyelerine karşılık gelecek şekilde yerleşmelerine benziyor. Gerilmiş düz bir tel yerine daire şeklinde bir teli, bir atomun çevresindeki bir "yörünge"yi düşünün. Sürekli bir titreşim dalgası telin etrafında neşeyle dolaşabilir, yeter ki çemberin uzunluğu dalga boylarının tamsayı katı olsun. Çünkü bu şekilde tele tamamen "uymayan" her dalga kararsız olup kendisiyle girişim yapacağından yok olacaktır. Yılanın başı daima kuyruğunu yakalamak zorundadır, yoksa tel, analojideki gibi, dağılır. Acaba bu, atomdaki enerji durumlarının, her biri belli bir frekanstaki çınlayan elektron dalgasına karşılık gelecek şekilde kuantalanışını açıklayabilir mi? Bohr atomuna istinaden yapılan pek çok analojide olduğu gibi –hatta atomun bütün fiziksel resimlerinde olduğu gibi– bu resim hakikatten fersah fersah uzaktadır, fakat kuantum dünyasını daha iyi anlamaya yardımcı olmuştur.

ELEKTRON DALGALARI

De Broglie dalgaları parçacıklarla *ilintili* olarak düşünüyordu ve foton gibi bir parçacığın izleyeceği yolu, aslında bağlı olduğu dalgayla bulduğunu ileri sürüyordu. Sonuç ışığın davranışının, hem dalga hem de parçacık deneylerinden elde edilen verileri birleştiren, tam

tekmil bir matematiksel tarifiydi de Broglie'nin tezini inceleyen jüri üyeleri matematik kısmını sevmişti, fakat elektron gibi bir parçacıkla ilintili benzer bir dalganın var olduğu önerisinin fiziksel bir anlamı olduğuna inanmıyorlardı – buna sadece matematiğin bir garipliği olarak bakmışlardı. De Broglie aynı fikirde değildi. Jüri üyelerinden biri madde dalgalarını tespit edecek bir deneyin kurulup kurulamayacağını sorduğunda bir kristalden geçen elektron demetinin kırılmasıyla istenilen gözlemin mümkün olması gerektiği cevabını verdi. Bu deney tıpkı ışığın sadece iki değil bir dizi yarıktan geçirilerek kırılması gibiydi. Kristalde düzenli olarak yerleşmiş atomlar arasındaki boşluklar, yüksek frekanslı (ışıkla, hatta X ışınlarıyla kıyaslandığında kısa dalga) elektron dalgaları için yeterince dar "yarık"lar dizisi oluşturacak şekildeydi.

De Broglie hangi dalga boyunu aradığını iyi biliyordu, Einstein'ın ışık parçacıkları için kurduğu iki denklemi birleştirdiğinden daha önce karşımıza çıkan $p = h\nu/c$ denklemindeki çok basit ilişkiyi bulmuştu. Dalga boyunun frekansla olan bağıntısı da $\lambda = c/\nu$ olduğundan, bu durumda $p\lambda = h'dir$ ya da sözle ifade edersek momentumla dalga boyunun çarpımı Planck sabitini verir. Dalga boyu ne kadar küçük olursa o parçacığın momentumu o kadar büyük olur, bu da küçük kütleleri ve keza küçük momentumlarıyla elektronları o sıralarda bilinen en "dalgavari" parçacık yapıyordu. Tıpkı ışıkta ya da denizin yüzeyindeki dalgalarda olduğu gibi, kırılma etkileri ancak eğer dalga, dalga boyundan çok daha küçük bir delikten geçerse kendini gösterir, bu da elektron dalgaları için gerçekten de çok küçük bir delik demektir, yaklaşık bir kristaldeki atomlar arasındaki boşluklar kadar.

De Broglie'nin bilmediği şey en iyi elektronların kırınımıyla açıklanabilen etkilerin daha 1914'te kristaller incelenirken elektron demetleri kullanıldığında gözlemlenmiş olduğuydu. İki Amerikalı fizikçi Clinton Davisson ve çalışma arkadaşı Charles Kunsman gerçekten de de Broglie'nin fikirlerini formüle ettiği 1922, 1923 yılları boyunca kristalden saçılan elektronların bu garip davranışını incelemekteydiler. Bundan habersiz olan de Broglie elektron-dalga hipotezini test etmeleri için deneycileri ikna etmeye çalışıyordu. Bu

arada, de Broglie'nin tez danışmanı Paul Langevin bu çalışmanın bir nüshasını Einstein'a göndermişti. Einstein da tabii bunda bir matematik hilesinden ya da analojisinden çok daha fazlasını görüp madde dalgalarının gerçek olması gerektiğini anlamıştı. O da haberi Göttingen'deki Max Born'a geçti. Oradaki deneysel fizik bölüm başkanı olan James Franck, Davisson'ın deneylerinin "beklenen etkinin varlığını zaten kanıtlamış"[22] olduğu yorumunda bulundu.

Davisson ve Kunsman öteki fizikçiler gibi, saçılma etkisinin elektron bombardımanına tutulan atomların yapısından kaynaklandığını, elektronların doğasının ürünü olmadığını düşünüyorlardı. Born'un öğrencisi olan Walter Elsasser 1925'te bu deneylerin elektron dalgaları açısından sonuçlarını açıklayan kısa bir not yayımlamıştır, fakat deneyciler kendi verilerinin bir kuramcı tarafından yapılan bu yeni yorumundan etkilenmemişti – hele bir de bu yorumun yirmi bir yaşındaki tanınmamış bir öğrenciden geldiği düşünülürse. 1925'te bile mevcut deneysel kanıta rağmen madde dalgaları fikri öylesine bir fikir olarak kalmıştır. Ne zaman ki Erwin Schrödinger, de Broglie'nin fikrini içine kattığı, ama onun çok ötesine gittiği yeni bir kuramla çıkagelmiştir, işte o zaman deneyciler kırılma deneylerini gerçekleştirerek elektron-dalga hipotezini kontrol etmeyi acilen gerekli görmüştür. 1927'de deney gerçekleştiğinde de Broglie'nin tamamen doğru söylediği ispatlanmıştı – elektronlar kristal örgülerle tıpkı bir dalga biçimi gibi kırılmıştı. Bu keşif 1927'de birbirinden bağımsız olarak iki grup tarafından yapıldı: ABD'de Davisson ile yeni bir katılımcı Lester Germer, İngiltere'de farklı bir teknik kullanan George Thomson (J. J.'nin oğlu) ile araştırma görevlisi Alexander Reid. Davisson, Elsasser'in hesaplamalarını sorgulamadan kabul etmeyince tek kişilik zafer şansını kaçırıp 1927'de birbirinden bağımsız olarak yürüttükleri çalışmalardan dolayı 1937 Nobel Fizik Ödülü'nü Thomson'la paylaşmıştı. Fakat bu sayede güzel bir bilimsel dipnot düşebileceğiz (Davisson da bunun farkındaydı herhalde). Kuantum kuramının temel özelliğini derli toplu özetleyen bir şey.

22. Bkz Jammer, *a.g.y.*

1906'da J. J. Thomson elektronların parçacık olduklarını ispat ettiği için Nobel Ödülü kazanmıştı; 1937'de oğlunun elektronların dalga olduğunu ispatladığı için Nobel Ödülü aldığını gördü. Baba da oğul da doğruyu bulmuştu, her iki ödül de hak edilmişti. Elektronlar parçacıktır; elektronlar dalgadır. 1928'den sonra de Broglie' nin dalga/parçacık ikiliğine dair deliller arttıkça arttı. Arkasından, proton ve nötron[23] da dahil olmak üzere öteki parçacıkların da dalga özellikleri taşıdıkları bulundu, ki bu özelliklere kırılma da dahildi. Ayrıca, 1970'lerin ve 1980'lerin sonlarında yaptıkları bir dizi harika deneyle Tony Klein ve Melbourne Üniversitesi'ndeki meslektaşları on dokuzuncu yüzyılda ışığın dalga kuramını kanıtlayan deneylerden bazılarını tekrarladılar. Fakat bu sefer bir ışık demeti yerine bir nötron demeti kullanmışlardı.[24]

GEÇMİŞTEN KOPUŞ

Klasik fizikten büsbütün kopuş sadece fotonların ve elektronların değil bütün "parçacık" ve "dalga"ların aslında dalga ve parçacık karışımı olduğu anlaşılınca ortaya çıkıyor. Ne var ki gündelik hayatta karışımın parçacık bileşeni son derece ağır basıyor, mesela bir bowling topu ya da ev söz konusuyken. İşin dalga yönü $p\lambda = h$ bağıntısına göre hâlâ geçerlidir, ama hiçbir önemi yoktur. Gerçekliğin parçacık ve dalga yanının aynı ölçüde önemli olduğu çok küçüklerin dünyasında şeyler gündelik hayattaki tecrübelerimizle herhangi bir şekilde anlayabileceğimiz bir davranış göstermiyorlar. Sadece Bohr' un elektron "yörünge"li resmi yanlış değil; *bütün* resimler yanlış ve atomların içinde olup bitenleri bize anlatacak hiçbir fiziksel analoji mevcut değil. Atomlar atom gibi davranır, başka bir şey gibi değil.

23. İlk kez 1932'de James Chadwick tespit etmiştir. Chadwick bundan dolayı 1935'te Nobel Ödülü aldı, yani Davisson ve Thomson'un çalışmalarının benzer bir itibar kazanmasından tam iki yıl önce.

24. Bu deneylerin hayata geçirilebilecek yanı da var, olası bir "nötron mikroskobu" gibi. Bkz. *New Scientist*, 2 Eylül 1982, s. 631.

Sir Arthur Eddington 1929'da yayımlanan *The Nature of the Physical World* adlı kitabında bu durumu çok zekice özetliyor. "Elektronların çevresine bildik hiçbir kavram örülemez" diyor ve atomla ilgili yaptığımız en iyi tarif sonuçta "bilinmeyen bir şey, ne olduğunu bilmediğimiz bir şey yapıyor"a varıyor. Bunun "pek de insanı aydınlatan bir kurama benzemediği"ne dikkat çekiyor. "Böyle bir şeyi başka bir yerde okumuştum–

...kayrak tirsukeleler
Dönenip delgilendiler otgelde."*

Fakat mesele şu ki, atomlardaki elektronların *neler* yaptığını bilmesek de elektron sayılarının önemli olduğunu biliyoruz. Birkaç sayı ekleyerek "Jabberwocky"yi bilimsel kılabiliriz – "Sekiz kayrak tirsukele oksijen otgelinde, yedisi de azotta dönenip delgilenirler... Tirsukelelerden biri kaçacak olursa, oksijen esasında azota ait bir kılığa bürünür."

Bu öyle gayri ciddi bir yorum değil. Sayılar değişmediği sürece, Eddington'ın elli yılı aşkın süre önce işaret ettiği gibi fiziğin bütün temelleri "Jabberwocky"ye tercüme edilebilir. Hiçbir anlam kaybı olmayacağı gibi, kafamızda atomlarla katı küreler, elektronlarla minik parçacıklar arasında kurduğumuz içgüdüsel çağrışımı kırdığı için bunun büyük de yararı olurdu. Elektronun "spin" [bir cismin kendi etrafında dönmesinden kaynaklanan açısal momentum] denilen bir özelliğinin çevresini saran karmaşa bu meseleyi açıkça ortaya koymuştur. Bu spin denilen şey çocukların oynadığı topaca ya da dünyanın güneşin yörüngesinde dönerken kendi ekseninde dönüşüne falan benzemez.

* Alıntı Lewis Carroll'ın, dilimize Tomris Uyar tarafından *Aynanın İçinden* (Can, 2001, s. 88) adıyla çevrilmiş olan *Through the Looking-Glass* adlı eserinden. İngilizcesi (daha doğrusu yine Tomris Uyar'ın "Gıllıgış" olarak çevirdiği "Jabberwocky"cesi) şöyle: "... the slithy toves / did gyre and gimbal in the wabe." Burada Alice, Humpty Dumpty'den (Türkçe çeviride "Kumkuma" denmiş) hiçbir anlam veremediği uydurma sözcüklerle dolu "Jabberwocky" şiirini açıklamasını rica eder. O da bu sözcüklerin, bilinen iki sözcüğün kaynaştırılmasıyla oluşturulmuş "portmanto sözcükler" olduğunu anlatır: "Slithy", "lithe and slimy"nin, "kayrak" "kaygan ve kıvrak"ın kaynaşmış halidir sözgelimi. (ed.n.)

Atom tayfının basit Bohr atom modelinin açıklayamadığı muammalarından biri tek başına olması "gereken" tayf çizgilerinin birbirine yakın yerleşmiş çok katlı yapılara [*multiplet*] bölünmüş olmasıdır. Her bir tayf çizgisi bir enerji durumundan başka bir enerji durumuna geçişi gösterdiği için tayftaki çizgi sayısı atomda kaç tane enerji durumu olduğunu ortaya koyar – kuantum merdiveninde kaç "basamak" olduğunu ve her basamağın ne kadar yüksek olduğunu gösterir. Tayf incelemeleri sonucu 1920'lerin başındaki fizikçiler çok katlı yapı için bazı olası açıklamalar bulmuştur. Sonradan en iyisi olduğu anlaşılan açıklama Wolfgang Pauli'den gelmişti ve elektrona dört ayrı kuantum sayısı vermeyi içeriyordu. Bu, fizikçilerin elektronu hâlâ bir parçacık olarak gördükleri ve kuantum özelliklerini gündelik hayatta aşina olduğumuz terimlerle açıklamaya çalıştıkları 1924 yılında oluyordu. Bu rakamlardan üç tanesi zaten Bohr modelinde vardı ve bunlar bir elektronun açısal momentumunu (yörüngesi etrafında hareket ettiği sürat), yörüngenin şeklini ve doğrultusunu tarif ediyordu. Dördüncü sayının elektronun başka bir özelliğiyle bağlantılı olması gerekiyordu, sadece iki çeşidi olan bir özellik. Böylece tayf çizgilerinde gözlemlenen bölünme açıklanabilirdi.

Pauli'nin dördüncü kuantum sayısının elektronun "spin"ini tarif ettiği fikri çok geçmeden pek tutuldu. Spin ya aşağıyı ya da yukarıyı işaret ediyor olarak düşünülebilirdi, böylece iki değerli hoş bir kuantum sayısı verecekti. Bunu ilk öneren kişi Ralph Kronig olmuştur. Kronig Columbia Üniversitesi'ndeki doktora çalışmalarını yeni bitirmiş, Avrupa'yı gezmekte olan genç bir fizikçiydi.[25] Elektronun doğal birim cinsinden ($h/2\pi$) yapısal yarım spin'i olduğunu ve bu spin'in atomun manyetik alanına ya paralel ya da zıt hizada olabileceğini ileri sürüyordu.[26] Onu şaşırtan bir şey oldu ve Pauli'nin kendisi bu fikre karşı çıktı, bunun sebebi büyük ölçüde göreli-

25. Aslında Arthur Compton daha 1920'de elektronun spin atabileceğini hayal ediyordu, fakat bu fikir farklı bir bağlamda dillendirilmişti ve Kronig de bunun farkında değildi.

26. 2π işin içine giriyor çünkü 360°'lik tam bir dairede o kadar radyan vardır. Temel birim $h/2\pi$, genellikle $\hbar$ olarak yazılır. Dahası sonra.

lik kuramı çerçevesinde elektronun bir parçacık olduğu fikriyle bunun bağdaşmamasıydı. Çekirdeğin etrafında yörüngedeki bir elektronun klasik elektromanyetik kurama göre nasıl kararlı olmaması "gerekiyor"sa, işte spin atan bir elektronun da görelilik kuramına göre kararlı olmaması "gerekir." Pauli belki de daha açık görüşlü olmalıydı, fakat bunun sonucunda Kronig fikrinden vazgeçti ve bunu hiç yayımlamadı. Ne var ki bir yıl geçmeden aynı fikir Leyden'deki Kuramsal Fizik Enstitüsü'nden George Uhlenbeck ve Samuel Goudsmit'in aklına gelmişti. Bu fikri 1925'in sonlarında Alman dergisi *Die Naturwissenschaften*'da ve 1926'nın başlarında *Nature*'da yayımladılar.

Spin atan elektron kuramı çok geçmeden tayf çizgilerinin baş belası bölünmesini tamamen açıklayacak şekilde incelikli hale getirildi ve 1926 Martı geldiğinde Pauli'nin kendisi de ikna olmuştu. Fakat spin denen bu şey de neydi? Eğer gündelik dille açıklamaya kalkışırsanız bu kavram, pek çok kuantum kavramı gibi, avcunuzdan kaçar gider. Sözgelimi bir "açıklama"ya göre size, elektron spin'inin topaç spin'ine benzemediği söylenebilir (yalan da sayılmaz), çünkü elektronun başladığı yere gelebilmesi için *iki kere* spin atması gerekir. Hem sonra bir elektron dalgası nasıl "spin" atabilir ki? Bohr 1932'de elektron spin'inin elektron demetlerinin manyetik alanlarla saptırılması gibi hiçbir klasik deneyle ölçülemeyeceğini kanıtlamayı başarınca Pauli'den mutlusu yoktu. Bu, *sadece* kuantum etkileşimlerinde, mesela tayf çizgilerini meydana getiren etkileşimlerde ortaya çıkan bir özelliktir ve hiçbir klasik anlamı yoktur. Pauli ve meslektaşları 1920'lerde atomu anlamak için çırpınırlarken elektronların "spin"inden değil de "deveran"ından bahsetselermiş işler belki de ne kadar kolaylaşacakmış!

Ne yazık ki şimdi de *spin* terimine takılıp kaldık, şu anda kuantum fiziğinde klasik terminoloji kullanılamayacağını ne kadar vurgularsanız vurgulayın, hatta isterseniz bu konuda bir kampanya bile yapın başarılı olma şansınız yok. Gerçi bu noktadan sonra hani ola ki aşina olmadığınız bir bağlamda aşina bir kelime dikkatinizi çekerse onu Jabberwocky'ye çevirmeye çalışıp bir bakın daha az mı korkutucu geliyor. Atomların içinde "gerçekten" neler olduğunu *hiç*

kimse anlamıyor, fakat Pauli'nin dört kuantum sayısı, "kayrak tirsukelelerin" farklı "otgellere" oturmasındaki bazı çok önemli özellikleri gayet güzel açıklıyor.

PAULI VE DIŞLAMA İLKESİ

Wolfgang Pauli kuantum kuramının temelini atmış olağanüstü bilim adamı topluluğunun en olağanüstü olanlarından biriydi. 1900' de Viyana'da doğan Pauli 1918'de Münih Üniversitesi'ne kaydolmuştu, fakat beraberinde büyümüş de küçülmüş bir matematikçi şöhretiyle görelilik kuramı üzerine Ocak 1919'da yayımlanan, tamamlanmış ve Einstein'ın hemen dikkatini çeken bir tez de getirmişti. Kendi okumalarının yanı sıra üniversitedeki ve Kuramsal Fizik Enstitüsü'ndeki fizik derslerini hatmedince görelilik konusuna o kadar hâkim oldu ki 1920'de tam tekmil bir matematik ansiklopedisi için konu hakkında önemli bir tanıtım yazısı yazma siparişi aldı. Yirmi yaşındaki öğrencinin bu şaheser yazısı ününü bütün bilim camiasına yaydı ve yazı Max Born gibilerce göklere çıkarıldı. Pauli daha sonra 1921'de Göttingen'de Born'un asistanı oldu. Çok geçmeden Göttingen'den ayrılıp önce Hamburg'a, sonra da Danimarka'daki Bohr Enstitüsü'ne geçti. Fakat Born bu kayıptan zarar görmedi – yeni asistanı Werner Heisenberg de aynı ölçüde yetenekliydi ve kuantum kuramının geliştirilmesinde kilit bir rol üstlendi.[27]

Pauli'nin dördüncü kuantum sayısına daha "spin" adı bile verilmemişken, kendisi 1925'te dört sayı olgusunu Bohr atomunun en büyük muammalarından birini çözmede kullanmayı başarmıştı. Hidrojende tek elektron, doğal olarak mevcut en düşük enerji seviyesinde, kuantum merdiveninin en alt basamağında oturur. Uyarılırsa

27. Mesela bkz. *The Born-Einstein Letters*. 12 Şubat 1921 tarihli bir mektupta Born şöyle diyor: "Pauli'nin Ansiklopedi için yazdığı makale anlaşılan bitti ve yazdığı makalelerin ağırlığının 2.5 kilo olduğu söyleniyor. Bu size entelektüel ağırlığı hakkında bir fikir verse gerek. Ufaklık sadece akıllı değil çalışkan da." Akıllı ufaklık doktorasını 1921'de bitirmiştir, yani Born'un asistanı olarak kısa süreliğine çalışmasından hemen önce.

–mesela bir çarpışmayla– merdivende daha yüksek bir basamağa sıçrayabilir, sonra tekrar temel duruma düşebilir. Bunu yaparken de bir kuantum ışıma yayar. Fakat daha kütleli atomlarda, sisteme daha çok elektron eklenince, hepsi temel duruma düşmez, onun yerine kendilerini merdivenden yukarı dağıtırlar. Bohr elektronların çekirdeğin etrafındaki "kabuklara yerleşmiş" olduğundan söz ediyordu. "Yeni" elektronlar kabuklara tam doluncaya kadar en az enerjiyle gidiyorlardı, sonra da bir sonraki kabuğa ve bu böyle devam ediyordu. Bu şekilde periyodik cetveli oluşturmuş ve pek çok kimyasal gizemi çözmüştü. Fakat kabukların nasıl ve neden tam dolu olduğunu açıklamamıştı – neden ilk kabuğun sadece iki elektron içerdiğini ama bir sonrakinin sekiz elektron içerdiğini vs.

Bohr kabuklarının her biri bir dizi kuantum sayısına karşılık geliyordu ve Pauli 1925'te kendi dördüncü kuantum sayısının elektrona eklenmesiyle tam dolu her bir kabuktaki elektron sayısının o kabuğa ait farklı kuantum sayı dizilerinin sayısına tam olarak karşılık geldiğini fark etmişti. Bugün Pauli Dışlama İlkesi diye bilinen şeyin formülünü çıkardı. Buna göre, iki elektron asla aynı kuantum sayı dizisine sahip olamaz. Pauli böylece kabukların daha büyük kütleli atomlarda nasıl dolduğunu anlamanın yolunu açmıştır.

Dışlama ilkesi ve elektron spin'inin keşfi gerçekten zamanlarından önce yapılmış ve yeni fiziğe ancak 1920'lerin sonlarında –yeni fizik denen şeyin kendisi icat edildikten sonra– tam olarak oturmuşlardır. 1925 ve 1926'da fizikteki neredeyse bodoslama ilerlemeden dolayı dışlama ilkesinin önemi bazen göz ardı edilir. Oysa aslında görelilik kuramı kadar temel ve geniş kapsamlı bir kavramdır ve fizikte geniş kullanım alanları vardır. Pauli Dışlama İlkesi sonuçta buçuklu spin'i olan *bütün* parçacıklar için geçerlidir – $(1/2)\hbar$, $(3/2)\hbar$, $(5/2)\hbar$, vs. Hiç spin'leri olmayan parçacıklar (mesela fotonlar) ya da tamsayı spin'i olanlar ($\hbar$, $2\hbar$, $3\hbar$, vs) farklı bir dizi kurala uyarak tamamen farklı şekilde davranırlar. Yarım spin'li parçacıkların uyduğu kurallara bunları 1925 ve 1926 yıllarında çözen Enrico Fermi ve Paul Dirac'a istinaden Fermi-Dirac istatistikleri denir. Böyle parçacıklara da "fermiyon" denir. Tam-spinli parçacıkların uyduğu kurallara bunları çözen iki kişiye istinaden Bose-Einstein

istatistikleri denir, bu parçacıkların adı da "bozon"dur.

Bose-Einstein istatistikleri de heyecanlar yaratan Broglie dalgaları, Compton etkisi ve elektron spin'i keşifleri ile aynı sıralarda, 1924 ve 1925'te geliştirilmekteydi . Bu istatistikler Einstein'ın kuantum kuramına yaptığı son büyük katkıyı ifade eder (aslında son büyük bilimsel eseridir) ve klasik ilkelerle tümden kopuşu temsil eder.

Satyendra Bose 1894'te Kalküta'da doğdu ve 1924'te o zamanlar yeni açılmış olan Dacca Üniversite'sinde Fizik Doçentiydi. Einstein, Planck, Bohr ve Sommerfeld'in çalışmalarını uzaktan takip eden Bose, Planck yasasının temelinin hâlâ oturmamış olduğunun farkındaydı; ışığın şimdiki adıyla fotonlar halinde geldiği varsayımından yola çıkarak kara cisim yasasını yeni bir yolla saptamaya çalıştı. Yasanın, özel bir tür istatistiğe uyan kütlesiz parçacıklarla ilgili çok basit bir türevini elde edip çalışmasının İngilizce bir nüshasını *Zeitschrift für Physik*'de yayımlanmak üzere iletmesi ricasıyla Einstein'a göndermişti. Einstein bu çalışmadan o kadar etkilendi ki Almancaya bizzat kendisi çevirip hararetle tavsiye ederek dergiye iletti ve Ağustos 1924'te yayımlanmasını sağladı. Bütün klasik kuram unsurlarını kaldırıp Planck yasasını ışık kuantası ile –sıfır kütleli relativistik parçacıklar olarak görülürler– istatistiksel yöntemlerin bir birleşiminden elde etmiş olan Bose en sonunda kuantum kuramını klasik atalarından çekip kurtarmıştır. Işıma artık bir kuantum gazı gibi ele alınabilecekti ve istatistikler parçacıkların sayılmasını içerecekti, dalga frekanslarının sayılmasını değil.

Einstein, istatistikleri daha da geliştirmiş ve aynı kurallara uyan, o sıralar hipotez niteliğindeki bir grup atoma –gaz ya da sıvı– uygulamıştır. İstatistiklerin oda sıcaklığındaki gerçek gazlar için uygun olmadıkları çıktı ortaya, fakat mutlak sıfıra, –273 °C'ye yakın soğutulabilen bir sıvı olan süperakışkan helyumun tuhaf özelliklerini açıklamada tam isabet kaydediyorlardı. Fermi-Dirac istatistikleri 1926'da sahneye çıkınca bilim adamlarının hangi kuralı nereye uygulayacaklarını bulmaları ve buçuklu spin'in önemini anlamaları biraz zaman aldı.

Buradaki incelikleri şu an dert etmemiz gereksiz, fakat fermiyonlarla bozonlar arasındaki fark önemlidir ve kolayca da anlaşıla-

bilir. Birkaç yıl önce komedyen Spike Milligan'ın oynadığı bir oyunu görmeye gitmiştim. Perde açılmadan hemen önce bu muhteşem adam sahnede belirdi ve salonun sahneye yakın olan en pahalı bölümündeki üç-beş boş koltuğa kötü kötü baktı. "Artık bu koltukları satacak kimseyi bulamıyorlar," dedi "öne doğru kayın da ben de sizleri görebileyim." Seyirciler dediğini yaptı – herkes öne kaydı böylece sahneye yakın koltuklar doldu, üç-beş boş koltuk da arkada kaldı. Bizler akıllı uslu fermiyonlar gibi hareket ediyorduk, her bir kişi tek bir koltuğu (bir kuantum durumunu) işgal ediyordu, en çok istenilen "temel durum" yerlerini dolduruyorduk, sahneden dışarıya doğru.

Bunu yakınlarda gittiğim Bruce Springsteen'in bir konseriyle karşılaştıralım. Orada her yer doluydu fakat ön sırayla sahne arasında bir boşluk vardı. Sahne ışıkları yanıp da grup "Born to Run"ın ilk notasına vurunca bütün seyirciler yerlerinden ileri doğru fırlayıp sahnenin önüne yığıldılar. Bütün "parçacıklar" aynı "enerji durumu"na karışık biçimde doluştu – işte fermiyonlarla bozonlar arasındaki fark budur. Fermiyonlar dışlama ilkesine uyarlar, bozonlar uymaz.

Alışık olduğumuz bütün "maddi" parçacıklar –elektronlar, protonlar ve nötronlar– fermiyondur ve dışlama ilkesi olmasaydı çeşit çeşit kimyasal elementler ve fiziksel dünyamızı meydana getiren bütün özelliklerin hiçbiri olmazdı. Bozonlar daha çok hayaletsi parçacıklardır, fotonlar gibi. Kara cisim yasası bütün fotonların aynı enerji durumuna geçmeye çalışmasının doğrudan sonucudur. Helyum atomları doğru şartlarda bozonların özelliklerini taklit edip süperakışkan olabilir çünkü her bir ^4He atomu iki proton ve iki nötron içerir, buçuklu spin'leriyle toplamı sıfıra eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Fermiyonlar aynı zamanda parçacıklar arasındaki etkileşimde de korunurlar –evrendeki toplam elektron sayısını artırmak mümkün değildir– oysa bozonlar, bir elektrik lambası yakan herkesin bildiği gibi, istemediğiniz kadar üretilebilirler.

ŞİMDİ NEREYE?

1980'lerin perspektifinden her şey gayet derli toplu görünse de, 1925'e gelindiğinde kuantum kuramı karman çorman olmuştu. Belli başlı bir ilerleme çizgisi yoktu, daha ziyade pek çok bireyin vahşi ormanda ayrı ayrı açtığı patikalar söz konusuydu. En iyi araştırmacılar bunu çok iyi biliyorlar ve kaygılarını da alenen dile getiriyorlardı; fakat ileriye atılım, bir kişi dışında, araştırma sahasına Birinci Dünya Savaşı sonrasında giren, belki de bu nedenle yeni fikirlere açık olan yeni kuşaktan gelecekti. 1924'te Max Born klasik yasaların atom özelliklerini açıklayacak biçimde nasıl değiştirilmesi gerektiği konusunda "şu an için sadece birkaç net olmayan ipucu var" diyordu ve 1925'te yayımlanan atom kuramı ders kitabında işi tamamına erdirecek ikinci cilt için söz vermişti. Böyle bir kitap "daha yıllarca yazılmaz"[28] diye düşünüyordu.

Heisenberg helyum atomunun yapısını hesaplamak için yaptığı başarısız bir girişimden sonra 1923'ün başlarında Pauli'ye "Hüsrana bak!" yorumunda bulunmuştu – Pauli aynı yılın Temmuz ayında Sommerfeld'e yazdığı bir mektupta bu ifadeyi kullanarak şöyle söylüyordu "Atomların birden fazla elektronu olduğunu söyleyen... bu kuram, ne büyük hüsran!" 1925 Mayısı'nda Pauli Kronig'e de şöyle yazıyordu: "Şu an fizik yine çorbaya döndü." 1925'te Bohr'un kendisi de atom modelinin etrafını sarmış pek çok sorun hakkında benzer şekilde karamsardı. Planck'ın karanlığa sıçramak için kullandığı sıçrama tahtalarından biri olan kara cisim yasasının sahibi Wilhelm Wien ta 1926 Haziranı'nda bile Schrödinger'e "tamsayılı ve buçuklu kuantum kesikliliği batağı"ndan ve "kuantum kuramının rasgele kullanımından" yakınan bir mektup yazmıştı. Kuantum kuramındaki bütün büyük isimler sorunların farkındaydı – 1925'te kuantum kuramında biri dışında bütün büyük isimler hayattaydı (istis-

28. Bu bölümdeki alıntılar Mehra ve Rechenberg'in kitabının birinci cildinin sonsözünden alınmıştır.

na Henri Poincaré'ydi; Lorentz, Planck, J. J. Thomson, Bohr, Einstein ve Born hâlâ sağlam çalışmalar yapıyorlardı, Pauli, Heisenberg, Dirac ve ötekiler de ses getirmeye başlamışlardı). İki büyük otorite Einstein ve Bohr'du, fakat 1925'e gelindiğinde bilimsel görüşleri belirgin biçimde birbirinden ayrılmaya başlamıştı. Bir kere Bohr ışık kuantumunun en güçlü muhaliflerinden biriydi; sonra, Einstein kuantum kuramında olasılığın oynadığı rolden kaygılanmaya başlarken Bohr olasılığın bir numaralı savunucusu oldu. İstatistiksel yöntemler (kaderin cilvesine bakın ki bunları gündeme Einstein getirmişti) kuantum kuramının temel taşı olmuştu, fakat daha 1920'de Einstein Born'a şöyle yazıyordu: "Şu nedensellik hikâyesi benim de çok başımı ağrıtıyor... Şunu itiraf edeyim ki... inançlarımı destekleyecek cesaretim yok." Einstein'la Bohr arasındaki bu minval üzere giden diyalog Einstein'ın ölümüne kadar, otuz beş yıl sürmüştür.[29]

Max Jammar 1925'in başlarındaki durumu şöyle tarif ediyor: "içler acısı bir hipotez, ilke, teorem ve hesaplama çorbası"[30] Kuantum fiziğindeki her problemi önce klasik fizik kullanarak "çözmek", sonra da işin içine soğukkanlı akıl yürütmeler yerine daha ziyade ilhama dayalı tahminler yoluyla kuantum sayılarını sokmak gerekiyordu. Kuantum kuramı ne özerkti ne de mantık açısından tutarlıydı, klasik fiziğin üstünde bir parazit gibi var oluyordu, kökleri olmayan egzotik bir çiçek gibi. Born'un atom fiziği üzerine nihai kitabın ikinci cildini ancak yıllar sonra yazabileceğini düşünmesine şaşmamak gerek. Kuantumun tuhaf öyküsüne tam yakışır şekilde 1925'in başlardaki karışık günlerini takip eden birkaç ay içinde şaşkına dönmüş olan bilim camiasına, hem de bir değil iki tane, tam, özerk, mantıklı, iyi temellendirilmiş kuantum kuramı sunulmuştu.

29. Einstein da bu kuşkuları Born'la yaptığı yazışmalarda dile getirmiştir. Bu yazışmalar *The Born-Einstein Letters* adıyla yayımlandı. Buradaki alıntı Macmillan basımının 23. sayfasından.

30. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, s. 196.

Altıncı Bölüm

Matrisler ve Dalgalar

Werner Heisenberg 5 Aralık 1901'de Würzburg'da dünyaya geldi. 1920'de Münih Üniversitesi'ne girip orada Bohr atom modeliyle çok yakından ilgilenmiş olan, zamanın önde gelen fizikçilerinden Arnold Sommerfeld'in gözetiminde fizik öğrenimi gördü. Heisenberg'i paldır küldür kuantum kuramı araştırmalarına daldırıp tayf çizgilerinin çiftlere yani ikili yapılara bölünmesi meselesinin bir kısmını açıklayacak kuantum sayılarını bulma görevi verdiler. Heisenberg cevabı birkaç hafta içinde buldu – bütün örüntü buçuklu kuantum sayılarıyla açıklanabiliyordu. Genç, önyargısız öğrenci, problemin en yalın çözümünü bulmuştu, fakat meslektaşları ve danışmanı Sommerfeld dehşete kapılmıştı. Bohr modeliyle yetişmiş olan Sommerfeld'e göre tamsayısal kuantum sayıları kanıtlanmış bir öğretiydi ve genç öğrencinin iddiaları çabucak bertaraf edildi. Uzmanlar arasındaki korku, denklemlere buçuklu sayıları katınca o zaman çeyrekli sayılara, sekizde birli sayılara, on altıda birli sayılara kapının açılacağı ve kuantum kuramının temelinin bozulacağıydı. Fakat yanılıyorlardı.

Birkaç ay içinde yaşça büyük ve daha tecrübeli fizikçi Alfred Landé aynı fikirle ortaya çıkıp bunu yayımladı; daha sonra anlaşıldı ki buçuklu kuantum sayıları tam kuantum kuramında çok önemli olup elektronların spin adı verilen özelliğini tarif etmede kilit bir rol oynamaktadır. Fotonlar gibi tamsayı ya da sıfır spini olan nesneler Bose-Einstein istatistiklerine uyarlar, buçuklu spin'i (1/2, 3/2 vs.) olanlarsa Fermi-Dirac istatistiklerine uyarlar. Elektronun buçuklu spini doğrudan atomun yapısıyla ve periyodik cetvelle ilgili-

dir. Kuantum sayılarının sadece tamsayı olarak *değiştiği* hâlâ doğrudur, fakat 1/2'den 3/2'ye ya da 5/2'ye ya da 9/2'ye yapılan sıçrama 1'den 2'ye ya da 7'den 12'ye yapılan sıçrama kadar geçerlidir. Böylece Heisenberg kuantum kuramındaki yeni bir fikrin mucidi olma şansını kaybetmiş oluyordu; fakat nasıl ki önceki kuşakta ilk kuantum kuramını geliştirmek genç adamlara düşmüşse, 1920'lerde de ileriye doğru bir sonraki adımı "herkesin bildiği" şeyin doğru olması gerektiği düşüncesine takılmayan genç beyinler atacaktı. Heisenberg küçük bir bilimsel "ilk"i kaçırmasını sonraki birkaç yıl içerisindeki çalışmasıyla kesinlikle telafi etmiştir.

Heisenberg, ünlü "Bohr Festivali"ne katıldığı Göttingen'de bir yarıyıl Born'un gözetiminde çalıştıktan sonra Münih'e dönüp 1923'te doktorasını tamamladı – üstelik daha yirmi iki yaşına bile girmemişti. O sıralarda Sommerfeld'in bir başka eski öğrencisi, Heisenberg'in yakın arkadaşı olan ve tıpkı onun gibi yaşından çok daha büyük işler yapan Wolfgang Pauli Göttingen'de bir dönem çalıştıktan sonra Born'un asistanlığından ayrılıyordu ve bu görevi 1924'te Heisenberg devraldı. Heisenberg bu iş sayesinde Bohr'la Kopenhag'da aylarca çalışma fırsatını bulmuştu ve 1925'te genç deha matematik fizikçisi, her fizikçinin eninde sonunda bulunacağını umduğu mantıksal kuantum kuramını bulmak için herkesten daha fazla donanımlıydı. Fakat kimse bu kadar yakın bir zamanda bulunacağını beklemiyordu.

Heisenberg'in çığır açan buluşu Göttingen grubundan kaptığı bir fikre dayanıyordu – bunu ilk kimin önerdiği konusunda şimdi kimse pek emin değil. Bu fikre göre bir fizik kuramı sadece deneylerle gerçekten gözlemlenebilen şeylerle ilgilenmelidir. Basmakalıp bir görüş gibi gelebilir, fakat aslında çok derin bir içgörü. Mesela atomlardaki elektronları "gözlemleyen" bir deney bize küçük katı topların çekirdeğin etrafındaki yörüngelerde dönüp durduğu bir resim göstermez – *yörüngeyi* gözlemlemenin hiçbir yolu yoktur ve tayf çizgilerinden elde edilen kanıtlar bize elektronların bir enerji durumundan (ya da Bohr'un diliyle, yörüngeden) ötekine hareket ettiklerinde ne olduğunu gösterir. Elektronların ve atomların bütün gözlemlenebilir özellikleri *iki* durumla ilgilidir ve yörünge kavramı

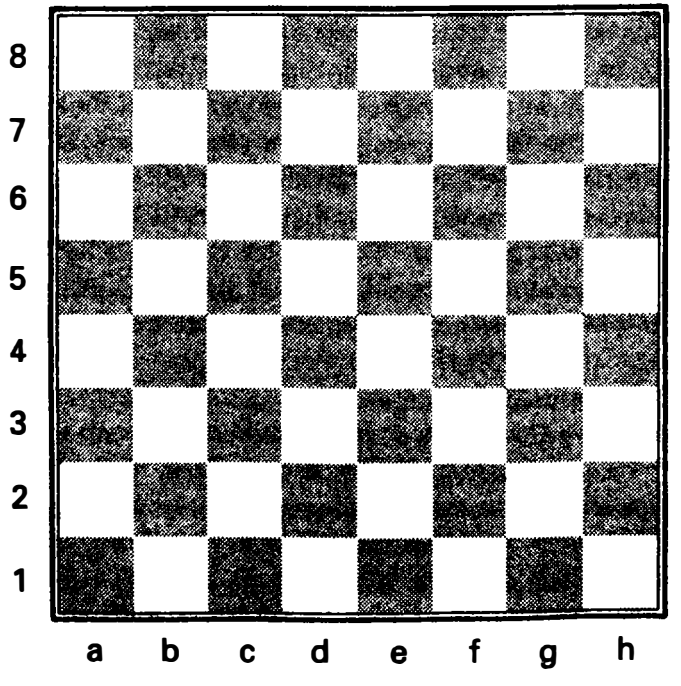
gündelik hayattaki şeylerin hareketiyle analoji kurularak gözlemlere yamanmış bir şeydir (kayrak tirsukeleleri hatırlayın). Heisenberg gündelik hayatla kurulan analojilerin yarattığı karmaşadan sıyrılıp çalışmalarını, bir atomun ya da elektronun tek bir "durum"unu değil, durum *çiftlerinin* arasındaki ilişkileri tarif eden matematik üzerinde yoğunlaştırdı.

HELİGOLAND'DA ÇIĞIR AÇILIYOR

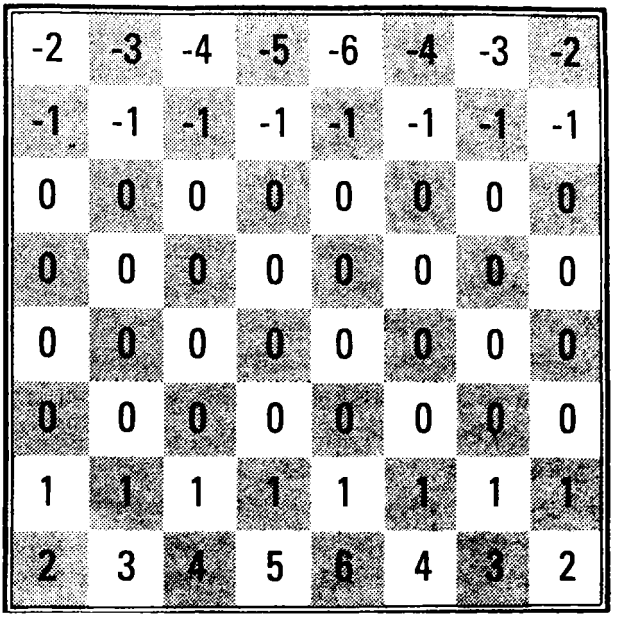
Heisenberg'in 1925 Mayısı'nda şiddetli bir saman nezlesine yakalandığı, iyileşmek için kayalık Heligoland adasına gittiği ve orada kuantum davranışı hakkında bilinenleri biraz önce sözü edilen fikir açısından harıl harıl yorumlama işine giriştiği hep anlatılır. Adada yapacak bir şey olmadığından, nezlesi de geçince Heisenberg bu problem üzerinde yoğun biçimde çalışabilmiştir. Özyaşamöyküsel eseri *Physics and Beyond*'da sayılar yerli yerine otururkenki duygularını anlatıp, bir sabah saat üçte hesaplamalarının "işaret ettiği kuantum mekaniği türünün istikrarlılığı ve tutarlılığından artık hiç şüphe" duymadığını söyler. "Önce iyiden iyiye dehşete kapıldım. Atom fenomenlerinin yüzeyinden, tuhaf güzellikteki bir iç kısma baktığımı hissediyordum ve doğanın çok cömertçe önüme serdiği bu matematiksel yapıları o an incelemeye başlayacağım düşüncesi neredeyse başımı döndürmüştü."

Heisenberg Göttingen'e dönünce çalışmasını yayımlanmaya uygun bir biçime sokmak için üç hafta harcadıktan sonra yazının bir nüshasını önce eski arkadaşı Pauli'ye gönderip bir anlam ifade edip etmediğini sordu. Pauli heyecanlıydı, fakat Heisenberg yoğun gayretlerinden bitkin düşmüştü ve eserinin basıma hazır olup olmadığından emin değildi. Yazıyı Born'a bırakıp uygun görürse neticeye bağlamasını isteyerek Temmuz 1925'te Leyden ve Cambridge'de bir dizi konferans vermek üzere ayrıldı. İşin komik tarafı oradaki dinleyicilerine bu yeni çalışmasını anlatmayı istememiş olmasıydı. Dinleyiciler haberlerin başka kanallardan kendilerine ulaşmasını beklemek zorunda kalmışlardı.

Born Heisenberg'in yazısını *Zeitschrift für Physik*'e gönderecek kadar memnun kalmıştı ve Heisenberg'in tesadüfen karşısına çıkan şeyin ne olduğunu neredeyse hemen anlamıştı. Bir atomun iki durumunu içeren matematiği sıradan sayılarla ele almak mümkün olamazdı, onun yerine Heisenberg'in tablolar halinde düşündüğü bir sayı dizisi gerekiyordu. En iyi analoji satranç tahtasıyla kurulur. Tahtada 64 kare vardır ve buna göre her kareyi 1'den 64'e kadar bir rakamla tanımlayabilirsiniz. Fakat satranç oyuncuları tahtadaki dikey kare kümelerini, yani "sütunlar"ı a, b, c, d, e, f, g ve h şeklinde; yatay karelerin oluşturduğu "sıralar"ı da 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 şek-



Şekil 6.1 Satranç tahtasındaki her bir kare b4 ya da f7 gibi bir harf ve sayı çiftiyle tanımlanabilir. Kuantum durumları da sayı çiftleriyle tanımlanır.



Şekil 6.2 Satranç tahtasındaki her bir karenin "durum"unu o karede bulunan satranç taşı belirler. Bu işaretleme sistemine göre piyon 1'le gösterilir, kale 2'yle vs.; pozitif sayılar beyaz taşlardır, negatifler siyah. Bütün tahtanın durumundaki bir değişikliği "şah piyonu iki ileri" gibi ifadelerle ya da cebirsel ifadeyle e2-e4 şeklinde tarif edebiliriz. Kuantum geçişleri de çift durumları (başlangıç ve nihai) birleştiren benzer bir notasyonla tarif edilir; iki halde de bir durumdan ötekine geçişin nasıl meydana geldiği hakkında elimizde bir gösterge yoktur, bunu en iyi atın hamlesiyle ve rokla gösterebiliriz. Satranç analojisinde tahta üzerindeki mümkün olan en küçük değişim, e2-e3 oyununu bir kuantum enerji girişi *hν*'ye karşılık olarak hayal edebiliriz, öte yandan e3-e2 "geçiş"i aynı miktardaki kuantum enerjinin serbest kalmasına karşılık gelecektir. Analoji birebir örtüşmese de farklı notasyon biçimlerinin aynı olayı tarif edişine dikkat çeker. Heisenberg, Dirac ve Schrödinger de benzer biçimde aynı kuantum olaylarını tarif etmek için farklı matematik notasyon biçimleri bulmuştur.

linde gösteren bir işaretleme sistemini tercih ederler. Artık tahtadaki her bir kare bir çift emsalsiz tanım etiketiyle tanımlanabilir: a1 bir kalenin açılışta durduğu karedir; g2 sağdaki atın önündeki piyonunun karesidir, vs. Heisenberg'in tablosu, satranç tahtası gibi, iki boyutlu sayı dizisi içeriyordu çünkü iki durumu ve bunların birbirleriyle etkileşimini içeren hesaplamalar yapıyordu. Bu hesaplamalar başka şeylerin yanı sıra böyle iki sayı kümesinin ya da dizisinin birbiriyle çarpılmasını içeriyordu, Heisenberg de bu işi görecek doğru matematik hilelerini canla başla çalışarak bulup çıkardı. Fakat çok tuhaf bir sonuçla çıkagelmişti, bu sonuç o kadar şaşırtıcıydı ki hesaplarını yayımlama konusundaki çekingenliğinin sebeplerinden biri buydu. İki dizi birbiriyle çarpıldığında "cevap", çarpımı hangi sırayla yaptığınıza göre değişiyordu.

Bu gerçekten tuhaf bir şey. Sanki 2 x 3 ile 3 x 2 aynı şey değilmiş gibi ya da cebirsel olarak $a \times b \neq b \times a$ gibi. Born gece gündüz bu garipliği dert edinmiş ve bunun ardında temel bir şey olduğuna kanaat getirmişti. Birdenbire ışığı gördü. Heisenberg'in büyük zahmetle kurduğu matematik dizileri ve sayı tabloları matematikte *zaten biliniyordu*. Böyle sayılar için koskoca bir hesap sistemi vardı; bu sayı dizilerine matris deniyordu ve Born yirminci yüzyılın başlarında Breslau'da öğrenciyken bunlar üzerinde çalışmıştı. Matematiğin bu gölgede kalmış dalını yirmi yıl sonra hatırlaması gerçekten de şaşırtıcı değil, zira matrislerin, yeni öğrenen öğrenciler üzerinde daima derin bir etki bırakan temel bir özelliği vardır – matrisleri çarptığınızda elde edeceğiniz sonuç, çarpımı yaptığınız sıraya bağlıdır ya da matematik diliyle söylersek matrislerde çarpmanın değişme özelliği yoktur.

KUANTUM MATEMATİĞİ

Born 1925 yazında Pascual Jordan'la çalışarak bugün matris mekaniği olarak bilinen şeyin temellerini atmıştır. Heisenberg de eylülde Kopenhag'a döndüğünde mektuplaşma yoluyla onlara katılmış ve

hep birlikte ortaya kuantum mekaniği üzerine kapsamlı bir bilimsel makale çıkarmışlardır. Heisenberg'in ilk makalesinden çok daha açık ve anlaşılır olan bu makalede üç yazar kuantum değişkenlerinin değişme özelliğinin olmamasının önemini vurgulamışlardır. Born daha önce Jordan'la yazdığı makalede $\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = \hbar/i$ bağıntısını bulmuştu, burada **p** ve **q** kuantum değişkenlerini temsil eden matrislerdir, kuantum dünyasında momentum ve konumun dengidirler. Yeni denklemde eksi birin kare kökü olan *i* ile birlikte Planck sabiti görülmektedir; sonraları "üç adamın makalesi" diye anılacak olan makalede Göttingen ekibi bunun "temel kuantum mekaniği bağıntısı" olduğunu vurguluyordu. Fakat fizik açısından bu ne anlama geliyordu? Planck sabiti o güne gelindiğinde artık yeterince biliniyordu ve fizikçiler *i*'yi içeren denklemleri biliyorlardı (farkına varabilselerdi başlarına gelecek şey hakkında bir ipucuydu bu, zira böyle denklemler genellikle salınımlar ya da dalgalarla ilgilidir). Fakat 1925'te çoğu matematikçi ve fizikçi matrislere hiç aşina değildi, ayrıca Planck'ın 1900'de *h*'yi ortaya atışı o zamanki fizikçilere ilk bakışta nasıl tuhaf gelmişse değişme özelliği olmaması da şimdi bu insanlara tuhaf geliyordu. Buradaki matematiğin içinden çıkabilenler için sonuç müthişti. Newton mekaniği denklemlerinin yerini matrisleri içeren benzer denklemler alıyordu ve Heisenberg'in dediği gibi "Newton mekaniğindeki enerjinin korunumu gibi eski sonuçların çoğunun yeni sistemde de elde edilebileceğini görmek tuhaf bir şeydi."[31] Başka bir deyişle matris mekaniği kendi bünyesinde Newton mekaniğini de *içeriyordu*, tıpkı Einstein'ın görelilik denklemlerinin özel bir durum olarak Newton denklemlerini içermesi gibi. Ne yazık ki, buradaki matematiği çok az insan anlayabiliyordu o yüzden de Heisenberg ve Göttingen grubunun ne kadar önemli bir çığır açtıklarını çoğu fizikçi hemen takdir etmemiştir. Fakat bir istisna vardı, o da İngiltere'de Cambridge'deydi.

8 Ağustos 1902'de doğan Paul Dirac Heisenberg'den birkaç ay küçüktü. Dirac genellikle Newton ayarındaki tek İngiliz kuramcı olarak görülür ve bugün kuantum mekaniği olarak bilinen şeyin en

31. *Physics and Philosophy*, s. 41.

eksiksiz halini o geliştirmiştir. Fakat 1921'de Bristol Üniversitesi'nden mühendis olarak mezun olana kadar kuramsal fizikle özel olarak ilgilenmemişti. Mühendis olarak iş bulamayınca Cambridge'de matematik öğrenimi görme teklifi aldığı halde parasızlıktan bunu kabul edememiştir. Bristol'da kalıp anne babasıyla oturan Dirac üç yıllık matematik kursunu mühendis eğitimi sayesinde sadece iki yılda tamamlamış ve 1923'te uygulamalı matematik alanında lisans diploması almıştı. Dirac artık Bilimsel ve Endüstriyel Araştırma Bölümü'nün sağladığı maddi destekle nihayet Cambridge'e araştırma yapmak için gidebilecek duruma gelmişti – kuantum kuramını ilk defa Cambridge'e varınca duymuştu.

Yani Dirac Heisenberg'in Temmuz 1925'te Cambridge'de yaptığı konuşmayı dinlerken kimsenin tanımadığı, tecrübesiz bir araştırma öğrencisiydi. Heisenberg o sırada yeni çalışmasını açıklamadıysa da Dirac'ın danışmanı Ralph Fowler'a bundan bahsetmişti, bunun sonucu olarak da makale *Zeitschrift*'de çıkmadan önce deneme nüshasını ağustosun ortasında Fowler'a göndermişti. Fowler makaleyi Dirac'a vermiş, o da Göttingen dışından hiç kimse (Heisenberg'in arkadaşı Pauli dışında) yeni kuramı inceleme fırsatı bulamadan makaleyi önüne almıştı. Bu ilk makalede, kuantum mekaniğindeki değişkenlerin değişme özelliğinin olmamasına –matrislere– işaret etmişse de Heisenberg bu fikri geliştirmeden, biraz hızlı geçiştirmişti. Dirac denklemi ciddi olarak ele alınca çok geçmeden $a \times b \neq b \times a$ olgusunun *temel* önem taşıdığını anlamıştı. Heisenberg'in aksine bu şekilde davranan matematiksel niceliklerden haberdardı ve birkaç hafta içerisinde Heisenberg'in denklemini William Hamilton'ın bir asır öncesinde geliştirdiği bir matematik dalına uygun olarak yeniden ele aldı. Bilimde karşınıza çıkabilecek en hoş ironik durumlardan biriydi bu, zira elektron yörüngelerini tümden devre dışı bırakan yeni kuantum kuramında o kadar işe yarayan Hamilton denklemleri, on dokuzuncu yüzyılda asıl olarak birbiriyle etkileşim içinde olan birkaç gezegenin bulunduğu güneş sistemi gibi bir sistemdeki cisimlerin yörünge hesaplarına yardımcı olsun diye geliştirilmişti.

Yani Dirac Göttingen grubundan bağımsız olarak kuantum mekaniği denklemlerinin klasik mekanik denklemleriyle aynı matema-

tik yapısına sahip olduğunu ve klasik mekaniğin özel bir durum olarak büyük kuantum sayılarına karşılık gelecek şekilde ya da Planck sabitini sıfır olarak aldığınız takdirde kuantum mekaniğine dahil olduğunu keşfetmişti. Dirac kendi yolunda giderken dinamikleri başka bir matematiksel biçimde daha ifade etme yolunu geliştirmiştir. Bunu yaparken kuantum cebri dediği kuantum değişkenlerinin yani "q sayıları"nın toplamını ve çarpımını içeren özel bir cebir biçimi kullanmıştı. Bu q sayıları tuhaf yaratıklardır. En başta da Dirac'ın yarattığı bu matematik dünyasında *a* ve *b* sayılarından hangisinin büyük olduğunu söylemenin imkânsız olması yüzünden: Bir sayının başka bir sayıdan büyük ya da küçük olması meselesinin bu cebirde yeri yoktur. Ama yine o matematiksel sistemin kuralları atom süreçlerinin işleyişiyle ilgili gözlemlere uyuyordu. Hatta, kuantum cebrinin matris mekaniğini içerdiğini söylemek yanlış olmaz, fakat bunun yanı sıra çok daha fazlasını yapmaktadır.

Fowler Dirac'ın çalışmasının önemini hemen fark etti ve bu makale onun girişimiyle Aralık 1925'te *Proceedings of the Royal Society*'de yayımlandı. Başka şeylerin yanı sıra makale yeni kuramın esas bileşeni olarak Heisenberg'in birkaç yıl öncesinde canını sıkan buçuklu kuantum sayılarını da içeriyordu. Dirac'ın gönderdiği makalenin nüshasını okuyan Heisenberg onu göklere çıkarıyordu: "Kuantum mekaniği üzerine yazdığın olağanüstü güzellikteki makaleyi büyük bir ilgiyle okudum, bütün sonuçlarının doğru olduğundan hiç şüphem yok... [makale] gerçekten bizim buradaki çabalarımızdan daha iyi ve daha güçlü yazılmış."[32] 1926'nın ilk yarısında Dirac bu çalışmayı dört nihai makalelik bir yazı dizisine taşıyıp tezi oluşturan bu bütün paketle haydi haydi hak ettiği doktorasını aldı. Bütün bunlar olup biterken Pauli matris yöntemleri kullanarak hidrojen atomunun Balmer serisini doğru tahmin etmişti ve 1925'in sonuna gelindiğinde bazı tayf çizgilerinin ikili yapılara bölünmesinin en iyi biçimde, yeni özellik spin'in elektrona tahsis edilmesiyle açıklanabileceği ortaya çıkmıştı. Taşlar gerçekten yerli yerine oturuyordu ve matris mekaniğinin farklı üsleri tarafından kullanılan farklı matematik

32. Aktaran Mehra ve Rechenberg, 4. cilt, s. 159.

araçları aynı gerçekliğin farklı yönlerinden ibaretti.[33]

Yine satranç oyunu bunu açıklamaya yardımcı olabilir. Satranç oyununu yazılı kâğıt üzerinde göstermenin çeşitli yolları vardır. Bir tanesi, bütün taşların konumlarının işaretli olduğu temsili bir "satranç tahtası" basmaktır – fakat bütün bir oyunu kaydetmek istersek bu dünya kadar yer tutar. Başka bir yol ise yer değiştiren taşı adlandırmaktır: "Şah piyonu, Şah piyonu dörde." En özlü cebirsel ifadeyle aynı hamle "e2-e4" olur. Üç farklı tarif gerçek bir olay, yani bir piyonun bir "durum"dan başka bir duruma geçişi hakkında aynı bilgiyi sunmaktadır (tıpkı kuantum dünyasında da olduğu gibi piyonun bir durumdan ötekine nasıl geçtiği hakkında *hiçbir şey* bilmeyiz, hele atın hamlesini düşünürseniz bu daha da barizdir). Kuantum mekaniğinin farklı formüllerle ele alınışları bunun gibi bir şeydir. Dirac'ın cebri matematiksel anlamda en zarif ve "güzel" olanıdır; Heisenberg'in sonrasında Born ve yardımcıları tarafından geliştirilen matris yöntemi daha hantal olmasına rağmen etkili olmuştur.[34]

Dirac en baş döndürücü ilk sonuçları özel görelilik kuramını kendi kuantum mekaniği kuramına sokmaya çalışırken elde etmiştir. Işığın parçacık (foton) olması fikrine itirazı olmayan Dirac her şeyin yanı sıra zamanı da q sayısı olarak denklemlerine dahil edince, bir atomun ışık yaydığında tıpkı ışığın kendi momentumunu taşıyan bir parçacık olması durumunda yapması gerektiği gibi, geri

33. Dirac'ın kuantum mekaniği versiyonunda Hamilton denklemlerindeki kilit bir ifade kuantum mekaniksel ifade $(ab–ba)/i\hbar$ ile yer değiştirmiştir. Bu da Born, Heisenberg ve Jordan'ın birlikte yazdıkları makalede (Dirac'ın ilk kuantum mekaniği makalesinden önce yazılmış fakat Dirac'ın makalesinden sonra yayımlanmıştır) "temel kuantum mekaniksel bağıntı" dedikleri ifadenin başka bir biçiminden ibarettir.

34. Dirac her zamanki ve samimi alçakgönüllüğüyle doğru kuantum denklemlerinin klasik denklemlerin Hamilton biçimine sokulmasından ibaret olduğu anlaşılınca ilerleme kaydetmenin ne kadar kolay olduğunu anlatmıştır. Kuantum kuramını kuşatan her küçük bilmece için gereken tek şey eşdeğer bir klasik denklem kurmak, sonra da onları Hamilton denklemlerine dönüştürüp çözmekti. "Bir oyundu, oynaması çok ilginç bir oyun. Ne zaman küçük sorunlardan birini çözseniz bunun hakkında bir makale yazabilirdiniz. O günlerde ikinci sınıf bir fizikçinin birinci sınıf bir çalışma çıkarması çok kolaydı. O zamandan bu yana böyle görkemli bir zaman yaşanmadı. Şimdi birinci sınıf fizikçilerin ikinci sınıf bir iş çıkarması bile çok zor." (*Directions in Physics*, s. 7.)

çekilmeye maruz kalmak zorunda olduğu "öngörü"süne kaçınılmaz bir şekilde gittiğini büyük bir sevinçle görmüştür ve buradan da Compton etkisinin kuantum mekaniksel bir yorumunu geliştirmeye girişmiştir. Dirac'ın hesaplamaları iki kısma ayrılıyordu, ilki q sayılarını içeren sayısal manipülasyonlar, ikincisi de denklemlerin fiziksel olarak gözlemlenebilir olan şeyler açısından yorumlanması. Bu işlem doğanın "yapıyor" göründüğü "hesaba" tıpatıp uymakta ve arkasından bize gözlemlenen bir olay –mesela elektron geçişi– sunmaktadır fakat ne yazık ki 1926'dan sonraki yıllarda fizikçiler bu fikri sonuna kadar takip etmeyip kuantum kuramının uzun süre beklemiş sorunlarını çözebilecek başka bir matematik tekniği olan dalga mekaniğinin keşfiyle akılları çelinip kuantum cebrinden uzaklaşmışlardır. Matris mekaniği ve kuantum cebri bir kuantum durumundan ötekine geçiş yapan bir parçacık halindeki elektron imgesinden yola çıkarak elde edilmişti. Peki de Broglie'nin ileri sürdüğü, elektronların ve öteki parçacıkların aynı zamanda dalga olarak da düşünülmesi gerektiği fikrine ne diyeceğiz?

SCHRÖDİNGER'İN KURAMI

Matris mekaniği ve kuantum cebri bilim sahnesine nispeten tezahüratsız çıktığı sıralarda kuantum kuramı alanında bir sürü başka etkinlik de yapılıyordu. Görünüşe bakılırsa Avrupa bilimi, mayası gelmiş fikirlerle fokurdayıp duruyordu ve farklı fikirler farklı yerlerden pırtlayıp çıkıyordu, öyle bugün göründüğü gibi mantıksal bir sırada da değil, pek çoğu da yaklaşık aynı zamanlarda farklı insanlar tarafından "keşfediliyordu." 1925'in sonlarına gelindiğinde de Broglie'nin elektron dalga kuramı çoktan sahnede yerini almıştı, fakat elektronun dalga doğasını kanıtlayacak nihai deneyler henüz gerçekleştirilmemişti. Heisenberg ve meslektaşlarının çalışmalarından tamamen bağımsız olarak bu bizi başka bir şeyin keşfine, dalga fikrine dayalı bir kuantum matematiğine götürmüştür.

Bu fikir Einstein aracılığıyla de Broglie'den gelmiştir. Einstein'ın dikkatini çekmemiş olsaydı de Broglie'nin çalışması yıllarca bir

köşede kalabilirdi, hiçbir fiziksel gerçekliği olmayan ilginç bir matematik tuhaflığı olarak görülebilirdi. Born'a bu fikirden bahseden ve sonrasında elektron dalgalarının gerçekliğini ispat eden deneyler zincirini başlatan Einstein'dı; Erwin Schrödinger de, Einstein'ın de Broglie'nin çalışması hakkında yaptığı "basit bir analojinin çok daha ötesinde bir şey olduğuna inanıyorum" yorumunu Einstein'ın Şubat 1925'te yayımlanan yazılarından birinde okumuştu. O günlerde fizikçiler Einstein'ın ağzından çıkan her kelimeye dikkat kesiliyorlardı ve böylece bu büyük adamdan gelen olumlu işaret Schrödinger'i de Broglie'nin fikrinin olduğu gibi kabul edilecek olması halinde ortaya çıkabilecek sonuçları araştırmaya sevk etmeye yetmişti.

Yeni kuantum kuramını geliştiren fizikçiler arasında Schrödinger ayrıksı biriydi. 1887 doğumluydu ve bilime en büyük katkısını yaptığında otuz dokuz yaşındaydı – böylesi önemde özgün bilimsel çalışma için oldukça ilerlemiş bir yaş. Doktorasını 1910'da tamamlamıştı ve 1921'den beri de Zürih'te Fizik Profesörü olarak çalışmaktaydı. Burası, bilimsel saygınlığı olan bir yerdi, ama devrim yaratan yeni fikirlerin ilk akla gelen kaynağı değildi. Fakat ileride göreceğimiz gibi Schrödinger'in kuantum kuramına yaptığı katkı tam da 1920'lerin ortalarındaki eski kuşağın üyelerinden bekleyebileceğimiz türdendi. Göttingen grubu, özellikle de Dirac kuantum kuramını soyutlaştırıp gündelik fiziksel fikirlerden koparırken Schrödinger kuantum kuramını fiziksel dünyanın bildik özellikleri olan dalgalarla tarif ederek kolayca anlaşılan fizik kavramlarını tekrar devreye sokmaya çalışmış, yeni belirlenemezlik fikri ve elektronların bir durumdan ötekine bir anda sıçramaları fikrine karşı ömrünün sonuna kadar mücadele vermişti. Fiziğe problem çözmede kullanılacak çok önemli bir araç sunmuştu, fakat kavramsal bakımdan onun dalga mekaniği geri bir adımdı, on dokuzuncu yüzyıl fikirlerine dönüştü.

De Broglie bir atom çekirdeğinin çevresinde "yörüngede" bulunan elektron dalgalarının her bir yörüngeye tam dalga boyları olarak yerleşmesi gerektiği ve ara yörüngelerin "yasak" olduğu fikriyle, izlenecek yolu işaret etmişti. Schrödinger böyle bir durumda izin verilen enerji seviyelerini hesaplamak için dalga matematiğini kul-

lanmış ve bilinen atom tayfları örüntüleriyle örtüşmeyen sonuçlar bulunca önce hayal kırıklığına uğramıştır. Aslında kullandığı teknikte yanlış yoktu, başlangıçtaki başarısızlığının tek sebebi elektronun spin'ini hesaba katmamış olmasıydı – pek şaşmamak gerek zira o sıralarda, 1925'te elektron spin'i kavramı daha piyasaya çıkmamıştı. O yüzden bu çalışmasını birkaç ay kenara koydu ve böylece kuantum dünyasının eksiksiz, mantıklı ve tutarlı bir izahını yayımlayan ilk kişi olma şansını kaçırmış oldu. De Broglie'nin çalışmasını açıklayan bir kolokyum vermesi istenilince tekrar bu fikre döndü. Hesaplarından görelilik etkilerini kaldırırsa, görelilik etkilerinin önemli olmadığı durumlarda gözlemlenen atomlarda gayet güzel bir uyum elde edeceğini işte o zaman keşfetmiştir. Dirac'ın daha sonra göstereceği gibi elektron spin'i esasen bir görelilik özelliğidir (bu spin'in, gündelik hayatta kullandığımız, nesnelerin sabit bir nokta ya da eksen etrafındaki dönüşleriyle hiçbir alakası yoktur). Böylece Schrödinger'in kuantum kuramına büyük katkısını Heisenberg, Born'la Jordan ve Dirac'ın makalelerinin hemen ardından 1926'da yayımlanan bir dizi makaleyle yapmıştır.

Schrödinger'in kuantum tema'sı üzerindeki çeşitlemelerindeki denklemler gündelik hayattaki gerçek dalgaları –okyanus yüzeyindeki dalgalar ve atmosfer içinde gürültüyü taşıyan ses dalgaları gibi– tarif eden denklemler ailesinin üyesidir. Fizik dünyası bu denklemleri heyecanla karşıladı, özellikle de çok rahat ve bildik geldiği için. Aynı probleme bu kadar farklı iki yaklaşım olamazdı. Heisenberg bütün atom imgelerini kasten bertaraf edip meseleyi sadece deneyle ölçülebilen nicelikler bakımından ele aldı; ne var ki kuramının merkezinde elektronların parçacık oldukları fikri vardı. Schrödinger "gerçek" bir varlık olarak atoma dair net bir fiziksel imgeden yola çıkmıştır; kuramının merkezinde elektronların dalga olduğu fikri yatmaktadır. İki yaklaşım da, kuantum dünyasında ölçülebilen şeylerin davranışını tam olarak tarif eden denklem kümeleri üretmiştir.

İlk bakışta bu hayret verici bir şeydi. Fakat çok geçmeden Schrödinger'in kendisi, Amerikalı Carl Eckart ve sonra Dirac matematiksel olarak farklı denklem kümelerinin aslında tam olarak birbirlerine denk olduğunu, aynı matematiksel dünyayla ilgili farklı gö-

rüşlerden ibaret olduğunu ispat etmişlerdir. Schrödinger'in denklemleri hem değişme özelliğinin olmaması bağıntısını hem de esas itibariyle matris mekaniği ve kuantum cebrinde karşımıza çıkan şekliyle hayati çarpan $\hbar/i$'yi içerir. Aynı probleme yönelik farklı yaklaşımların aslında matematiksel olarak denk olduğunun keşfi fizikçilerin bu yaklaşımlara olan güvenini güçlendirmiştir. Öyle görünüyor ki ne tür matematiksel bir biçimcilik kullanmayı tercih ederseniz edin, kuantum kuramının temel problemleriyle uğraşırken önlenemez bir biçimde aynı "cevaplara" gidersiniz. Matematik açısından Dirac'ın tema çeşitlemesi en eksiksiz olanıdır, zira onun kuantum cebri özel durumlar olarak hem matris mekaniğini hem de dalga mekaniğini içermektedir. Ne var ki, doğal olarak 1920'lerin fizikçileri denklemlerin en bilinen versiyonlarını, Schrödinger'in dalgalarını kullanmayı yeğlediler, çünkü bunları gündelik hayattaki karşılığıyla anlayabiliyorlardı ve denklemlerine gündelik fizik problemlerinden aşinaydılar – optik, hidrodinamik vb. Fakat hikâyenin Schrödinger versiyonunun kazandığı başarı kuantum dünyasını temelden kavrama imkânını onlarca yıl geciktirmiş olabilir.

GERİ ADIM

Geriye dönüp bakınca Dirac'ın dalga mekaniğini keşfetmemiş (ya da icat etmemiş) olması insana şaşırtıcı geliyor, zira Hamilton'un geliştirdiği ve kuantum mekaniğinde çok işe yaradığı kanıtlanmış olan bu denklemlerin kökleri on dokuzuncu yüzyılda ışığın dalga ve parçacık kuramlarını birleştirme teşebbüsüne dayanıyordu. Sir William Hamilton 1805'te Dublin'de doğmuştu ve çok kişi tarafından çağının en önemli matematikçisi olarak görülüyordu. En büyük başarısı (o sıralarda böyle görülmediyse de) optik ve dinamik yasalarını tek bir matematiksel çerçevede birleştirmesiydi, hem bir dalganın hareketini hem de bir parçacığın hareketini tarif etmek için kullanılan bir dizi denklem bulmuştu. Bu çalışma 1820'lerin sonlarıyla 1830'ların başlarında yayımlanmıştır ve her iki yönü de ayrı ayrı çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Hem mekanik hem

de optik, ayrı ayrı on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında araştırmacıların işine yaramıştı, fakat Hamilton'ın asıl derdi olan birleşmiş mekanik/optik sistem pek kimsenin dikkatini çekmemişti. Hamilton'ın çalışmasının bariz içerimi şuydu: Nasıl ki optik alanında ışık "ışın"larının yerini dalga kavramının alması gerekiyorsa, mekanik alanında parçacık izlerinin yerini de dalga hareketlerinin alması gerekir. Fakat böyle bir fikir on dokuzuncu yüzyıl fiziğine o kadar yabancı gelmiş olmalı ki, hiç kimse –hatta Hamilton bile– bunu dile getirmemiştir. Bu fikir gündeme getirilip saçma bulunarak reddedilmiş değildi; hiç kimsenin aklına gelmeyecek kadar ucube bir şeydi. On dokuzuncu yüzyıl fizikçilerinden hiçbirinin varamayacağı bir sonuçtu, böyle olunca da bu fikrin, ancak klasik mekaniğin atom süreçlerini tarif etmekte yetersiz kaldığının kanıtlanmasından sonra yerleşiklik kazanması kaçınılmazdı. Fakat, $a \times b \neq b \times a$'nın mümkün olduğu matematik biçimini de keşfetmiş olmasını göz önünde tutarsak, Sir William Hamilton'ı kuantum mekaniğinin unutulmuş kurucusu olarak tarif etmek abartılı olmaz. O sıralarda o da olsaydı matris mekaniğiyle dalga mekaniği arasındaki bağlantıyı hemen görürdü; Dirac da görebilirdi, fakat başlangıçta o bağlantıyı atlamış olması gerçekten şaşırtıcı değil. Ne de olsa ilk ana araştırması içine gömülmüş bir öğrenciydi, ayrıca insanın birkaç hafta içinde yapacağı şeylerin de bir sınırı vardır. Gerçi bundan da önemlisi Dirac soyut fikirlerle ilgileniyordu, Heisenberg'in kuantum fiziğini, elektronları atom çekirdekleri etrafında yörüngede dönüyormuş gibi gösteren o hoş gündelik hayat resminden koparma girişiminin takipçisiydi ve o tür güzel, sezgisel fiziksel bir atom resmi bulmak gibi bir beklentisi yoktu. İnsanların hemen fark etmediği şey dalga mekaniğinin kendisinin de, Schrödinger'in beklentilerine rağmen, insanı rahatlatan böyle bir resim sağlamadığıydı.

Schrödinger dalgaları kuantum kuramına koyarak bir durumdan ötekine yapılan kuantum sıçramalarını ortadan kaldırdığını düşünüyordu. Bir elektronun bir enerji seviyesinden ötekine "geçişler"inin bir keman telinin bir notadan ötekine (bir armonik sesten ötekine) geçerkenki titreşim değişikliği gibi olduğunu öngörüyordu ve dalga denklemindeki dalgayı da de Broglie'nin ortaya attığı madde dalga-

sı olarak düşünüyordu. Fakat başka araştırmacılar bu denklemlerin önemini bulmaya çalışırlarken klasik fiziği tekrar merkez haline getirme ümitleri suya düştü. Sözgelimi Bohr'un aklı dalga kavramıyla allak bullak oldu. Nasıl oluyordu da bir dalga ya da bir grup etkileşen dalga Geiger cihazından sanki tek bir parçacığı kaydediyormuş gibi ses çıkartıyordu? Atomda "dalgalanan" şey aslında neydi? Ayrıca çok önemli bir şey de, kara cisim ışımasının doğası Schrödinger dalgalarıyla nasıl açıklanabilirdi? Bunun üzerine Bohr 1926' da Kopenhag'da biraz kalması için Schrödinger'i davet etti ve burada bu sorunları ele alıp Schrödinger'in pek hoşuna gitmeyen çözümler buldular.

Bir kere, dalgaların kendisinin yakından incelenince Dirac'ın q sayıları kadar soyut olduğu çıktı ortaya. Matematik bunların bir gölcükteki dalgacıklar gibi uzayda bulunan gerçek dalgalar olamayacağını göstermişti. Bunlar şekillenim uzayı adı verilen hayali bir matematiksel uzaydaki karmaşık bir titreşim biçimini temsil ediyordu. Daha da kötüsü her bir parçacık (her bir elektron diyelim) kendi üç boyutuna ihtiyaç duyar. Kendi başına bir elektron üç boyutlu bir şekillenim uzayında bir dalga denklemiyle gösterilebilir; iki elektronu göstermek için altı boyutlu bir şekillenim uzayı gerekir; üç elektrona dokuz boyut gerekir vs. Kara cisim ışımasına gelince, her şey dalga mekaniği diline çevrildiğinde bile ayrı ayrı kuantumlara ve kuantum sıçramalarına olan ihtiyaç sürüyordu. Schrödinger bu durumdan nefret etmişti ve çeviride hafif bir farkla sık sık alıntılanan o sözü söylemişti: "Bu lanet kuantum sıçramasından kurtulamayacağımızı bilseydim, asla bu işin içine girmezdim." Heisenberg'in kitabı *Fizik ve Felsefe*'de yazdığı gibi, "...Dalga resmiyle parçacık resmi arasındaki ikilik paradoksu çözülmedi; matematiksel sistem içinde bir yerlerde saklı duruyorlardı."

Hiç kuşkusuz Schrödinger'i şimdi adını taşıyan dalga denklemine götürmüş olan o cazip resim, yani atom çekirdeklerinin çevresinde dönen fiziksel olarak gerçek dalgalar resmi yanlıştır. Dalga mekaniği atom gerçekliğine matris mekaniğinden daha fazla kılavuzluk etmiyor, fakat matris mekaniğinin aksine dalga mekaniği bildik ve insanı rahatlatan bir şeyin *yanılsamasını* veriyor. İşte bu sıcak,

rahatlık veren yanılsama bugüne kadar direnmiş ve atom dünyasının gündelik dünyadan tamamen farklı olduğu olgusunu gizlemiştir. Şimdi kendileri de profesör olmuş birkaç kuşak öğrenci, gündelik hayatta dalgaların davranışları hakkında bildiklerinin atomların davranış şeklinin bir resmini verdiğini hayal edebilmek yerine Dirac'ın yaklaşımının soyut doğasını ciddi olarak ele almaya zorlansalardı kuantum kuramını çok daha derinden kavramayı başarabilirlerdi. İşte o yüzden bana öyle geliyor ki, kuantum mekaniğini yemek kitabı tarzında pek çok ilginç soruna uygulama yolunda çok büyük adımlar atılmış olmasına rağmen (Dirac'ın birinci sınıf iş çıkaran ikinci sınıf fizikçiler hakkındaki sözünü hatırlayın), bugün elli yılı aşkın bir süre sonra, kuantum fiziğinin temel kavranışı açısından 1920'lerin sonlarındaki fizikçilerden daha iyi bir durumda sayılmayız. Schrödinger denkleminin pratik bir araç olarak kazandığı başarı, insanları bu aracın nasıl ve neden çalıştığını derin derin düşünmekten alıkoymuştur.

KUANTUM AŞÇILIĞI

Kuantum aşçılığının temelleri –1920'lerden bu yana gelen pratik kuantum fiziği– 1920'lerin sonlarında Bohr ve Born'un geliştirdiği fikirlere dayalıdır. Bohr bize kuantum dünyasının ikili parçacık/dalga doğasını bağdaştıracak felsefi bir temel vermiştir. Born da kuantum yemek tarifimizi hazırlarken takip etmemiz gereken temel kuralları vermiştir.

Bohr her iki kuramsal resmin de, yani parçacık fiziğinin ve dalga fiziğinin eşit ölçüde geçerli olup aynı gerçekliğin tamamlayıcı tarifleri olduğunu söylemiştir. İki tarif de kendi başına tam değildir, fakat parçacık kavramını kullanmanın daha uygun olduğu şartlar olduğu gibi, dalga kavramını kullanmanın uygun olduğu yerler de vardır. Elektron gibi temel bir varlık ne parçacıktır ne de dalga, fakat bazı şartlarda adeta dalga gibi davranır, bazı şartlarda da adeta parçacık gibi davranır (aslında, tabii ki, bir kayrak tirsukeledir). Fakat hiçbir şartta elektronun aynı anda iki şekilde birden davrandığı-

nı gösteren bir deney icat edemezsiniz. Elektronun karmaşık kişiliğinin iki tamamlayıcı yüzü olan bu dalga ve parçacık fikrine tamamlayıcılık denir.

Born Schrödinger dalgalarını yorumlamanın yeni bir yolunu bulmuştu. Schrödinger denkleminde gündelik hayattaki gölcüğün üzerindeki fiziksel dalgacıklara karşılık gelen önemli şey bir dalga fonksiyonudur ve genellikle Yunan harfi psi (ψ) ile gösterilir. Göttingen'de elektronun parçacık doğasını doğrulamak için neredeyse her gün yeni elektron testleri düzenleyen deneysel fizikçilerle çalışan Born, bu psi fonksiyonunun "gerçek" bir elektron dalgasına karşılık geldiğini bir türlü kabul edemiyordu, halbuki zamanın hemen hemen bütün fizikçileri gibi (o zamandan bu yana da durum değişmemiştir) pek çok problemi çözmede bu dalga fonksiyonlarını çok kullanışlı bulmuştu. Bunun üzerine bir dalga fonksiyonunu parçacıkların varlığıyla bağdaştıracak bir yol bulmaya çalıştı. Tekrar ele aldığı fikir, ışığın doğası hakkında yapılan tartışmada daha önce dile getirilmişti, fakat Born bu fikri devralıp rafine etmiştir. Born parçacıkların gerçek olduğunu söylüyordu, fakat bir anlamda dalgalarla yönlendiriliyorlardı ve dalganın gücü (daha doğrusu ψ^2 değeri) uzayda herhangi bir noktada o parçacığı o belli noktada bulma *olasılığının* ölçüsüydü. Elektron gibi bir parçacığın nerede olduğunu asla kesin olarak bilemeyiz, fakat dalga fonksiyonu bizim, elektronun yerini bulmak için tasarlanan bir deneyi uyguladığımızda onu belli bir yerde bulma olasılığımızı çözmemizi sağlar. Bu fikrin en garip tarafı her elektronun her yerde olabileceği anlamına gelmesidir, sadece bazı yerlerde olma olasılığı fazla, bazı yerlerde olma olasılığı düşüktür. Odadaki bütün havanın köşelerde toplanmasının *mümkün* olduğunu söyleyen istatistik kuralları gibi, zaten belirsiz olan kuantum dünyasındaki belirliliğin bir kısmını da Born'un ψ yorumu kaldırmıştı.

Bohr'un ve Born'un fikirleri Heisenberg'in 1926'nın sonlarında, belirsizliğin kuantum mekaniği denklemlerinin doğasında olduğunu keşfetmesiyle çok iyi uyuşmuştur. $\mathbf{pq} \neq \mathbf{qp}$ diyen matematik aynı zamanda **p**'nin de **q**'nun da ne oldukları hakkında asla emin olamayacağımızı söyler. Eğer **p**'ye elektronun momentumu dersek ve

q'yu da konumunu göstermek için kullanırsak ya **p**'yi ya da **q**'yu çok doğru olarak ölçmeyi düşünebiliriz. Ölçümümüzdeki "hata" oranına $\Delta\mathbf{p}$ ya da $\Delta\mathbf{q}$ denilebilir, zira matematikçiler Yunan harfi deltayı, Δ, değişken parçaların küçük parçalarını göstermek için kullanırlar. Heisenberg'in göstermiş olduğu şey şuydu: Bu örnekte olduğu gibi eğer bir elektronun *hem* konumunu *hem de* momentumunu ölçmeye çalışırsanız asla tam olarak başarılı olamazsınız, çünkü $\Delta\mathbf{p} \times \Delta\mathbf{q}$ Planck sabitinin 2π'ye bölümü olan $\hbar$'den *daima* büyük olmak zorundadır. Bir nesnenin konumunu ne kadar doğru bilirsek, momentumundan –nereye gittiğinden– o kadar az emin oluruz. Momentumunu çok hassas olarak bilirsek de o zaman nerede olduğundan tam emin olamayız. Bu belirsizlik bağıntısının bu kitabın Üçüncü Kısmında bahsedilenden daha geniş kapsamlı içerimleri vardır. Ne var ki burada dikkat edilmesi gereken nokta, bunun elektronun özelliklerini ölçmek için kullanılan deneylerde herhangi bir eksiklik olmasından kaynaklanmamasıdır. Kuantum mekaniğinin ana kuralına göre *ilke olarak* konum/momentum dahil olmak üzere belli özellik çiftlerini aynı anda hassas olarak ölçmek imkânsızdır. Kuantum düzeyinde mutlak doğruluk yoktur.[35]

Heisenberg'in belirsizlik bağıntısı elektronun ya da başka temel varlıkların tamamlayıcı tariflerinin birbirleriyle ne ölçüde örtüştüğünü ölçer. Konum tam bir parçacık özelliğidir – parçacıkların tam olarak yeri belirlenebilir. Oysa dalgaların kesin bir konumları yoktur, fakat momentumları vardır. Gerçekliğin dalga yanını ne kadar bilirseniz, parçacık yanını o kadar az bilirsiniz ya da tam tersi. Parçacıkları tespit etmek için tasarlanmış deneyler daima parçacıkları tespit eder; dalgaları tespit etmek için tasarlanmış deneylerse sade-

35. Gündelik hayatta aynı belirsizlik ilişkisi geçerlidir, fakat **p** ve **q** $\hbar$'den o kadar büyüktür ki söz konusu belirsizlik miktarı ona denk gelen makroskopik özelliğin sadece minik bir kesridir. Planck sabiti h, yaklaşık 6.6×10^{-27}'dir, π de üçten biraz büyüktür. Bu yüzden yuvarlayınca $\hbar$ yaklaşık 10^{-27} olur. Bir bilardo topunun konumunu ve momentumunu bir masa üzerinde yuvarlanırken takip ederek istediğimiz hassasiyette ölçebiliriz ve pratikte ne konumda ne de momentumda 10^{-27} ile kıyaslanabilecek türden doğal bir belirsizlik görünecektir. Her zaman olduğu gibi kuantum etkileri ancak denklemlerdeki rakamların Planck sabitiyle aynı büyüklükte ya da daha küçük olması durumunda önem taşır.

ce dalgaları tespit eder. Hiçbir deney, elektronun aynı anda hem bir dalga hem de bir parçacık gibi davrandığını göstermez.

Bohr kuantum dünyasını anlamamızda deneylerin ne kadar önemli olduğunu vurgulamıştı. Kuantum dünyasını sadece deney yaparak araştırabiliriz ve her deney sonuçta kuantum dünyasından bir soru sorar. Bizim sorduğumuz sorular gündelik hayattaki tecrübelerimizle epey kirlenmiştir, öyle ki, "momentum" ve "dalga boyu" gibi özellikleri ararız ve o terimler cinsinden yorumladığımız "cevaplar" elde ederiz. Bu deneylerin kökeni klasik fiziktedir, oysa biliyoruz ki klasik fizik atom süreçlerinin tarifini vermede işe yaramaz. Ayrıca bunları gözlemleyebilmemiz için atom süreçlerine müdahale etmemiz gerekir ki bu da, Bohr'un dediği gibi, biz onlara bakmadığımız sırada atomların ne yaptığını sormak anlamsız demek oluyor. Born'un açıkladığı gibi yapabileceğimiz tek şey belli bir deneyin belli bir sonuç çıkarması olasılığını hesaplamaktır.

Bu fikirler demetine –belirsizlik, tamamlayıcılık, olasılık ve gözlenen sistemin gözlemci tarafından bozulması– hep birlikte kuantum mekaniğin "Kopenhag yorumu" deniyor. Halbuki Kopenhag'da (ya da başka bir yerde) hiç kimse böyle uzun uzun "Kopenhag yorumu" etiketli kesin bir ifadeyi kâğıda dökmüş değildir ve kilit malzemelerden biri olan dalga fonksiyonunun istatistiksel yorumu aslında Göttingen'deki Max Born'dan gelmiştir. Kopenhag yorumu pek çok insan için pek çok şey demektir – tabii herkes için neredeyse her şey demek değilse. Ayrıca bu yorumun kuantum mekaniğindeki kayrak tirsukelelerin kaygan dünyasına uyan bir kayganlığı da vardır. Bohr bu kavramı ilk defa Eylül 1927'de İtalya'nın Como kentindeki bir konferansta insanlara sunmuştur. Bu da tutarlı kuantum mekaniği kuramının tamama erdiğini göstermiştir. Bu haliyle her yetkin fizikçi temel şeylere kafa yormadan sadece verilen tarifi uygulayarak atom ve moleküllerle ilgili problemleri çözmekte kullanabilirdi.

Sonraki yirmi otuz yıl içinde Dirac ve Pauli gibilerince pek çok temel katkılarda bulunuldu ve yeni kuantum kuramının bu öncüleri Nobel Komitesi tarafından gereği gibi onurlandırıldı, gerçi ödüllerin dağıtımı komitenin kendi tuhaf mantığını izlemiştir. Heisenberg

ödülünü 1932'de aldı, fakat ödülün aynı zamanda çalışma arkadaşları Born ve Jordan'a da verilmemesinden dolayı da çok üzüldü; Born'un kendisi de bundan dolayı yıllarca kırgın kaldı: Sık sık Heisenberg'in kendi (Born) öğretene kadar matrisin ne olduğunu bile bilmediği yorumunda bulunmuştur ve 1953'te Einstein'a yazdığı bir mektupta "o günlerde gerçekten matristen hiç haberi yoktu. Birlikte yaptığımız çalışmanın bütün sefasını Nobel Ödülü'nde olduğu gibi o sürdü."[36] Schrödinger ve Dirac 1933'te fizik ödülünü paylaştılar fakat Pauli ödülünü almak için 1945'e kadar beklemek zorunda kaldı. Bu ödül dışlama ilkesinin keşfinden dolayı verilmişti. Born da en nihayet 1954'te kuantum mekaniğinin olasılık yorumu üzerine yaptığı çalışmadan dolayı Nobel Ödülü'yle onurlandırıldı.[37]

Ne var ki bütün bu etkinlikler –1930'ların yeni keşifleri, verilen ödüller ve 2. Dünya Savaşı'ndan sonraki uzun yıllar boyu süren kuantum kuramının yeni uygulamaları– köklü ilerlemeler döneminin şimdilik kapanmış olduğunu gizlememelidir. Belki yine böyle bir dönemin eşiğinde olabiliriz ve Kopenhag yorumunu ve Schrödinger'in dalga fonksiyonunun o huzur verici sahte aşinalığını bir kenara atıp yeni gelişmeler kaydedilebilir. Fakat bu müthiş olasılıklara bakmadan önce 1920'lerin sonuna doğru esas itibariyle tamam olan kuramla ne kadar çok şey başarılmış, belirtmek de boynumuzun borcudur.

36. *Born-Einstein Letters*, s. 203.

37. Zahmet etmişler, diye düşünmüş Born (doğruyu söylemek gerekirse pek çok kişinin görüşü de aynı minvaldeydi). *Born-Einstein Letters*'da şöyle diyor (s. 229): "Nobel Ödülü'nü 1932'de Heisenberg'le beraber almamam, Heisenberg'den gelen nazik mektuba rağmen o sırada beni çok incitmişti." Dalga denkleminin istatistiksel yorumu üzerine yaptığı çalışmanın kıymetinin geç anlaşılmasını Einstein, Schrödinger, Planck ve de Broglie'nin bu fikre karşı çıkmalarına bağlıyor –Nobel heyetinin kesinlikle hafife alamayacağı isimler– ve laf arasında, istatistiksel fikirleri kendi bünyesine katan Kopenhag yorumunu kastederek "bugün her yerde benim başlattığım düşünce tarzına *kendi* adını veren Kopenhag okulu" diye bir laf sarf ediyor. Bunlar ihtiyar bir adamın huysuz sözleri değil, kayda değer temelleri olan şeyler; kuantum mekaniği işindeki herkes Born'un katkısının bu kadar geç de olsa takdir edilmiş olmasına çok sevindi. Ama kimse daha sonra Jagdish Mehra'ya şöyle demiş olan Heisenberg kadar sevinmiş olamazdı: "Born'a Nobel Ödülü verilince öyle rahatladım ki." (Mehra ve Rechenberg, cilt 4, s. 281.)

Yedinci Bölüm

Kuantum Aşçılığı

Kuantum yemek kitabındaki tarifleri kullanabilmek için fizikçilerin bilmesi gereken birkaç basit şey var. Atom ve temel parçacıkların gerçekten neye benzediklerine dair bir model olmadığı gibi biz onlara bakmadığımız sırada neler olup bittiğini bize söyleyen bir şey de yoktur. Fakat dalga mekaniği denklemleri (bu tema üzerine yapılan çeşitlemelerden en popüler olanı ve yaygın kullanılanı) istatistiksel olarak tahminde bulunmak için kullanılabilir. Bir kuantum sistemini gözlemleyip ölçümlerimizde bir A cevabı elde ettiğimizde, kuantum denklemleri aynı gözlemi belli bir süre sonra yaptığımızda B cevabını (ya da C ya da D ya da her ne ise) elde etme olasılığımızın ne olduğunu söyler. Kuantum kuramı bize atomların nasıl olduğunu ya da onlara bakmadığımız sırada ne yaptıklarını *söylemez*. Ne yazık ki, bugün dalga denklemlerini kullanan insanların çoğu bunu dikkate almaz ve olasılıkların rolüne sadece sözde yer verirler. Öğrenciler Ted Bastin'in ifadesiyle, "bin dokuz yüz yirmili yılların sonlarındaki yaygın fikir oyunlarının billurlaşmış bir biçimini... temele dair sorulara ilişkin neye inandığını aslında kendisine asla sormayan ortalama bir fizikçinin ayrıntılı problemleri çözmede kullandığı şey"i öğrenirler.[38] Dalgaları gerçek gibi düşünmeyi öğrenirler ve içlerinden ancak birkaçı hayallerinde bir atom resmi oluşturmadan kuantum kuramıyla ilgili bir dersi bitirir. İnsanlar olasılık yorumlarıyla ne olduğunu gerçekten anlamadan çalışmaktadırlar. Tariflerin neden işe yaradıklarını anlamadan bile insanların

38. *Quantum Theory and Beyond*, s. 1.

kuantayla gayet güzel yemekler pişirebilmeleri özellikle Schrödinger ve Dirac'ın geliştirdiği denklemlerin ve Born'un yaptığı yorumun gücüne tanıklık etmektedir.

İlk kuantum aşçıbaşısı Dirac'dı. Tıpkı Göttingen dışında yeni matris mekaniğini anlayıp daha da geliştiren ilk kişi olduğu gibi, Schrödinger'in dalga mekaniğini ilk ele alıp daha da geliştirirken sağlam bir zemine oturtan da odur. Denklemleri görelilik kuramının gerekliliklerine uygun hale getirmek için zamanı dördüncü boyut olarak ekleyen Dirac 1928'de şimdi elektronun spin'ini temsil ettiği düşünülen terimi işin içine katması gerektiğini keşfetmiş, bu sayede de o on yıl boyunca kuramcıları şaşkına çevirmiş olan tayf çizgilerinin ikili yapılara bölünmelerini beklenmedik biçimde açıklamıştır. Denklemlerin kaydettiği bu gelişim başka bir beklenmedik sonuç, parçacık fiziğinin modern gelişimine kapıları açan bir sonuç daha atmıştır ortaya.

KARŞI-MADDE

Einstein'ın denklemlerine göre m kütlesine ve p momentumuna sahip bir parçacığın enerjisi şu denklemle verilir:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

bu da momentum sıfırken şu ünlü denkleme dönüşür: $E = mc^2$. Fakat meselenin hepsi bu kadar değil. Daha tanıdık gelen bu ikinci denklem önceki tam denklemin kare kökünü alarak elde edildiği için matematikte E'nin ya pozitif ya da negatif olabileceğini söylemek zorundayız. 2 x 2 = 4 oluyorsa, –2 x –2 = 4 de olur ve buna göre $E = \pm mc^2$. Denklemlerde böyle "negatif kökler" pırtlayınca çoğu zaman anlamsız diye atılır, zira ilgilendiğimiz tek cevabın pozitif kök olduğu "aşikâr"dır. Bir dâhi olan Dirac bu aşikâr adımı atmayıp buradaki imalar üzerinde kafa yordu. Enerji seviyeleri kuantum mekaniğinin göreliliğe dayalı versiyonuyla hesaplandığında iki grup oluşur, bir tanesi mc^2'ye karşılık gelen tamamı pozitif denklem, öteki de $-mc^2$'ye karşılık gelen tamamı negatif denklem. Kurama göre

elektronların dolmamış en düşük enerji durumuna düşmeleri gerekir, fakat en yüksek negatif enerji seviyesi bile en düşük pozitif enerji durumundan daha düşüktür. O halde negatif enerji seviyeleri ne anlama gelmektedir ve evrendeki bütün elektronlar neden bu enerji seviyelerine düşüp ortadan kaybolmamıştır?

Dirac'ın cevabı, elektronların fermiyon olmalarından dolayı olası her duruma ancak tek bir elektronun (ya da her enerji seviyesine zıt spin'li iki elektronun) gidebilmesi olgusuna dayalıydı. Dirac'ın akıl yürütmesine göre elektronlar negatif enerji durumlarına bütün bu durumlar zaten dolu olduğu için düşmüyorlardı. Bizim boşluk dediğimiz şey aslında bir negatif enerjili elektronlar deniziydi! Dirac burada da durmadı. Elektrona enerji verince elektron enerji durumlarının basamağında yukarı atlar. O halde negatif enerji denizindeki bir elektrona yeterli enerji verirsek o zaman elektron gerçek dünyaya atlayıp normal bir elektron gibi görünür hale gelmeliydi. $-mc^2$ durumundan $+mc^2$ durumuna gelmek tabii ki $2mc^2$'lik bir enerji girdisi gerektirir, bu da elektron kütlesi için yaklaşık 1 MeV'tur ve atom süreçlerinde ya da parçacıklar birbirleriyle çarpıştığında kolayca elde edilebilir. Gerçek dünyaya terfi ettirilen negatif enerjili elektron her bakımdan normal olacaktır, fakat negatif enerji denizinde geriye bir delik, yani negatif yüklü bir elektronun *yokluğunu* bırakacaktır. Dirac böyle bir deliğin pozitif yüklü bir parçacık gibi davranması gerektiğini söylüyordu (tıpkı çift olumsuzun bir olumlu etmesi gibi, negatif enerji denizindeki negatif yüklü bir elektronun yokluğu bir pozitif yük olarak kendini göstermelidir). Bu fikri ilk düşündüğünde durumun simetrisinden dolayı bu pozitif yüklü parçacığın elektronla aynı kütleye sahip olması gerektiği yönünde akıl yürütmüştü. Fakat bu fikri yayımladığı bir zayıflık anında pozitif parçacığın, 1920'lerin sonlarında bilinen diğer tek parçacık proton olabileceğini ileri sürdü. *Directions in Physics*'de kendisinin de anlattığı gibi bu tamamen yanlıştı. Dirac deneycilerin, elektronla aynı kütleye sahip fakat pozitif yüklü, daha önce bilinmeyen bir parçacığı bulacaklarını önceden söyleme cesaretini göstermeliydi.

Önceleri Dirac'ın çalışmasını nasıl değerlendirmek gerektiğinden kimse pek emin değildi. Elektronun pozitif karşılığının proton

olduğu fikri kabul görmemişti, fakat Amerikalı bir fizikçi Carl Anderson 1932'de öncülük ettiği kozmik ışınlar gözlemini yaparken pozitif yüklü bir parçacığın izine rastlayıncaya kadar hiç kimse bu fikri zaten pek ciddiye almamıştı. Kozmik ışınlar uzaydan dünyaya ulaşan yüksek enerjili parçacıklardır. Bunları Birinci Dünya Savaşı'ndan önce Avusturyalı Victor Hess keşfetmiş ve bundan dolayı Hess 1936'da Anderson'la Nobel Ödülü'nü paylaşmıştı. Anderson'ın deneyleri, yüklü parçacıkların bir buhar hücresini geçerken izini sürmeyi içeriyordu. Buhar hücresi parçacıkların, uçağın havada bıraktığı iz gibi içeride iz bıraktıkları bir aygıttır. Anderson burada bazı parçacıkların bir manyetik alanla bükülen izler bıraktığını keşfetti. Bu izler elektronun bıraktığı iz büyüklüğünde, ancak ters yöndeydi. Bunlar sadece elektronla aynı kütleye sahip fakat pozitif yüklü parçacıklar olabilirdi ve bunlara "pozitron" adı verildi. Anderson, Dirac kendi ödülünü aldıktan üç yıl sonra bu keşfinden dolayı 1936'da Nobel Ödülü aldı ve bu keşif fizikçilerin parçacık dünyası hakkındaki görüşlerini değiştirdi. Yüksüz bir atom parçacığının varlığından uzun süredir şüphelenmişler ve James Chadwick 1932'de nötron denen bu parçacığı bulmuştu (bundan dolayı 1935'te Nobel Ödülü almıştır) ve fizikçiler pozitif proton ve yüksüz nötrondan oluşan atom çekirdeği ve etrafında negatif elektronlar fikrinden memnun sayılırdı. Fakat pozitronun bu çerçevede yeri yoktu ve parçacıkların enerjiden yaratılabilecekleri fikri temel parçacık kavramını tümden değiştirdi.

İlke olarak Dirac süreciyle istediğiniz parçacığı enerjiden üretebilirsiniz, fakat negatif enerji denizindeki "delik", yani karşı-parçacık da bunun yanı sıra üretilmek zorundadır. Fizikçiler bugün parçacık-üretimi hikâyesini daha ağdalı dille anlatmayı yeğleseler de kurallar hep aynıdır ve kilit kurallardan biri de şudur: Bir parçacık ne zaman eşi olan karşı parçacıkla karşılaşsa "deliğe düşer" ve $2mc^2$'lik enerji açığa çıkararak ortadan kaybolur, fakat üflenmiş sigara dumanı gibi değil gama ışını patlaması gibi. 1932'den önce pek çok fizikçi buhar hücrelerinde parçacık izlerini gözlemlemişti ve gözlemledikleri pek çok iz herhalde pozitrondan dolayıydı, fakat Anderson'ın çalışmasına kadar bu tür izlerin hep elektronların bir

atom çekirdeği içine doğru hareket etmesinden dolayı olduğu varsayılmıştı, pozitronların dışa doğru hareketlerinden dolayı değil. Fizikçiler yeni parçacıklara karşı önyargılıydılar. Bugünse durum tersine dönmüş durumda ve Dirac şöyle söylüyor: "İnsanlar ister kuramsal ister deneye dayalı olsun en ufak kanıt gördü mü yeni bir parçacık bulduk zannetmeye bayılıyorlar." (*Directions in Physics*, s. 18). Sonuç olarak parçacık hengâmesi sadece 1920'lerde bilinen iki temel parçacıktan oluşmuyor, 200'den fazla parçacıktan oluşuyor. Bunların hepsi yeterli enerji sağlandığında parçacık hızlandırıcılarda üretilebilir, ama bunların çoğu son derece kararsız olup çabucak "bozunarak" başka parçacık ve ışıma yağmuruna dönüşür. O hengâme içinde, 1950'lerin ortalarında keşfedilmiş olan karşı-proton ve karşı-nötron neredeyse kaybolmuştur, fakat Dirac'ın özgün fikirlerinin doğru olduğunun önemli bir teyididir.

Parçacık çiftliği hakkında koskoca kitaplar yazılmış ve pek çok fizikçi kendisine parçacık sınıflandırmacısı olarak kariyer yapmıştır. Fakat bana öyle geliyor ki böyle bir parçacık bolluğunda çok temel bir şey olduğundan söz edilemez; durum kuantum kuramından önceki tayf ölçümündeki duruma benziyor. O zamanlar tayf ölçümü uzmanları farklı tayflardaki çizgiler arasındaki ilişkileri ölçüp sınıflandırabiliyorlardı, fakat gözlemledikleri bu ilişkilerin altında yatan sebepler hakkında hiçbir şey bilmiyorlardı. Bilinen haddinden fazla parçacığın yaradılış kurallarını açıklayacak olan şey daha hakiki bir temel olmalıdır, bu görüşü Einstein yaşam öykücüsü Abraham Pais'a 1950'lerde ifade etmiştir. "Bu tür şeyleri dert etmek için erken olduğunu ve bu parçacıkların ileride birleşik alan kuramı denklemlerininin çözümüne yardımcı olacağını düşündüğü açıktı."[39] Aradan otuz yıl geçtikten sonra Einstein haklıymış gibi görünüyor ve parçacık çiftliğini içine katan tek olası birleşik kuramın kabataslak ana hatları Sonsöz kısmında anlatılacak. Burada şunu belirtmek yeterli olacaktır: 1940'lardan bu yana süregelen büyük parçacık fizik patlamasının kökenleri kuantum yemek kitabındaki ilk tariflerden olan Dirac'ın geliştirdiği kuantum kuramındadır.

39. *Subtle Is the Lord*, s. 8.

ÇEKİRDEĞİN İÇİ

Kuantum mekaniğinin atomların davranışını açıklamadaki zaferinden sonra fizikçilerin dikkatlerini çekirdek fiziğine çevirmeleri normaldi, fakat uygulama konusunda kazanılan pek çok başarıya rağmen (Three Mile Adası'ndaki reaktör ve hidrojen bombası dahil) hâlâ çekirdeği işleten şeyin ne olduğuna dair atomun davranışı hakkında edindiğimiz fikir kadar net bir fikrimiz yok. Aslında bu çok şaşırtıcı değil. Yarıçap bakımından çekirdek atomdan 100 000 kat küçüktür; hacim de yarıçapın küpüyle doğru orantılı olduğundan, atomun çekirdekten bir katrilyon kat büyük olduğunu (10^{15}) söylemek daha anlamlı olur. Çekirdeğin kütlesi ve yükü gibi basit şeyler ölçülebilir ve bu ölçümler bizi izotop kavramına götürür, yani aynı sayıda protonu olan çekirdeklere. Bu çekirdekler aynı sayıda elektronu (ve aynı kimyasal özellikleri) olan, fakat farklı sayıda nötronu bulunan, bu yüzden de farklı kütle numaralı atomlar oluşturur.

Çekirdeğin içine sıkıştırılmış bütün protonlar pozitif yüklü olduğu ve birbirlerini ittiği için onları bir arada tutmayı sağlayan daha kuvvetli bir "tutkal" türü olmalıdır, sadece çekirdeğin boyutu gibi çok kısa mesafede işleyen bir kuvvet. Bu kuvvete güçlü çekirdek kuvveti denir (bir de zayıf çekirdek kuvveti vardır, elektrik kuvvetinden zayıftır fakat bazı çekirdek tepkimelerinde önemli rol oynar). Ayrıca görünüşe göre nötronlar da çekirdeğin kararlılığında rol almaktadır, çünkü fizikçiler sırf kararlı çekirdeklerdeki proton ve nötronları sayarak elektronların çekirdeğin etrafında gösterildiği kabuk resme benzer bir resim bulurlar. Doğal olarak meydana gelen herhangi bir çekirdekteki en büyük proton sayısı 92'dir, o da uranyum atomunun çekirdeğidir. Fizikçiler 106 protona kadar çekirdek üretmeyi başarmış olsalar da bunlar kararsızdır (atom numarası 94 olan plütonyumun bazı izotopları hariç) ve parçalanıp başka çekirdeklere dönüşürler. Toplam 260 kadar bilinen kararlı çekirdek vardır; bu çekirdekler hakkındaki bilgi durumumuz, bugün bile, Bohr modelinin atomu tarifinden daha elverişsizdir, fakat çekirde-

ğin içinde bir tür yapının bulunduğuna dair net işaretler vardır.

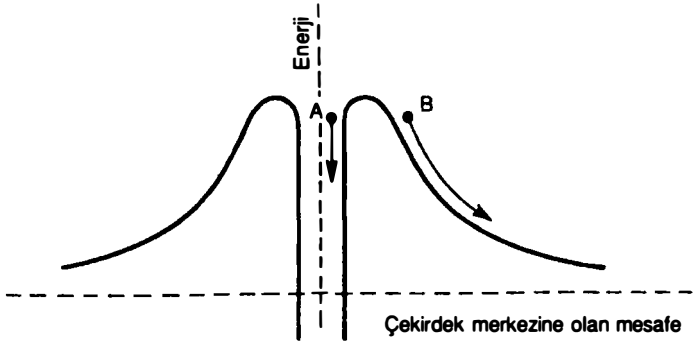
2, 8, 20, 28, 50, 82 ve 126 nükleonu (nötronu ya da protonu) bulunan çekirdekler özellikle kararlıdır ve bunların elementleri, nükleon sayıları bunlardan birazcık farklı olan elementlere göre doğada çok daha fazla bulunmaktadır, bu yüzden bazen bu sayılara "sihirli sayılar" denir. Fakat çekirdeğin yapısında protonlar baskındır ve her bir element için farklı nötron sayısına karşılık gelen olası izotop yelpazesi sınırlıdır – olası nötron sayısı genellikle proton sayısından biraz fazladır ve daha ağır elementlerde biraz daha fazla olur. *Hem* protonu *hem de* nötronu sihirli sayıda olan çekirdekler özellikle kararlıdır ve kuramcılar buna dayanarak çekirdeklerinde yaklaşık 114 protonu ve 184 nötronu olan aşırı ağır elementlerin kararlı olması gerektiğini tahmin etmektedirler – fakat böyle devasa kütleli çekirdekler doğada hiç bulunmamıştır ya da doğada bulunan en devasa çekirdeklere parçacık hızlandırıcılarda daha fazla nükleon yapıştırılarak elde edilememiştir.

Çekirdeklerin en kararlı olanı demir-56'dır ve hafif çekirdekler nükleon kazanarak demir olmayı "severler", öte yandan ağır çekirdekler de nükleon kaybedip en kararlı biçime doğru hareket etmeyi "severler." Yıldızların içinde, en hafif çekirdekler olan hidrojen ve helyum hafif çekirdekleri tekrar birleştiren bir dizi çekirdek tepkimesiyle ağır çekirdeklere dönüştürülürler. Bu tepkimeler de demire doğru giden yolda karbon ve oksijen gibi elementler üretirler, sonucunda da enerji açığa çıkarırlar.

Süpernova gibi bazı yıldızlar patladıklarında çok büyük miktarda bir kütle çekim enerjisi çekirdek süreçlerine dahil edilir, bu da füzyonu demirin ötesine iter ve uranyum ve plütonyum gibi daha ağır elementleri meydana getirir. Ağır elementler nükleonları alfa parçacığı, elektron, pozitron ya da tek tek nötron olarak fırlatıp geriye en kararlı yapıya doğru hareket ederlerken onlar da enerji açığa çıkarırlar. Bu esas olarak üzerinden uzun zaman geçmiş bir süpernova patlamasının birikmiş enerjisidir. Alfa parçacığı esas olarak bir helyum atomunun çekirdeğidir ve iki protonla bir nötron içerir. Çekirdek böyle bir parçacığı fırlatarak kütlesini dört birim, atom sayısını da iki birim küçültür. Bunu kuantum mekaniği kurallarına

ve Heisenberg'in keşfettiği belirsizlik ilkesine göre yapar.

Nükleonlar çekirdeğin içinde güçlü çekirdek kuvvetiyle bir arada tutulurlar, fakat bir alfa parçacığı çekirdeğin hemen dışındaysa elektrik kuvvetiyle güçlü bir biçimde itilecektir. İki kuvvetin birleşmiş etkisi fizikçilerin "potansiyel kuyusu" dediği şeyi oluşturur. Bir yanardağın yandan kesitini düşünün, kenarları hafif eğimli, derin de bir ağzı olsun. Yanardağ ağzının hemen kenarına koyulmuş bir top dağın dışından aşağıya yuvarlanıp gidecektir; hemen ağzın iç kısmına koyulmuş bir top yanardağın merkezine düşecektir. Çekirdeğin içindeki nükleonlar buna benzer bir durumdadırlar: Atomun kalbindeki kuyunun içindedirler, fakat ağzın "kenar"ını bir aşabilseler –çok minik bir miktar bile olsa– elektrik kuvvetinin itmesiyle "yuvarlanıp gideceklerdir." Buradaki pürüz, klasik mekaniğe göre nükleonların ya da alfa parçacıkları gibi nükleon gruplarının kuyudan çıkıp ağzın kenarını aşacak yeterli enerjileri olmamasıdır – zaten olsa kuyunun içinde ne gezecekler. Ne var ki, kuantum mekani-



Şekil 7.1 Atom çekirdeğinin kalbinde bir potansiyel kuyusu. A'daki bir parçacık "tepeye," yani B'ye sıçramaya yetecek enerjiyi kazanamazsa kuyu içinde kalmak zorunda. B'ye gelirse de "bayır aşağı" yuvarlanıp gidecektir. Kuantum belirsizliği zaman zaman bir parçacığın tepeyi tırmanmaya yetecek kendi enerjisi olmadığında A'dan B'ye (ya da B'den A'ya) "tünel kazarak" geçmesine izin verir.

ğinin bu duruma bakış açısı epey farklı. Potansiyel kuyusu hâlâ bir engel oluştursa da aşılmaz değil, bir alfa parçacığının, küçük de olsa, çekirdeğin içinde değil dışında olma gibi belli bir olasılığı vardır. Belirsizlik açısından bakıldığında, Heisenberg'in bağıntılarından bir tanesi enerji ve zamanı içerir ve der ki herhangi bir parçacığın enerjisi sadece, bir Δt zaman dilimindeki, ΔE alanı içinde, ΔE x Δt'nin $\hbar$'den büyük olacağı şekilde tanımlanabilir. Kısa bir süreliğine bir parçacık belirsizlik bağıntısından enerji "ödünç" alabilir, böylece enerjiyi geri vermeden potansiyel kuyusundan çıkabilecek yeterli enerjiyi kazanır. "Uygun" enerji durumuna geldiğinde engelin içi yerine dışındadır ve hızla yoluna devam eder.

Ya da meseleye konumun belirsizliği açısından da bakabilirsiniz. Engelin hemen içine "ait olan" bir parçacık dışarıda görünebilir, zira kuantum mekaniğinde onun konumu sadece bulanık bir şekilde belirlenmiştir. Parçacığın enerjisi ne kadar büyükse kaçması o kadar kolaydır, fakat klasik kuramın gerektirdiği şekilde potansiyel kuyusundan çıkacak kadar enerjisi olması gerekmez. Bu süreç adeta parçacığın engeli tünel açarak aşması gibidir ve bu tastamam bir kuantum etkisidir.[40] Radyoaktif bozunmanın temelini oluşturan budur; fakat çekirdek parçalanmasını açıklamak için başka bir çekirdek modeline bakmamız gerekiyor.

Şu an için kabuklarındaki tek tek nükleonları aklınızdan çıkarın ve çekirdeği bir sıvının damlası olarak düşünün. Tıpkı bir su damlasının değişen şekillerde kımıldaması gibi çekirdeğin bazı kolektif özellikleri de çekirdeğin değişen şeklinden kaynaklanıyormuş gibi

40. Çekirdekler birleştiğinde aynı süreç tersine işler. Bir yıldızın içindeki basınç kullanılarak iki hafif çekirdek birlikte sıkıştırıldığında ancak dışarıdaki potansiyel engeli aşabilirlerse birleşebilirler. O durumda her bir çekirdeğin sahip olduğu enerji miktarı yıldızın merkezindeki sıcaklığa bağlıdır; 1920'lerde astrofizikçiler güneşin içinde olduğunu hesapladıkları sıcaklığın olması gerektiğinden biraz daha az çıkmasına şaşırmışlardır – güneşin merkezindeki çekirdekler klasik mekaniğe göre potansiyel engelini aşıp birleşecek kadar enerjiye sahip değiller. Bunun cevabı, kuantum mekaniği kurallarıyla uyumlu bir şekilde çekirdeklerin bir kısmının biraz daha düşük bir enerjiyle engeli tünel açarak geçmesidir. Başka şeylerin yanı sıra kuantum kuramı güneşin, neden parladığını da açıklar, oysa klasik kuram parlayamayacağını söyler.

açıklanabilir. Büyük bir çekirdek bir içeri bir dışarı yalpalayıp duruyor gibi düşünülebilir, küre şeklinden şişman bir el halterine dönüşür, sonra tekrar eski haline gelir. Böyle bir çekirdeğe enerji verilirse salınım o kadar uç noktaya çıkabilir ki çekirdeği ikiye bölüp iki küçük çekirdeğe ayrılıp alfa ve beta parçacıkları ile nötrondan oluşan minik damlacıkları saçar. Bazı çekirdekler için bu ayrılma hızlı hareket eden bir nötronun çekirdekle çarpışması sonucu tetiklenebilir ve bu şekilde bölünen her çekirdek yakınındaki en az iki çekirdeğin daha bölünmesini sağlayacak kadar nötron üretince bir zincirleme tepki meydana gelir. 92 proton ve 143 nötron bulunduran uranyum-235 için, daima atom numarası 34 ile 58 arasında değişen, eşit olmayan ve toplamı 92 olan iki çekirdek üretilirken serbest nötronlar da saçılır. Her bir bölünme yaklaşık 200 MeV enerji açığa çıkarır ve şayet uranyum parçası nötronların tümden kaçmayacakları kadar büyükse her bir bölünme birkaç yeni bölünmeye daha sebep olur. Üstel artarak kaçmaya terk edilmek, işte bu atom bombası sürecidir; sadece bu sürecin yavaş yavaş işlemesini sağlamak için nötronları soğuran bir malzemeyle ayar yapılırsa suyu ısıtarak buhar elde edip elektrik üretebileceğimiz kontrollü bir atom reaktörümüz var demektir. Bir kere daha, elde ettiğimiz enerji çok önceki ve çok uzaktaki bir yıldız patlamasının depolanmış enerjisidir.

Öte yandan, füzyon sürecinde güneş gibi bir yıldızın enerji üretimini burada, yeryüzünde taklit edebiliriz. Bugüne kadar füzyon merdiveninin sadece ilk basamağını kopyalayabildik, yani hidrojenden helyuma olan kısmı, fakat tepkimeyi kontrol altına almayı başaramadık, sadece hidrojen bombasında, yani füzyonda kendi haline bıraktık. Füzyondaki püf noktası bölünmedekinin tersidir. Büyük bir çekirdeğin parçalanmasını teşvik etmek yerine küçük çekirdekleri pozitif yüklerinin doğal elektrostatik itiş güçlerine karşı bir arada zorlarsınız, o zaman o kadar yakınlaşırlar ki sadece çok kısa bir erimde etkili olan güçlü çekirdek kuvveti elektrik kuvvetini kırıp çekirdekleri bir araya çeker. Bu şekilde birleşen birkaç elektron elde eder etmez bu süreçte ortaya çıkan ısı, birleşmek üzere olan başka bütün çekirdekleri birbirinden ayırmaya yönelen bir enerjinin dışa doğru hücum etmesine sebep olur ve sürecin tamamını oracık-

ta durdurur.[41] Gelecekte çekirdek birleştirme sayesinde sınırsız enerji elde etme umudu yeterli sayıda çekirdeği tek bir yerde işe yarar miktarda bir enerji elde etmeye yeterli sürede bir arada tutabilmenin bir yolunu bulmaya bağlı. Ayrıca çekirdekleri birbirine itmede kullandığımız enerjiden daha fazla enerji açığa çıkaracak bir süreç bulmamız da çok önemli. Bombada her şey kolay – esas olarak, birleştirmek istediğiniz çekirdekleri uranyumla kaplıyorsunuz, sonra da uranyumu çekirdek bölerek patlatıyorsunuz. Çevresindeki patlamadan kaynaklanan içe doğru basınç yeteri sayıda hidrojeni bir araya getirip ikinci ve daha muazzam olan füzyon patlamasını başlatıyor. Fakat sivil enerji santralleri için biraz daha incelikli bir şey gereklidir. Şimdi araştırılan teknikler yüklü çekirdekleri içeride şişe gibi tutacak şekilde ayarlanmış güçlü manyetik alanların kullanımını ve çekirdekleri fiziksel olarak bir arada sıkıştıran lazer demetlerinden gelen ışık palslarını içeriyor. Tabii lazerler kuantum yemek kitabındaki başka bir tarife göre imal ediliyorlar.

LAZERLER VE MAZERLER

Kuantum aşçılığında yeni parçacıklar yapmanın tarifini keşfetmek Dirac gibi usta bir aşçıbaşına düşmüşse de çekirdek süreçleri Bohr atom modeline kıyasla daha eksik bir şekilde anlaşılmaktadır. O halde, Bohr modelinin hâlâ kullanışlı yanları olduğunu öğrenmek fazla şaşırtıcı olmasa gerek. Yakın geçmişteki en egzotik ve heye-

41. Füzyondan enerji elde etmenin bir yolu, bir protonla bir nötronu bulunan bir hidrojen izotopuyla (döteryum), bir protonla iki nötronu bulunan izotopunu (trityum) birleştirmektir. Bunun sonucu ortaya bir helyum çekirdeği (iki proton, iki nötron), serbest bir nötron ve 17.6 MeV'luk enerji çıkar. Yıldızlar hidrojenle yıldızın içinde küçük miktarlarda bulunan karbon gibi çekirdekler arasında oluşan çekirdek tepkimelerini içeren daha karmaşık süreçlerle çalışır. Böyle tepkimelerin doğurduğu net sonuç şudur: Bir helyum çekirdeğine dört proton birleştirilir ve iki elektronla 26.7 MeV'luk enerji açığa çıkar, karbon da başka bir tepkime dizisini katalize etmek için tekrar dolaşıma sokulur. Fakat yeryüzündeki füzyon laboratuvarlarında araştırılmakta olan trityum ve döteryum içeren süreçlerdir.

can verici bilimsel gelişmelerden olan lazerler, Bohr modelini duymuş, şipşak ekmek arası yemekler yapan bütün aşçılarca anlaşılabilir ve yorumlanmaları için pek bir deha gerekmez (Bu örnekte deha bunların imal edildiği teknolojide devreye giriyor, fakat o başka bir hikâye). O halde, Heisenberg'den, Born'dan, Jordan ve Dirac'dan, Schrödinger'den özür dileyerek bir süreliğine bütün kuantum inceliklerini bir kenara bırakıp elektronların bir atomun çevresinde döndüğü o pek derli toplu modele dönelim. Bu tabloya göre bir atom bir kuantumluk enerji kazandığında bir elektronun farklı bir yörüngeye sıçradığını hatırlayalım, işte böyle uyarılmış bir atom yalnız bırakıldığında er ya da geç elektron tekrar temel duruma düşecektir, bu arada belli bir dalga boyu olan çok hassas olarak tanımlı bir kuantum ışıması açığa çıkaracaktır. Bu sürece kendiliğinden ışıma denir ve soğurmanın karşılığıdır.

Einstein 1916'da böyle süreçleri araştırır ve kuantum kuramının istatistiksel temel kurallarını oluştururken (ki daha sonra bunu çok iğrenç bulmuştur) başka bir ihtimalin daha olduğunu fark etmiştir. Uyarılmış bir atom yanından geçen bir foton tarafından adeta dürtüldüğünde fazla enerjisini bırakmaya ve temel duruma geri dönmeye tetiklenebilir. Bu sürece uyarılmış ışıma denir ve bu sadece eğer geçen foton, atomun ışımayla yaymak üzere olduğu fotonla aynı dalga boyuna sahipse mümkün olur. Zincir halindeki çekirdek bölünmesi tepkimeleri sırasında ortaya çıkan nötron kademeli dizisinde [*cascade*] olduğu gibi, doğru dalga boyuna sahip tek bir fotonu olan bir dizi uyarılmış atomun gelip bir atomu uyararak ışımasını sağladığını düşünebiliriz; ilk foton ile yeni foton da iki atomu daha ışıması için uyarır, dört foton beraber dördünü daha uyarır ve bu böyle devam eder. Bunun sonucu, hepsi kesin olarak aynı frekansa sahip olan bir kademeli ışıma dizisidir. Dahası, ışımanın tetiklenme biçiminden dolayı bütün dalgalar tam olarak aynı fazda hareket ederler – bütün dalgalar beraber "yukarı" çıkar ve bütün dalga çukurları beraber "aşağı" iner ve böylece uyarlı ışıma denilen çok arı duru bir ışık demeti oluşturur. Çünkü böyle bir ışımada hiçbir tepe ya da çukur birbirini yok etmez, atomların çıkardığı enerjinin tamamı bu demette mevcuttur ve bu demetin üzerine ışıyacağı küçük bir

malzeme alanına aktarılabilir.

Bir grup atom ya da molekül ısıyla uyarılınca bir enerji seviyesi bandını doldururlar ve kendi hallerine bırakılmış vaziyette uyarsız ve karmakarışık biçimde farklı dalga boylarında enerji yayarlar. Atom ve moleküllerin açığa çıkardıkları enerjiden çok daha az etkili enerji taşırlar. Fakat dar enerji bantlarını öncelikli olarak doldurup sonra da bu banttaki uyarılmış atomların temel durumlarına geri dönüşünü tetikleyecek hileler mevcut. Kademeli diziyi tetikleyecek olan doğru frekanstan zayıf bir ışıma girişidir; çıkış ise aynı frekansta çok daha şiddetli, güçlendirilmiş bir demet halinde olacaktır. Bu teknikler ilk defa 1940'ların sonlarında ABD ve SSCB'deki ekipler tarafından birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiştir. Burada mikrodalga denilen tayfın yaklaşık 1 cm'den 30 cm'ye kadar olan radyo bandındaki ışıması kullanılmıştır; bu işin öncüleri de çalışmaları için 1954'te Nobel Ödülü almışlardır. Bu banttaki ışımaya mikrodalga ışıması dendiği için ve bu sürecin Einstein'ın 1917'deki fikirlerine paralel olarak uyarılmış ışıma yayımı tarafından mikrodalgaların güçlendirilmesini içermesinden dolayı öncüler buna, uyarılmış ışıma yayımıyla mikrodalga güçlendirilmesi adını verdiler [Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation: MASER].

Bu, söz konusu hilenin ışımanın optik frekanslarında işe yaraması için bir yol bulunmasından on yıl önceydi ve 1957'de iki kişi aynı fikri neredeyse aynı zamanda bulmuştu. Bunlardan biri (ilk bulan oymuş gibi görünüyor) Columbia Üniversitesi'nde yüksek lisans öğrencisi olan Gordon Gould; diğeri 1964'te Nobel Ödülü'nü paylaşmış olan mazer öncülerinden Charles Townes'tı. Tam olarak kimin neyi, ne zaman keşfettiği tartışması patent hakları konusunda hukuk savaşına yol açtı, zira mazerlerin optik dengi lazerler (buradaki "l" "ışığın [*light*] güçlendirilmesi"nden geliyor) artık büyük iş, büyük para demekti, fakat neyse ki bizim o konuya bulaşmamız gerekmiyor. Bugün farklı lazer çeşitleri var, en basiti de optik pompalamalı katı lazerlerdir.

Bu tasarımda çubuk şeklinde bir madde (mesela yakut) uçları parlatılmış ve düzleştirilmiş şekilde hazırlanır ve etrafı parlak bir

ışık kaynağıyla, çubuktaki atomları uyaracak kadar enerjiye sahip ışık palsları üreterek hızlı biçimde açılıp kapanabilen bir gaz tüpüyle çevrilir. Bütün düzenek çubuktaki atomların ısıl uyarılmasıyla doğacak etkiyi en aza indirmek için serin tutulur ve lambadan gelen parlak ışık patlamaları atomların uyarılmış duruma getirilmesi (pompalanması) için kullanılır. Lazer tetiklenince binlerce vat enerji taşıyan bir palslık saf yakut ışığı çubuğun düz ucundan çıkar.

Bu tema üzerine çeşitlemelerde sıvı lazerler, floresan boya lazerler, gaz lazerler vb. bulunur. Hepsi aynı temel özellikleri taşır – uyarsız enerji girer ve büyük miktarda enerji taşıyan saf bir palsla uyarlı ışık çıkar. Bir kısmı, mesela gaz lazerler, tetkik amaçlı işlerde "cetvel" işlevi gören kesintisiz, saf bir ışık demeti verir, bunlar rock konserlerinde ve reklamcılıkta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazısı da sert cisimlerde delik açmak için kullanılabilecek kısa süreli fakat güçlü enerji palsları üretir (bir gün askeri kullanım alanı da olabilir). Lazer kesim aletleri giyim endüstrisinden tutun da mikrocerrahiye kadar çeşitli alanlarda kullanılır. Ayrıca lazer ışık demetleri bilgi taşımada radyo dalgalarından çok daha etkilidir, çünkü her saniye geçilen bilgi miktarı, kullanılan ışımanın frekansı yükseldikçe artar. Pek çok süpermarket ürünlerindeki (ve bu kitabın kapağı üzerindeki) barkodlar lazer tarayıcıyla okunur; 1980'lerin başlarında piyasaya çıkmış video diskler ve kompakt diskler lazerle taranır; hakiki üç boyutlu fotoğraflar yani hologramlar lazerle yapılır; ve daha neler neler.

Zayıf sinyalleri (mesela haberleşme uydularından gelenleri) güçlendirmede, radarda ve başka yerlerde mazerlerin kullanılmasını saymasak bile bu listenin sonu gelmez; ayrıca bütün bunlar kuantum kuramının sonradan geliştirilmiş halinin değil, kuantum fiziğinin ilk versiyonlarının ürünü. Bir paket mısır gevreği satın alıp kasada lazerle tarattığınızda, renk renk muazzam lazer gösterilerinin olduğu bir rock konserine gittiğinizde ya da konseri dünyanın bir ucunda uydu bağlantısıyla televizyondan seyrettiğinizde, bir müzik grubunun son albümünü en son hi-fi kompakt disk müzik sisteminde dinlediğinizde ya da bir tablonun üç boyutlu holografik kopyasının büyüsüne hayran kaldığınızda bütün bunlar altmış yıl-

dan fazla zaman önce uyarılmış yayılmanın ilkelerinin temelini atmış olan Albert Einstein ve Niels Bohr sayesinde gerçekleşiyor.

YÜCE MİKRO

Kuantum mekaniği gündelik hayatımıza hiç şüphesiz en çok katı hal fiziği alanında etki etmiştir. "Katı hal" isminin kendisi pek romantik değil; duyduysanız bile muhtemelen kuantum kuramıyla bağdaştırmamışsınızdır. Ne var ki katı hal, transistörlü radyoyu, volkmeni, dijital saati, cep hesap makinelerini, mikro bilgisayarları ve programlanabilir çamaşır makinelerini bize veren fizik dalıdır. Katı hal fiziğinin bilinmemesi onun bilimin kıyıda köşede kalmış bir dalı olmasından değildir, tam tersine o kadar yaygın ve ortadadır ki kanıksanmıştır. Bir kere daha söyleyelim şayet kuantum aşçılığından yeterince anlamasaydık bugün bu cihazların hiçbiri elimizde olmazdı.

Yukarıda sözü edilen bütün cihazlar yariletkenlerin özelliklerine dayalıdır. Yariletkenler, adından da anlaşılacağı gibi, iletkenlerle yalıtkanlar arasında bir yerde özellikleri olan katılardır. Ayrıntılara girmeden tarif edecek olursam, yalıtkanlar elektriği iletmeyen maddelerdir ve iletmemelerinin sebebi kuantum mekaniğinin kurallarıyla uyumlu olarak atomlardaki elektronların çekirdeklerine sıkı sıkıya bağlı olmalarındandır. Metal gibi iletkenlerde her atomun çekirdeğe gevşek biçimde bağlı bazı elektronları vardır ve bunlar atom potansiyel kuyusunun tepesine yakın enerji seviyelerindedir. Bir katı maddede atomlar bir araya toplanınca bir potansiyel kuyusunun tepesi yanındaki atoma ait kuyuyla bütünleşir ve bu yüksek seviyedeki elektronlar bir atom çekirdeğinden ötekine dolaşmakta serbesttirler, artık hiçbir çekirdeğe bağlı olmayıp metal içinde bir elektrik akımını taşıyabilirler.

En nihayetinde iletkenlik özelliği Fermi-Dirac istatistiklerine bağlıdır, ki bu istatistikler bu gevşek bağlı elektronların atom potansiyel kuyularının diplerine düşmelerini yasaklar. Burada sıkı sıkıya

bağlı elektronların enerji durumları tümden doludur. Bir metali sıkıştırmaya kalkıştığınızda basınca karşı koyar; metaller güçlüdür. Metallerin bu kadar güçlü olmasının, basınca bu kadar dirençli olmasının sebebi de fermiyonlarda geçerli olan Pauli dışlama ilkesinden dolayı elektronların birbirine daha da sıkı bastırılamayışıdır.

Bir katıdaki elektronların enerji seviyeleri kuantum mekaniksel dalga denklemleri kullanılarak hesaplanır. Çekirdeklere sıkı sıkıya bağlı elektronların o katıdaki valans bandında olduğu söylenir, bir çekirdekten ötekine serbestçe dolaşan elektronlara ise iletim bandında denir. Bir yalıtkanda bütün elektronlar valans bandındadır; iletkendeyse bazıları iletim bandına çıkmıştır.[42] Yarıiletkende valans bandı doludur ve bu bantla iletim bandı arasında sadece dar bir enerji aralığı mevcuttur – genelde 1 eV civarında. Bu yüzden bir elektronun iletim bandına geçip bir elektrik akımını o madde içinde taşıması kolaydır. Fakat bir iletkenin aksine enerji kazanmış olan bu elektron geride, valans bandında bir delik bırakır. Tıpkı Dirac'ın elektron ve pozitronların enerjiden üretilmesiyle ilgili akıl yürütmesinde olduğu gibi valans bandındaki negatif yüklü elektronun bu boşluğu elektriksel özellikler bakımından pozitif yük gibi hareket eder. Yani doğal bir yarıiletkenin iletim bandında birkaç elektronu, valans bandında birkaç pozitif yüklü deliği bulunur ve her ikisi de elektrik akımını taşıyabilir. Valans bandında arka arkaya deliğe düşen ve arkalarında bir delik bırakan elektronları düşünebilirsiniz. Bu deliklere bir sonraki elektron sıçrar ve bu böyle devam eder. Ya da delikleri ters yönde hareket eden gerçek pozitif parçacıklar olarak da düşünebilirsiniz. Elektrik akımı bakımından etki aynıdır.

Yarıiletkenler aslında ilginç şeyler, özellikle de elektron-pozitron çiftinin üretilmesine net bir analoji oluşturmalarından dolayı. Ne var ki elektriksel özelliklerini kontrol altına almak çok zor, oysa bu malzemeleri gündelik hayatımızda bu kadar önemli kılan da kontroldür. Bu kontrol yapay yarıiletken meydana getirilerek sağlanır, bir çeşidinde serbest elektronlar hâkimdir, ötekinde serbest "delikler".

42. Aslında valans bandının dolu olmadığı başka bir tür iletken daha var, böylece elektronlar valans bandın içinde dolaşabiliyorlar.

İşte bir kere daha, hileyi anlamak kolay da uygulaması o kadar kolay değil. Mesela bir germanyum kristalinde her atomun dış kabuğunda dört elektronu vardır (bu ekmek arası kuantum aşçılığına giriyor, Bohr modeli de işimizi görür) ve bu elektronlar kristali bir arada tutan kimyasal bağları oluşturmak için çevredeki atomlarla "paylaşılır." Germanyum birkaç arsenik atomuyla "katkılandığında" germanyum atomları kristal örgü yapısına hâlâ hâkimdir ve arsenik atomları ellerinden geldiğince araya sıkışmaya çalışır. Kimya açısından arsenikle germanyum arasındaki ana fark arseniğin dış kabuğunda beş elektron olmasıdır. Arsenik atomunun germanyum örgüsü içine girmesinin en iyi yolu da fazla elektronunu atıp germanyum atomuymuş gibi yaparak dört kimyasal bağı almasıdır. Arsenik atomlarının sağladığı fazla elektronlar bu şekilde yaratılmış yarıiletkenin iletim bandında dolaşırlar, fakat bunlara karşılık gelen delikler yoktur. Böyle bir kristale n-tipi yarıiletken denir.

Bunun alternatifi germanyumun (aynı örneğe devam edelim) kimyasal bağ oluşturmak için sadece üç elektronu olan galyumla katkılanmasıdır. Sonuçta mevcut her galyum atomu için valans bandında bir delik yaratmış gibi oluruz ve valans elektronları deliklere sıçrayarak hareket ederler, bu delikler de pozitif yükler gibi davranır. Bu kristallere p-tipi yarıiletken denir. Bu iki tür yarıiletken yan yana koyulduğunda işler ilginç bir hal alır. Engelin bir yanındaki pozitif yük fazlası ve öteki tarafındaki negatif yük elektronları tek bir yönde itmeye, zıt yöndeki hareketlerine de karşı çıkmaya çalışan bir elektrik potansiyel farkı yaratır; diyot adı verilen bu şekilde birleştirilmiş bir yarıiletken kristal çifti sonuçta elektrik akımının sadece tek bir yönde geçmesine izin verir. Biraz daha incelikli söylersek, elektronlar n'den p'ye aradaki boşluğu atlayarak bir deliğe geçmeye teşvik edilirler, bu arada da ışık saçarlar. Bu şekilde ışık üretmek üzere tasarlanmış diyotlara ışık yayan diyotlar yani LED denir ve bazı cep hesap makinelerinde ve kol saatlerinde rakamları göstermek için ya da başka şeylerin gösterilmesinde kullanılırlar. Ters yönde çalışan, yani ışığı emen ve bir delikten yanındaki iletim bandına elektron pompalayan diyotlara fotodiyot denir. Bu da elektrik akımının sadece yarıiletken üzerine bir ışık düştüğünde geçmesini sağ-

lamak için kullanılırlar. Bir ışık demeti önünde hareket ettiğinizde çalışan otomatik kapı açma-kapama cihazlarının temelini oluşturan budur.

Üç yarıiletken parça bir sandviç gibi yan yana koyulunca (pnp ya da npn şeklinde) sonuç bir transistör olur (transistörün her bir ucu genellikle bir elektrik devresine bağlıdır, mesela radyonuzdaki transistörler yarıiletkenin kendisini barındıran metal ya da plastik kutudan uzanmış üç örümcek bacaktan tanınabilir). Uygun biçimde katkılanmış maddelerle np ekleminden geçen küçük bir elektron akımı sandviçin öteki ekleminden çok daha büyük bir akımın geçmesine sebep olur – transistör kuvvetlendirici görevi görür. Bütün elektronik meraklılarının bildiği gibi bu iki bileşen, yani diyot ve kuvvetlendirici, bir ses sisteminin tasarımında kilit rol oynar. Fakat transistörlerin bile bugün modası geçmiş durumda, radyonuzda, şayet dededen kalma değilse, üç bacaklı kutular bulamazsınız.

Ellili yıllara kadar eğlence için eski hantal "telsiz" radyoyu kullanırdık. Bu, ismine rağmen içi bir sürü tel ve bugün yarıiletkenlerin yaptığı işi yapan kızaran radyo lambalarıyla tıka basa doldurulmuş bir cihazdı. Ellilerin sonuna gelindiğinde transistör devrimi başlamıştı ve büyük kızaran radyo lambalarının yerini transistörler, tellerin yerini de üzerlerine devrelerin basılıp transistörlerin lehimlendiği baskı devre kartları aldı. Bundan tümleşik devrelere geçiş kısa sürdü. Tümleşik devrelerde bütün devreler ve yarıiletken kuvvetlendiriciler, diyotlar vs. yekpare olarak birlikte yapılıp bir radyonun, kasetçaların ya da başka bir şeyin beyni olacak biçimde birbirleriyle bağlanıyordu; aynı zamanda benzer bir devrim bilgisayar endüstrisinde de meydana geliyordu.

Eski lambalı radyolar gibi ilk bilgisayarlar da büyük ve hantaldı. İçleri lambalarla ve kilometrelerce uzunluktaki tellerle doluydu. Hatta yirmi yıl önce, ilk katı hal devrimi fırtınası sırasında bile, bir bilgisayarın, daktilo büyüklüğündeki modern mikro bilgisayarın yaptığıyla aynı işi gerçekleştirecek "beyni" için bir evin zemin katına, havalı soğutma sistemi içinse daha da büyük bir yere ihtiyaç olurdu. O tür bir hesaplama gücünü birkaç yüz dolarlık bir masaüstü makinesine aktaran devrim, dedenizin masa üstündeki lambalı

radyosunu bir sigara paketi büyüklüğündeki radyoya dönüştüren devrimle aynıdır ve katı hal devrimini transistörden çipe götürür.

Biyolojik beyin de elektronik bilgisayarlar da anahtar açma kapama işini yaparlar. Beyniniz sinir hücrelerinden yapılmış olan nöronlar halinde 10 milyar anahtar içerir; bir bilgisayarın da diyot ve transistörlerden oluşan anahtarları vardır. 1950'de, beyninizdeki anahtar sayısı kadar anahtarı olan bir bilgisayarın büyüklüğü Manhattan adası kadar olurdu; bugün mikroçipleri birbirine yapıştırarak aynı sayıda çipi bir insan beyni büyüklüğünde bir araya getirmek mümkün olabilirdi, fakat böyle bir bilgisayarın devre bağlantıları sorun olurdu. Zaten böyle bir şey henüz yapılmış da değil. Fakat bu örnek, çipin transistörle kıyaslandığında bile ne kadar küçük olduğunu gösteriyor.

Bugün standart mikroçipte kullanılan yarıiletken silikattır – temelde bildiğimiz kumdan farklı bir şey değil. Doğru yönlendirildiği takdirde elektrik silikattan akar; yönlendirmezseniz akmaz. Yaklaşık 10 cm çapındaki uzun silikat kristaller kesilerek jilet inceliğindeki silisyum pullar elde edilir, sonra yüzlerce küçük dörtgen çipler halinde doğranır, bunların her biri kibrit başından küçüktür ve her çipin üzerine ince bir Yunan pastası gibi kat kat sıklaştırılmış ince elektronik devre kompleksi baskılanır. Bu devre transistörlerin, diyotların, tümleşik devrelerin ve hepsinin dengidir. Bir çip sonuç itibariyle koskoca bir bilgisayar demektir ve modern bir mikro bilgisayardaki diğer bütün unsurlar çipten içeri ve dışarı bilgi taşımakla ilgilidir. Üretilmesi o kadar ucuzdur ki (tabii önce devre tasarımının ve üretim yapacak makineleri kurmanın yüksek maliyeti karşılandıktan sonra) yüzlercesi üretilip test edildikten sonra çalışmayanlar kolayca atılabilmektedir. Sıfırdan başlayarak *bir* çip yapmak bir milyon dolara mal olabilir; ilkinin aynısından dilediğiniz kadar yaparsanız her biri birkaç peniye mal olur.

Demek ki gündelik hayatta kuantumun marifeti sayılabilecek birkaç şey daha var. Kuantum yemek kitabındaki tek bir bölümden tarifler bize dijital saatleri, ev bilgisayarlarını, uzay mekiklerini yörüngeye yerleştiren (bazen de onları çalıştıran insanlar ne söylerse söylesin bunları uçurmamaya karar veren) elektronik beyinleri, ta-

şınabilir TV'leri, taşınabilir stereo sistemleri, insanı sağır eden güçlü hi-fi sistemleri ve bundan kaynaklanan işitme kaybını telafi edecek daha iyi işitme cihazlarını vermiştir. Gerçekten taşınabilir (cep büyüklüğünde) bilgisayarların eli kulağında; gerçekten akıllı makineler biraz daha uzak fakat gerçekçi bir olasılık. Mars'a indirilen araçları, güneş sistemini araştıran *Voyager* araçlarını kontrol eden bilgisayarlar, jetonla çalışan oyunları kontrol eden çiplerin kuzeni sayılır ve kökenleri temel kuantum kurallarına itaat eden elektronların garip davranışındadır. Ne var ki, yüce mikronun öyküsü bile katı hal fiziğinin potansiyelini tüketmeye yetmez.

SÜPERİLETKENLER

Yariletkenler gibi süperiletkenlerin de mantıklı bir ismi var. Süperiletken elektriği görünürde hiçbir dirençle karşılaşmadan ileten bir malzemedir. Devridaime en yakın olduğumuz noktadır – tam olarak yoktan bir şey elde etmek sayılmaz, fakat fizikte ödediğiniz her şeyin karşılığını gerçekten kazıklanmadan aldığınız nadir bir örnektir. Elektron çiftlerinin birbiriyle bağdaşıp birlikte hareket etmelerine sebep olan bir değişiklik olarak açıklanabilir. Her elektronun buçuklu spin'i olmasına ve bu yüzden Fermi-Dirac istatistiklerine ve dışlama ilkesine uymasına rağmen, bir elektron çifti bazı şartlarda tamsayılı bir spin'i olan tek bir parçacık gibi hareket edebilir. Böyle bir parçacık dışlama ilkesiyle sınırlanmaz ve fotonların davranışını kuantum mekaniksel olarak tarif eden aynı Bose-Einstein istatistiklerine uyar.

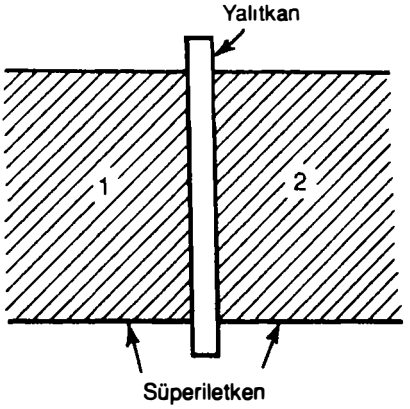
Hollandalı fizikçi Kamerlingh Onnes süperiletkenliği 1911'de cıvanın mutlak sıcaklık ölçeğinde 4.2'nin (4.2 K ya da –269°C) altına kadar soğutulduğunda bütün elektrik direncini kaybettiğini görerek keşfetmiştir. Onnes 1913'teki düşük sıcaklık çalışmasından dolayı Nobel Ödülü aldı, fakat bu ödül başka çalışmalar içindi, özellikle sıvı helyumun üretilmesine olanak sağladığı için. Süperiletkenlik fenomeni 1957'ye kadar tatminkâr bir biçimde açıklanmamıştır. Bu tarihte John Bardeen, Leon Cooper ve Robert Schrieffer

onlara 1972'de Nobel Ödülü kazandıran bir kuramla çıkagelmişlerdir.[43] Sundukları açıklama elektron çiftlerinin bir kristal örgüdeki atomlarla etkileşim biçimine dayalıdır. Bir elektron kristalle etkileşir ve bunun sonucu olarak kristalin çiftteki öteki elektronla etkileşimi değişime uğrar. Böylece elektron çifti normalde birbirlerini itme eğiliminde oldukları halde, gevşek bağlı bir birliktelik oluştururlar, bu da Fermi-Dirac'dan Bose-Einstein istatistiklerine değişimi açıklamaya yeterlidir. Bütün maddeler süperiletken olamaz, hatta olanlarda da, kristalin içindeki atomların ısıl titreşimlerinden gelebilecek en ufak bir rahatsızlık elektron çiftini bozar, işte bu yüzden bu fenomen sadece çok düşük sıcaklıklarda, 1 ila 10 K'de meydana gelmektedir. Maddeden maddeye değişen şekilde belli bir kritik sıcaklıktan aşağıda oluşur, fakat aynı madde için daima aynıdır, bazı maddeler süperiletken olur; o sıcaklığın üzerinde elektron çiftleri bozulur ve normal elektrik özelliklerine sahip olurlar.

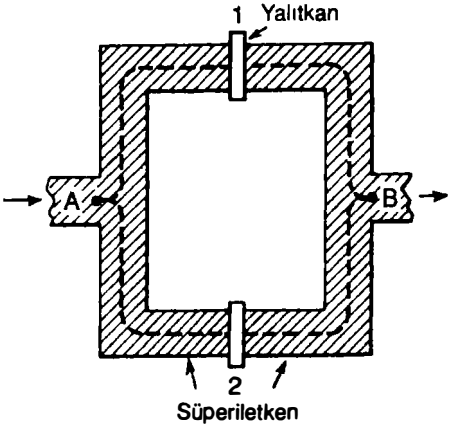
Bu kuram oda sıcaklığında iyi iletken olan maddelerin en iyi süperiletken olmamalarından doğmuştur. İyi bir "normal" iletken, elektronların, tam da kristal örgüdeki atomlarla pek etkileşmedikleri için serbestçe hareket etmesine izin verir – fakat elektronlarla atomlar arasında bir etkileşim olmazsa düşük sıcaklıklarda süperiletkenliği etkili kılan elektron çiftleşmesi mümkün değildir.

Süperiletkenlerin çalışabilmeleri için bu kadar çok soğutulmalarının gerekmesi talihsizlik, zira daha elverişli bir süperiletkenin potansiyel kullanım alanlarını tahmin etmek kolay – kablolar boyunca enerji kaybı olmadan güç iletimi yapmak ilk akla gelen örnek. Süperiletkenlerin başka numaraları da vardır. Normal iletken olan bir metal manyetik alan tarafından delinebilir, fakat bir süperiletken yüzeyine manyetik alanı iten ve dışlayan elektrik akımları kurar – manyetik alanların oluşturduğu istenilmeyen parazitlere karşı mükemmel bir perdelemedir bu, fakat bu perdenin birkaç Kelvin'e ka-

43. Bardeen, 1948'de William Shockley ve Walter Brattain'le birlikte (üçüne 1956'da Nobel Ödülü kazandıran) bir icat üzerine yaptığı çalışmadan dolayı zaten isim yapmıştı. Bu küçük icat transistördü. Bardeen iki kere Nobel Fizik Ödülü almış ilk kişidir.



Şekil 7.2 İki süperiletken parça yalıtkan bir maddeyle birbirinden ayrıldığında Josephson ekleminde tuhaf şeyler olur. Uygun şartlar altında elektronlar bariyerden tünel kazma yoluyla geçerler.



Şekil 7.3 İki Josephson eklemi, iki-yarık ışık deneyine benzer bir sistem oluşturacak biçimde ayarlanabilir.

dar soğutulması gerektiği için pratik değildir. İki süperiletken bir yalıtkanla ayrılırsa hiçbir akımın geçmeyeceğini sanabilirsiniz; fakat parçacıkların çekirdekten tünel açarak çıkmasına izin veren kuantum kurallarına elektronların da uyduğunu hatırlayın. Eğer bariyer yeterince inceyse, elektron çiftinin aralığı geçebilme olasılığı yüksektir, fakat buradan sağduyuya uygun sonuçlar çıkmaz. Böyle bağlantılar (Josephson eklemi deniyor) bariyerin öte tarafında potansiyel fark varsa *hiçbir* akım üretmez, fakat iki taraf arasındaki voltaj sıfırsa o zaman bir akım *olur*. Diyapazon biçimindeki iki süperiletkeni alıp çatal uçlarını aralarına yalıtkan bir tabaka koyup birbirine bastırarak elde edilen çift Josephson eklemi, elektronun "çift yarık" deneyindeki kuantum mekaniksel davranışını taklit etmede kullanılabilir. Bu deneyi bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alacağız. Bu deney kuantum dünyasının en garip özelliklerinden birini gözler önüne serer.

Düşük sıcaklıklarda gündelik fizik yasalarına karşı çıkan sahte bozon yapmak için sadece elektronlar birleşmez. Helyum atomları da çok benzer bir hile yapabilir ve bu da sıvı helyumun süperakışkan adı verilen bir özelliğinin temelini oluşturur. Bir fincan kahveyi karıştırıp bırakırsanız sıvının dönüşü yavaşlar ve sonra sürtünmenin sıvı dengi olan yapışkan kuvvetler yüzünden durur. Aynı şeyi 2.17 K altında soğutulmuş helyumla denerseniz dönüş asla durmayacaktır; hatta tamamen kendi başına bırakıldığında bir tasın kenarına tırmanıp üzerinden aşabilir ve dar bir tüpün içinden geçmek onun için zor değildir, süperakışkan helyum, içinde bulunduğu tüp ne kadar darsa o kadar kolay akar. Bütün bu tuhaf davranışlar Bose-Einstein istatistikleriyle açıklanabilir ve bir kere daha düşük sıcaklıklar bu fenomenin pratikte kullanımını zorlaştırsa da, böyle düşük sıcaklıklardaki atomların davranışı, süperiletkenlikteki elektronların davranışı gibi, kuantum sürecini işbaşındayken görme fırsatını sağlar. Çapı 2 mm kadar olan minik bir kovaya biraz süperakışkan helyum koyup kovayı döndürürseniz helyum önce olduğu gibi durur. Döndürme hızı arttıkça açısal momentum kritik bir değere ulaştığında bütün helyum açısal bir akış geliştirir, bir kuantum durumundan ötekine değişir. Kuantum kuralları –ara-açısal mo-

mentuma karşılık gelen– hiçbir ara-duruma izin vermez. Tek bir atomdan ya da kuantum dünyasının parçacıklarından çok daha büyük, görünebilir bir kütle olan helyum atom öbeğinin kuantum kurallarına uygun hareket ettiği görülebilir. Daha sonra göreceğimiz gibi süperiletkenlik sadece atom ölçeğinde değil, insan ölçeğindeki nesnelere de uygulanabilir. Fakat kuantum kuramı sadece fizik dünyasıyla hatta fizik bilimleriyle sınırlı değildir. Hatırlarsanız bütün bir kimya kuantum temel kurallarıyla anlaşılmaktadır artık. Kimya tek tek atomlardan ve atomların alt birimlerinden ziyade moleküllerin bilimidir ve buna hepimiz için en önemli olan moleküller de dahildir – canlı molekülleri, yani hayat molekülü DNA da dahil. Hayatı bugünkü kavrayışımız sıkı sıkıya kuantum kuramına bağlıdır.

HAYAT DENİLEN ŞEY

Kuantum kuramının hayatın kimyasını anlamamızda taşıdığı bilimsel önemi tamamen bir kenara bırakırsak kuantum hikâyesindeki önde gelen karakterlerden bazılarıyla hayat molekülü DNA'nın ikili sarmal yapısının keşfi arasında doğrudan kişisel bağlantılar var. Kristallerden geçen X ışınlarının kırınımını tarif eden yasaları Birinci Dünya Savaşı öncesi yıllarda Cavendish'de çalışan Lawrence Bragg ve babası William Bragg keşfetmiştir; bu çalışmadan dolayı birlikte Nobel Ödülü aldılar, Lawrence o kadar erken yaştaydı ki (1915'te Fransa'da subaylık yaparken) elli yıl sonra bunun altın jübilesini yapmaya yetişti (hem de Birinci Dünya Savaşı'nda Fransa'da hizmet vermesine rağmen). Baba Bragg adını fizikte ilk defa alfa, beta ve gama ışıması üzerine yaptığı çalışmalarla duyurmuştu ve yirminci yüzyılın ilk beş-on yılı içinde hem gama hem de X ışınlarının bazı açılardan parçacık gibi davrandığını göstermişti. Ne var ki, Bragg'in kristallerin yapısındaki esrarı çözmede kilit önemi olan X ışını kırınım yasası, bir kristaldeki atomlardan sekmiş X ışınlarının dalga özelliklerine bağlıdır. Bunun sonucunda ortaya çıkmış girişim örüntüsü kristaldeki atomların yerleşimine ve X ışınlarının dalga boyuna bağlıdır ve usta ellerde bu alet çok karmaşık kristal

yapılarında bile tek tek atomların konumlarını tespit etmek için geliştirilmiştir.

Bragg Yasası'nı çıkaran içgörüyü 1912'de asıl olarak Lawrence Bragg geliştirmiştir; 1930'ların sonlarında Cambridge'de Cavendish Fizik Profesörüydü (1937'de Rutherford'un yerine geçmiştir) ve başka pek çok şeyin yanı sıra hâlâ X ışını çalışmasıyla aktif olarak ilgilenmekteydi. İşte biyofiziğin gelişme kaydetmesi bu on yıl içerisinde olmuştur. Biyolojik moleküllerin yapısının ve terkibinin X ışınlarının kırınımıyla tespit edilmesi konusunda J. D. Bernal'ın yaptığı öncü çalışma pek çok yaşam işlevini yerine getiren karmaşık protein molekülleriyle ilgili ayrıntılı araştırmalara yol açmıştır. Araştırmacı Max Perutz ve John Kendrew İkinci Dünya Savaşı öncesinde Cambridge'de başlatılmış olan bir araştırmanın sonucu olarak 1962'de hemoglobin (kanınızda oksijen taşıyan molekül) ve miyoglobinin (bir kas molekülü) yapılarını tespit etmelerinden dolayı Nobel Kimya Ödülü'nü paylaşmışlardır.

Ne var ki, popüler mitolojide moleküler biyolojinin doğuşuyla ebediyen ilişkilendirilmiş isimler "jön Türkler" Francis Crick ve James Watson'dır. Bu isimler 1950'lerin başlarında ikili sarmal DNA modelini geliştirmiş ve 1962'de de (Maurice Wilkins'le beraber) "Fizyoloji ya da Tıp" Nobel Ödülü almışlardır. Nobel Heyeti'nin aynı yıl içinde "kimya" ve "fizyoloji" başlıkları altında biyofizik alanındaki farklı öncüleri ödüllerle onurlandırma esnekliği hayranlık verici bir şey, fakat ölmüş kişilere ödül vermeme konusundaki katı kuralları, Crick-Watson-Wilkins'in ödülünden Wilkins'in mesai arkadaşı Rosalind Franklin'e de bir pay vermelerini önlemiştir. Oysa DNA yapısını ortaya koyan kilit kristalografik çalışmanın çoğunu o gerçekleştirmiş, fakat 1958'de otuz yedi yaşında ölmüştü. Franklin popüler mitolojide, Watson'ın kitabı *İkili Sarmal* yüzünden (Watson'ın Cambridge'deki hayatının renkli, oldukça eğlenceli bir anlatımını sunan bu kitap iş arkadaşlarının, hatta kendisinin bile adil ve doğru bir portresini vermekten çok uzaktır) ateş püsküren bir feminist olarak yer edinmiştir.

Watson ve Crick'i DNA'nın yapısına götüren çalışma Bragg'in hâlâ hüküm sürdüğü Cavendish'de gerçekleşmiştir. Avrupa'da post

doktora araştırması yapmaya gelmiş genç bir Amerikalı olan Watson Cavendish'de çalışma izni almaya çalışırken Bragg'le ilk nasıl karşılaştığını kitabında anlatır. O sıralarda altmışlı yaşların başlarında olan ak bıyıklı zat, genç Watson'a geçmişte çok önemli bilimsel çalışmalar yapmakla birlikte artık besbelli günün büyük kısmını Londra kulüplerinde geçiren biriymiş gibi gelmiş. Fakat Watson sonunda çalışma iznini almış ve Bragg'in araştırmaya ciddi olarak eğilip DNA problemlerinin çözümüne her zaman istekli olmasa da paha biçilmez katkılarda bulunmasına şaşırmış. Francis Crick ise, Watson'dan büyük olmasına rağmen teknik olarak hâlâ doktorası için çalışan bir öğrenciydi. Bilimsel kariyeri kendi kuşağındaki pek çok kişininki gibi İkinci Dünya Savaşı'yla kesintiye uğramıştı, gerçi belki de bu onun için kötü bir şey sayılmazdı. Asıl olarak fizik eğitimi almış ve ancak 1940'ların sonlarında biyoloji bilimlerine geçmişti. Bu kararın alınmasında Schrödinger'in yazdığı ve 1944'te yayımladığı küçük bir kitabın etkisi hiç de küçük değildi. *What is Life* adlı kitap –baskısı hâlâ mevcut, aramaya değer– hayatın temel moleküllerinin fizik yasalarıyla anlaşılabileceği fikrini etraflıca ele alan bir klasiktir. Bu açıdan açıklanması gereken en önemli moleküller canlı bir bedenin nasıl meydana getirileceğinin ve onun nasıl işleyeceğinin bilgisini taşıyan genlerdir. Schrödinger *What is Life*'ı yazdığında genlerin, pek çok başka canlı molekülleri gibi, proteinden yapıldığı sanılıyordu; fakat hemen hemen o sıralarda kalıtsal özelliklerin canlı hücrelerinin merkezi çekirdeklerinde bulunan Deoksiribonükleik adı verilen bir asidin molekülleri tarafından taşındığı keşfedildi.[44] Bu DNA'dır ve Crick ve Watson da Wilkins ve Franklin'den elde ettikleri X ışını verileriyle DNA'nın yapısını belirlemişlerdir.

DNA'nın ayrıntılı yapısını ve yaşam sürecindeki rolünü başka bir kitapta anlattım.[45] Kilit özellik DNA'nın birbiri etrafına sarılmış iki liften oluşan ikili bir molekül olmasıdır. Baz denilen farklı kimya-

44. Aynı "çekirdek" [nucleus] teriminin atomun merkezî kısmı için kullanılması, biyoloji terminolojisinde zaten var olan kelimenin bilerek taklit edilmesinin ürünüydü.

45. Bkz. Jeremy Cherfas'la birlikte yazdığım *The Monkey Puzzle*.

sal bileşenlerin DNA omurları boyunca diziliş sırası, canlı hücrenin kanla etrafa oksijen taşımak ya da kasların işlemesini sağlamak gibi bütün işleri yapan protein moleküllerini imal etmek için kullandığı bilgiyi taşır. Bir DNA zinciri kısmen çözülüp başka moleküllerin yapımında kopyalama kalıbı görevi görecek bir dizi bazı ortaya çıkarabilir ya da tamamen çözülüp zincirin bütün omurları boyunca her bir bazı muadiliyle eşleştirerek zincirin aynısını meydana getirip kendini kopyalamış olur. Her iki işlem de hammadde olarak canlı hücredeki kimyasal çorbayı kullanır; her ikisi de yaşam için esastır. Artık insanoğlu DNA boyunca kodlanmış mesajla oynayıp hayatın kalıbı üzerine kodlanmış talimatı değiştirebiliyor – en azından görece basit canlı organizmalarda.

Genetik mühendisliğinin temeli budur. Genetik malzeme –DNA– kimyasal ve biyolojik tekniklerin bir arada kullanımıyla yaratılabiliyor ve bakteri gibi mikroorganizmalar çevrelerindeki kimyasal çorbadan bu DNA'yı alıp kendi genetik kodlarıyla birleştirmeye teşvik edilebiliyorlar. Eğer bir bakteri soyuna insandaki insülinin nasıl yapılacağı bilgi kodu verilirse, kendi biyolojik fabrikaları bunu gayet güzel yapar ve diyabetlilerin normal hayat sürmeleri için gereken maddeyi tam olarak üretir. Şeker hastalığı gibi sorunlara yol açan kusurları ortadan kaldırmak için insanın genetik yapısını değiştirme hayalinin gerçekleşme ihtimali şu an çok uzak, ama başarılmaması için de hiçbir kuramsal neden yok. Fakat daha yakın bir aşama genetik mühendislik tekniklerini başka hayvan ve bitkiler üzerinde kullanmak olacaktır, böylece yiyecek ve diğer insan ihtiyaçları için daha üstün türler üretilebilir.

Bunun ayrıntıları da başka bir yerlerde bulunabilir.[46] İşin önemli kısmı şu ki, hepimiz genetik mühendisliğini duymuş ve mucizevi vaatlerini –ve tehlikelerini– okumuşuzdur. Ne var ki, genetik mühendisliğini mümkün kılan canlı moleküllerinin kavranışının bizim şu anki kuantum mekaniği kavrayışımıza bağlı olduğunun çok az insan farkındadır. Hepsini bir kenara koyun, o olmasaydı X ışını kırınım verilerini yorumlamamız mümkün olmazdı. Genlerin nasıl in-

46. Örneğin, Jeremy Cherfas'ın kitabı *Man Made Life*.

şa edileceğini ya da yeniden inşa edileceğini anlamak için atomların neden ve nasıl sadece belli durumlarda, belli mesafelerde ve belli kuvvetteki kimyasal bağlarla birleştiğini anlamak zorundayız. Bu anlayış da kuantum fiziğinin kimya ve moleküler biyolojiye bir armağanıdır.

Bu noktayı normalde yapmayacağım kadar tekrarlamamın sebebi University College of Wales'deki bir öğretim üyesidir. Mart 1983'te *New Scientist*'deki bir yazıda arada "kuantum kuramı olmasaydı genetik mühendisliği, katı hal bilgisayarları, nükleer enerji santralleri (ya da bombaları) mümkün olmazdı" demiştim. Bu söz o saygın akademik kurumda çalışan bir muhabirin şikâyetçi olmasına yol açtı: Genetik mühendisliğinin yeni bilimsel moda kelime olarak her yerde karşısına çıkmasından bıkmış ve John Gribbin'in de böyle çirkin sözler etmesi yanına kâr kalmamalıymış. Çok zayıf bile olsa kuantum kuramıyla genetik arasında nasıl bir bağ olabilirmiş? Umarım aradaki bağ bu sefer açıkça görülebilmiştir. Yüzeyden bakınca bile Crick'in biyofiziğe doğrudan Schrödinger'den esinlenerek geçmiş olduğunu ve DNA ikili sarmalının keşfine giden çalışmanın formel olarak, zaman zaman memnuniyetsizlik yaratmışsa da, Lawrence Bragg'in yönetiminde gerçekleştiğini söyleyebiliyoruz; daha derine inince elbette Bragg ve Schrödinger gibi öncülerin ve Kendrew, Perutz, Wilkins ve Franklin gibi sonraki kuşak fizikçilerin biyoloji sorunlarıyla ilgilenmelerinin sebebi Schrödinger'in de belirttiği gibi bu sorunların başka bir tür fiziğin, karmaşık moleküllerdeki büyük sayıdaki atomları ele alan bir fiziğin sorunları olmasıdır.

New Scientist'de öylesine yaptığım yorumdan geri adım atmak şöyle dursun, aksine bu yorumu daha da güçlü biçimde savunuyorum. Zeki, çok okuyan, ama bilim dünyasının dışındaki birine şu günümüze kadar hayatımıza giren en önemli bilimsel katkıların özetini sorsanız ve yakın gelecekteki yararlarını ya da zararlarını söylemesini isteseniz, önünüze mutlaka uzun bir liste koyarak şunları sıralar: Bilgisayar teknolojisi (otomasyon, işsizlik, eğlence, robotlar), nükleer enerji, (bomba, güdümlü nükleer füzeler, enerji santralleri, Three Mile Adası), genetik mühendisliği (yeni ilaçlar, insan yapımı hastalıklar, tarım mahsullerinin geliştirilmesi), lazer-

ler (holografi, ölüm ışınları, mikrocerrahi, haberleşme). Bu sorunun yöneltildiği insanların büyük bir çoğunluğu muhtemelen gündelik hayatlarında hiçbir rolü olmayan görelilik kuramını duymuşlardır; içlerinden ancak üç beş tanesi listedeki her kalemin kuantum mekaniğine dayandığını fark edecektir; geri kalanlarsa bu bilim dalını ya hiç duymamıştır ya da kesinlikle anlamayacaktır.

Yalnız değiller. Bütün bu ilerlemeler kuantum aşçılığı sayesinde, neden olduğunu gerçekten kimsenin anlamadığı ama işe yaradığı görülen kurallar kullanılarak gerçekleşmiştir. Son altmış yıldaki başarılara rağmen kuantum tariflerinin *neden* işe yaradığını anlayan *biri* var mıdır yok mudur şüpheli. Kitabın geri kalan kısmı genellikle hasır altı edilen daha derindeki gizemlere ve bazı ihtimallere ve paradokslara ayrılacak.

ÜÇÜNCÜ KISIM

...ve Ötesi

**"Bir sorunu çözmeden tartışmak
o sorunu tartışmadan çözmekten
daha iyidir."**

**JOSEPH JOUBERT
1754-1824**

Sekizinci Bölüm

Tesadüf ve Belirsizlik

Heisenberg'in belirsizlik ilkesi bugün kuantum kuramının temel taşlarından biri –belki de *tek* temel taşı– olarak görülüyor. Meslektaşları tarafından hemen kabul edilmediği için bu yüceltilmiş konumuna gelmesi neredeyse on yıl sürdü. Ne var ki, 1930'lardan beri konumu biraz fazla yüceltilmiş olabilir.

Bu kavram Schrödinger'in 1926 Eylül'ünde Kopenhag'a gitmesiyle çıktı ortaya. Bohr'a o ünlü "lanet kuantum sıçraması" sözünü o zaman söylemişti. Heisenberg Bohr'la Schrödinger'in bazen didişip duruyor gibi görünmelerinin ana sebeplerinden birinin kavram karmaşasından kaynaklandığını fark etmişti. "Konum" ve "hız" gibi şeyler (ya da daha sonra gelen "spin") mikrofizik dünyasında gündelik hayattakiyle aynı anlama gelmez. O halde hangi anlama gelir ve bu iki dünya birbiriyle nasıl ilişkilendirilebilir? Heisenberg kuantum mekaniğinin temel denklemine geri döndü,

$$\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = \hbar/i$$

ve buradan (Δq) konumuyla (Δp) momentumunun belirsizliklerinin çarpımının daima $\hbar$'den büyük olması gerektiğini gösterdi. Aynı belirsizlik kuralı "eşlenik değişkenler" denilen çiftler için de geçerlidir. Bu değişkenler birbirleriyle çarpılarak $\hbar$ gibi hareket birimlerini ortaya çıkarırlar; hareket birimleri enerji x zaman'dır ve böyle değişkenlerin öteki en önemli çifti aslında enerjiyle (E) zamandır (t). Gündelik hayattaki klasik kavramların mikro dünyada hâlâ mevcut olduğunu, fakat bunların ancak belirsizlik ilişkilerinin ortaya çıkardığı sınırlı haliyle uygulanabileceğini söylüyordu Heisenberg. Bir

parçacığın konumunu ne kadar doğru bilirsek, momentumunu o derece az doğru biliriz ya da tam tersi.

BELİRSİZLİĞİN ANLAMI

Bu ürkütücü sonuçlar *Zeitschrift für Physik*'de 1927'de yayımlandı, fakat Dirac ve Bohr gibi kuantum mekaniği denklemlerine aşina olan kuramcılar bu sonuçların anlamını hemen kavrarken, pek çok deneyci Heisenberg'in iddiasını kendi becerilerine bir meydan okuma gibi gördü. Deneylerinin hem konumu hem de momentumu aynı zamanda ölçecek kadar iyi olmadığını söylediğini sandılar ve onu yanlış çıkaracak deneyler tasarlamaya çalıştılar. Fakat boşuna bir çabaydı bu, çünkü Heisenberg'in söylediği şey kesinlikle o değildi.

Bu yanlış anlama bugün de kendini gösteriyor, bunun sebebi kısmen belirsizlik fikrinin genelde öğretiliş biçiminden kaynaklanıyor. Heisenberg'in kendisi bir elektronun gözlemlenmesi fikrini, meramını ifade edebilmek için kullanmıştı. Biz şeyleri sadece onlara bakarak görebiliriz, bu da onlardan sıçrayan ışık fotonlarının gözümüze gelmesiyle olur. Bir foton ev gibi bir nesneyi pek fazla etkilemez, o yüzden ona bakınca evin etkilenmesini beklemeyiz. Oysa bir elektron için durum epey farklıdır. Bir kere, elektron çok küçük olduğundan onu görebilmek için kısa dalgalı elektromanyetik enerji kullanmak zorundayız (deney düzeneği yardımıyla). Böylesi gama ışıması yüksek enerji içerir ve gama ışımasının elektrona çarpıp seken ve deney düzeneğimizle tespit edilebilen bir fotonu elektronun konumunu ve momentumunu ciddi ölçüde değiştirecektir – eğer elektron bir atomdaysa onu gama ışınlı bir mikroskopla gözlemlemek atomdan kopmasına sebep olabilir.

Bütün bunlar doğru olmasına doğru ve bu da bir elektronun hem konumunu hem de momentumunu kesin olarak ölçmenin imkânsızlığı hakkında bir fikir veriyor. Fakat belirsizlik ilkesi bize asıl şunu söylüyor: Temel kuantum mekaniği denklemine göre hem kesin bir momentumu hem de kesin konumu olan elektron diye bir şey yoktur.

Bunun çok geniş kapsamlı anlamları var. Heisenberg'in *Zeitsch-*

rift'deki yazısının sonunda söylediği gibi "İlke olarak şu ânı bütün ayrıntılarıyla *bilemeyiz*." İşte kuantum kuramının klasik fikirlerin belirlenimciliğinden kurtulduğu nokta burasıdır. Newton'a göre eğer evrendeki her parçacığın konumunu ve momentumunu bilseydik bütün geleceğin akışını tahmin etmek mümkün olurdu; modern fizikçiye göre böyle kusursuz bir tahmin fikri anlamsızdır çünkü *tek* bir parçacığın bile konumuyla momentumunu bilemiyoruz. Aynı sonuç denklemlerin bütün farklı versiyonlarından da çıkmaktadır, dalga mekaniği, Heisenberg-Born-Jordan matrisleri ve Dirac'ın q sayıları (üstelik gündelik hayatla her tür fiziksel karşılaştırmadan özenle kaçınan Dirac'ın yaklaşımı içlerinden en uygunu gibidir). Aslında Dirac belirsizlik ilişkisine Heisenberg'den önce epey yaklaşmıştı. *Proceedings of the Royal Society*'de Aralık 1926'da çıkan bir yazısında, kuantum kuramında aynı anda hem **q** hem **p** sayısal değerlerine ilişkin hiçbir sorunun cevaplanmasının mümkün olmadığını belirtmişti, fakat "içerisinde sadece **q** ya da sadece **p**'nin sayısal değer olarak verildiği soruların cevaplanabilmesi beklenirdi."

Filozoflar bu fikirlerin nedensellik kavramı –her olaya başka belirli bir olayın neden olduğu fikri– açısından neler ima ettiğini ancak 1930'larda değerlendirmeye başladılar. Bu arada belirsizlik ilişkileri temel kuantum mekaniği denklemlerinden türetilmiş olsa da bazı sözü geçen uzmanlar kuantum kuramını belirsizlik ilişkilerinden yola çıkarak öğretmeye başladılar. Wolfgang Pauli muhtemelen bu eğilimin başını çeken kişiydi. Kuantum kuramı hakkında belirsizlik ilişkileriyle başlayan önemli bir ansiklopedi makalesi yazdı ve meslektaşı Herman Weyl'i ders kitabı *Theory of Groups and Quantum Mechanics*'e aynı şekilde başlamaya teşvik etti. Bu kitap ilk kez 1928'de Almanca, 1931'de de İngilizce yayımlanmıştır. Bu kitap ve Pauli'nin makalesi, bir arada, belli bir kuşağın yazdığı standart metinlerin rotasını çizmiştir. Bu metinlerle yetişen öğrencilerin bir kısmı profesör oldular ve aynı öğretim tarzını sonraki kuşaklara aktardılar. Sonuç olarak kuantum kuramı bugünkü üniversite öğrencilerine çoğu zaman hâlâ belirsizlik ilişkileri aracılığıyla anlatılır.[47]

47. Gerçi bu çok hoş bir rastlantıya sebep oluyor. Kuantum kuramına bu şe-

Bu, tarihteki tuhaf bir kazadır. Ne de olsa temel kuantum kuramı denklemleri belirsizlik ilkelerine çıkıyor, fakat işe belirsizlikle başlarsanız temel kuantum denklemlerini bulma yolu yoktur. Daha da kötüsü, denklemler olmadan belirsizliği anlatmanın tek yolu elektronların gözlemlenmesi için gama ışınlı mikroskop gibi örnekler vermektir, bu da insanları hemen belirsizliğin evrenin doğasına dair temel bir hakikat değil, deneylerin sınırlarıyla ilgili bir şey olduğunu düşünmeye sevk eder. Bir şey öğrenirsiniz, sonra geri dönüp başka bir şey öğrenirsiniz, sonra en başta ne öğrenmiş olduğunuzu keşfetmek için ileri hareket edersiniz. Bilim her zaman mantıklı değildir, bilim hocaları da. Bunun sonucu belirsizlik ilkesi hakkında kafası karışan öğrenci kuşakları ve bu ilkeyle ilgili yanlış yorumlamalar olmuştur – bu yanlış yorumlamalar sizde yok çünkü siz her şeyi sırasıyla keşfettiniz. Fakat, bilimsel karışıklıkları pek dert etmezsek ve kuantum dünyasının garipliğine kendimizi verirsek, o dünyanın araştırılmasına onun kendine özgü garip doğasından çarpıcı bir örnekle başlamak yerinde olur. Kitabın geri kalan kısmında belirsizlik ilkesi karşılaşacağınız *en az* garip şey olacaktır.

KOPENHAG YORUMU

Belirsizlik ilkesinin hak ettiği dikkati her zaman çekmeyen önemli bir yanı, onun zamanın içinde ileri geri giderken aynı anlamda *işlemeyişidir*. Fizikteki çok az şey zamanın ne tarafa aktığını "dert eder" ve içinde yaşadığımız evrenin temel muammalarından biri belli bir "zaman oku"nun, yani geçmişle gelecek arasında bir farkın olması-

kilde yaklaşınca belirsizlik ilişkisindeki en önemli şeyler p'ler ve q'lar oluyor. Herkes İngilizcedeki şu eski deyişi biliyordur: "p'lerine ve q'larına dikkat et," yani "aman dikkatli ol" gibi bir şey. Bu deyiş muhtemelen alfabeyi öğrenen çocukların ya da kurşun harflerle uğraşan mürettip çıraklarının dikkatini bu p ve q harflerinin narin kuyruklarına çekmek için kullanılmış ilkin (*Brewer's Dictionary of Phrase and Fable*, Cassell, Londra, 1981), fakat şimdi kuantum kuramının düsturu olarak alınabilir. Bildiğim kadarıyla bu harflerin kuantum denklemleri için seçilmesi sadece tesadüften ibaret.

dır. Belirsizlik ilişkileri bize konumu ve momentumu aynı zamanda bilemeyeceğimizi, dolayısıyla geleceği önceden bilemeyeceğimizi söyler – gelecek doğası gereği tahmin edilemezdir ve belirsizdir. Fakat tamamen kuantum mekaniği kuralları çerçevesinde geriye dönük hesap yapıp bir elektronun *geçmişte* belli bir noktada konumunun ve momentumunun tam olarak ne olduğunu çözmenin mümkün olduğu bir deney hazırlanabilir. Gelecek doğası gereği belirsizdir –nereye gittiğimizi tam olarak bilmeyiz, ama geçmiş açık seçik olarak tanımlanır– nereden geldiğimizi tam olarak biliriz. Heisenberg'in sözünü farklı şekilde ifade edersek, "ilke olarak geçmişi bütün ayrıntılarıyla *bilebiliriz*." Bu, gündelik hayat tecrübelerimizdeki zamanın doğasıyla tam örtüşür, bilinen bir geçmişten bilinmeyen bir geleceğe gidiş. İşte bu, kuantum dünyasının en temel özelliğidir. Bunu genel olarak evrende algıladığımız zaman okuyla ilişkilendirebiliriz; bunun daha tuhaf olası imaları daha sonra ele alınacak.

Filozoflar belirsizlik ilişkilerinin böyle çok merak uyandırıcı sonuçlarıyla boğuşmaya yavaş yavaş başlarken, Bohr içinse belirsizlik bir süredir el yordamıyla aradığı kavramların üzerine bir ışık demeti gibi düşmüştü. Tamamlayıcılık fikri, yani kuantum dünyasını anlamak için *hem* dalga *hem* parçacık imgelerinin gerekli olduğu fikri (oysa mesela bir elektron *ne* dalgadır *ne de* parçacık), konum ve momentumun ikisinin birden kesin olarak bilinemeyeceğini söyleyen belirsizlik ilişkisinde bir matematik formülü bulmuş, gerçekliğin tamamlayıcı ve bir anlamda birbirlerini karşılıklı olarak dışlayan yanlarını oluşturmuştur. Temmuz 1925'ten Eylül 1927'ye kadar Bohr kuantum kuramı üzerine pek bir çalışma yayımlamamış, sonra İtalya'nın Como kentinde bir konferans vererek geniş bir dinleyici kitlesine tamamlayıcılık fikrini ve "Kopenhag yorumu" diye bilinen şeyi ilk kez anlatmıştır. Klasik fizikte, ister gözlem yapılsın ister yapılmasın, saat gibi birbiriyle etkileşim halinde işleyen bir parçacıklar sistemini düşünebileceğimizi, halbuki kuantum fiziğinde gözlemcinin sistemle, o sistemin artık bağımsız olarak var olduğunun düşünülemez hale geleceği ölçüde etkileşime girdiğini işaret etmiştir. Konumu kesin olarak ölçmeyi seçerek bir parçacığı mo-

mentumunu belirsizleştirmeye zorlarız ya da tam tersi; dalga özelliklerini ölçecek bir deneyi seçerek parçacık özelliklerini saf dışı ederiz ve hiçbir deney aynı zamanda hem parçacık hem dalga özelliklerini ortaya koymaz vs. Klasik fizikte parçacıkların konumunu uzay-zamanda tam olarak tespit edebilir, aynı kesinlikte davranışlarını tahmin edebiliriz; kuantum fiziğinde bunu yapamayız ve bu anlamda görelilik bile bir "klasik" kuramdır.

Bu fikirlerin geliştirilmesi ve öneminin kavranması uzun zaman aldı. Bugün Kopenhag yorumunun belkemiğini oluşturan özellikler, bir bilim adamının deneysel bir gözlem yaptığında olup biten şeyler açısından daha kolay açıklanabilir ve anlaşılabilir. İlk olarak bir şeyi gözlemlemenin o şeyi etkilediğini kabul etmemiz gerekiyor, ayrıca gözlemciler de gerçek anlamda deneyin bir parçasıdırlar – biz baksak da bakmasak da tik tak çalışan bir saat yok. İkinci olarak tek bildiğimiz şey deneylerin sonuçlarıdır. Bir atoma bakıp bir elektronun A enerji durumunda olduğunu görürüz, sonra tekrar bakıp elektronu B enerji durumunda görürüz. Elektronun A'dan B'ye sıçradığını tahmin ederiz, belki de ona baktığımız için. Aslında bunun aynı elektron olduğunu bile kesin olarak söyleyemeyiz, ayrıca ona bakmadığımız sırada ne yapıyor olduğu hakkında da hiçbir şey söyleyemeyiz. Deneylerden ya da kuantum kuramı denklemlerinden öğrenebileceğimiz şey, bir sisteme bir kere bakıp da A cevabını aldığımızda bir dahaki sefer baktığımızda B cevabını alma olasılığımızdır. Bakmadığımız sırada ne olup bittiğine ya da sistemin A'dan B'ye nasıl geçtiğine (tabii geçiyorsa) dair hiçbir şey söyleyemeyiz. Schrödinger'in canını çok sıkmış olan "lanet kuantum sıçraması" aynı deneyden neden iki farklı cevap aldığımıza ilişkin tamamen bizim kendi yorumumuzdur ve de yanlış bir yorumdur. Bazen şeyler A durumunda bulunur, bazen B durumunda ve ikisinin arasında ne yattığı sorusu ya da bir durumdan ötekine nasıl geçtikleri sorusu tamamen anlamsızdır.

Bu gerçekten kuantum dünyasının temel özelliğidir. Biz *bakarken* bir elektronun ne yaptığına dair bilgimizin sınırlı olması ilginç, fakat bakmadığımızda ne yaptığı hakkında hiçbir fikrimizin olmadığını keşfetmek akıllara durgunluk veren bir şey.

1930'larda Eddington bunun ne anlama geldiğiyle ilgili hâlâ en iyi sayılabilecek fiziksel örneklerden birkaçını *The Philosophy of Physical Science* kitabında vermiştir. Bizim deneylerden algıladıklarımızın, "öğrendiklerimizin" beklentilerimizden bir hayli etkilendiğini vurgulayıp o algıların ayağını kaydırmak için, insanı basitliğiyle rahatsız eden bir örnek veriyor Eddington. Varsayalım, diyor, bir heykeltıraş size bir mermer bloğunda bir insan kafası şeklinin "saklı" olduğunu söylesin. Saçma, diyorsunuz. Fakat sonra heykeltıraş elinde çekiçle keskiden daha incelikli bir alet olmaksızın başlıyor mermeri yontmaya ve saklı kafa şeklini ortaya çıkarıyor. Rutherford atom çekirdeğini bu şekilde mi "keşfetmişti"? "Bu keşif, çekirdek hakkındaki bilgimizi temsil eden dalgaların ötesine geçmez," diyor Eddington, zira atom çekirdeğini daha gören olmadı. Bütün gördüğümüz, deneylerin sonuçlarıdır, biz de bunları çekirdek olarak yorumluyoruz. Dirac var olabileceğini söylemeden önce kimse bir pozitron bulmamıştı; bugün fizikçiler periyodik cetveldeki birbirinden farklı elementlerin sayısından çok daha fazla temel parçacık bildiklerini iddia ediyorlar. 1930'larda fizikçiler bazı radyoaktif bozunmalardaki spin etkileşimlerinin inceliklerini açıklamak için gereken başka bir yeni parçacık olan nötrinoya merak sarmışlardı. "Nötrino kuramından pek etkilenmedim," diyordu Eddington, "nötrinoların var olduğuna inanmıyorum." Fakat "kimse kusura bakmasın, deneysel fizikçiler nötrinoları *yaratacak* mahareti gösteremeyecekler."

O zamandan beri aslında üç farklı türde (bir de üç farklı karşıtürde) nötrino keşfedildi ve başka türlerin de var olduğu ileri sürüldü. Eddington'ın kuşkuları gerçekten söylediği gibi değerlendirilebilir mi? Çekirdeğin, pozitronun ve nötrinonun deneyciler onlara şekil verecekleri doğru keskileri bulana kadar var *olmadıkları* düşünülebilir mi? Böyle spekülasyonlar bırakın gerçekliği kavrayışımıza akıl sağlığına bile zarardır. Fakat bunlar, kuantum dünyası söz konusuyken gayet aklı başında sorulardır. Eğer kuantum yemek kitabını doğru olarak takip edersek belli bir parçacığın varlığını gösteren bir işaret olarak yorumlayacağımız sonuçlar veren bir deney yapabiliriz. Aynı tarifi uyguladığımız hemen her zaman aynı sonuç-

ları alırız. Fakat parçacıklarla ilgili yorum hep zihinde olup biter, belki de tutarlı bir hayalden ibarettir. Denklemler biz parçacıklara bakmazken ne yaptıkları hakkında hiçbir şey söylemez, Rutherford'dan önce de hiç kimse atom çekirdeğine bakmamıştır, Dirac'dan önce hiç kimse pozitronun varlığını hayal bile etmemiştir. Eğer bir parçacığın biz ona bakmazken ne yaptığını söyleyemezsek, ona bakmazken var olup olmadığını da söyleyemeyiz ve çekirdeklerin de pozitronların da yirminci yüzyıldan önce var olmadıklarını iddia etmek mantıklıdır, çünkü 1900'den önce hiç kimse onları görmemiştir. Kuantum dünyasında ne görürseniz onu alırsınız, hiçbir şey de gerçek değildir; umabileceğiniz en iyi şey birbiriyle uyum içinde olan bir dizi hayaldir. Ne yazık ki bazı en basit deneyler bu umutları da boşa çıkarmıştır. Işığın dalga doğasını "kanıtlayan" çift yarık deneyini hatırlıyor musunuz? Bunlar fotonlarla nasıl açıklanabilirler?

İKİ DELİK DENEYİ

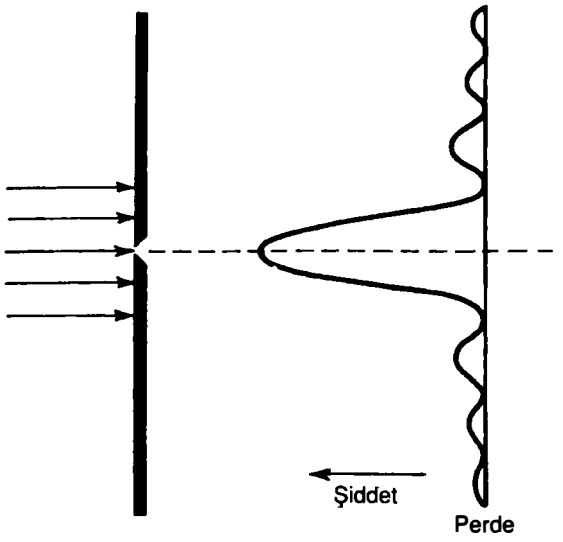
Son yirmi yılın en iyi ve en tanınmış kuantum mekaniği hocası California Institute of Technology'den Richard Feynman olmuştur. 1960'ların başında basılmış olan üç ciltlik kitabı *Feynman Lectures on Physics* öteki lisans ders kitaplarının karşılaştırılması gereken bir standart oluşturur, ayrıca konu hakkında popüler konferanslar işine de girişmiştir. 1965'te BBC'de yayınlanan ve daha sonra *Fizik Yasaları Üzerine* adıyla da basılan dizi bunlardan biridir. 1918'de doğan Feynman elektromanyetizmanın kuantum elektrodinamiği adı verilen kuantum versiyonunun denklemlerini kurmakla meşgul olduğu 1940'larda kuramsal fizikçi olarak mesleğinin zirvesindeydi; 1965'te bu çalışmasından dolayı Nobel Ödülü almıştır. Feynman'ın kuantum kuramı tarihindeki özel yeri kuantum mekaniğinin bütün temellerinin kurulmuş, bütün temel kurallarının belirlenmiş haliyle yetişen ilk fizikçi kuşağının bir temsilcisi olmasıdır. Heisenberg ve Dirac, yeni fikirlerin hep doğru sırada ortaya çıkmadığı, bir kavramın ötekiyle mantıksal ilişkisinin (spin örneğinde olduğu gi-

bi) ille de hemen görülmediği değişken bir ortamda çalışmak zorundayken, Feynman'ın kuşağı için ilk defa bulmacanın bütün parçaları mevcuttu ve sıralamadaki mantık görülebiliyordu, bir bakışta olmasa da biraz düşünüp zihinsel bir çaba sarf edince. O yüzden, Pauli ve takipçileri o zamanki heyecanla kuantum kuramını tartışmaya ve öğretmeye belirsizlik ilişkilerinden başlamayı uygun görürlerken, Feynman ve geçmiş kuşakların fikirlerini yeniden üretmek yerine işin mantığına kendileri bakan son yirmi-otuz yılın hocalarının farklı bir başlangıç noktasıyla çıkagelmeleri kayda değer bir şeydir. Feynman *Lectures* kitabının kuantum mekaniğine ayrılmış cildinin birinci sayfasında kuantum kuramının temel unsurunun çift yarık deneyi olduğunu söyler. Neden? Çünkü bu "herhangi bir klasik yolla açıklanması imkânsız bir fenomendir, *kesinlikle* imkânsızdır ve içinde kuantum mekaniğinin kalbini taşır. Gerçekte, bütün kuantum mekaniğinin temel tuhaflıklarını... o *tek* gizemi taşır."

Bu kitapta şu ana kadar kuantum fikirlerini bu yüzyılın ilk otuz-kırk yılındaki büyük fizikçiler gibi gündelik hayat diliyle açıklamaya çalıştım. Artık merkezdeki gizemle başlayarak mümkün olduğunca gündelik hayattaki at gözlüklerimizi çıkarıp gerçek dünyayı kuantum mekaniğiyle açıklamanın zamanı geldi. Kuantum dünyasına gündelik tecrübelerimizden taşıyabileceğimiz hiçbir analoji mevcut değildir ve kuantum dünyasının davranışı bildik hiçbir şeye benzemez. Hiç kimse kuantum dünyasının neden böyle davrandığını bilmiyor, tek bildiğimiz böyle davrandığı. Tutunacağınız iki şey var. İlki, hem "parçacıklar" (elektronlar), hem "dalgalar" (fotonlar) aynı şekilde davranırlar – oyunun kuralları tutarlı. İkincisi, Feynman'ın belirttiği gibi sadece tek bir gizem var. Eğer çift yarık deneyini içinize sindirebilirseniz o zaman savaşın yarıdan fazlası bitmiş demektir, çünkü "kuantum mekaniğindeki başka her durum, öyle görünüyor ki, 'İki delikle yapılan deneyi hatırlıyor musunuz? İşte aynı şey,' diyerek açıklanabilir."[48]

Deney şöyle işler. Üzerinde iki küçük delik açılmış bir tür perde –mesela bir duvar– düşünün. Bu delikler Young'ın ışıkla yaptığı

48. *The Character of Physical Law*, s. 130.

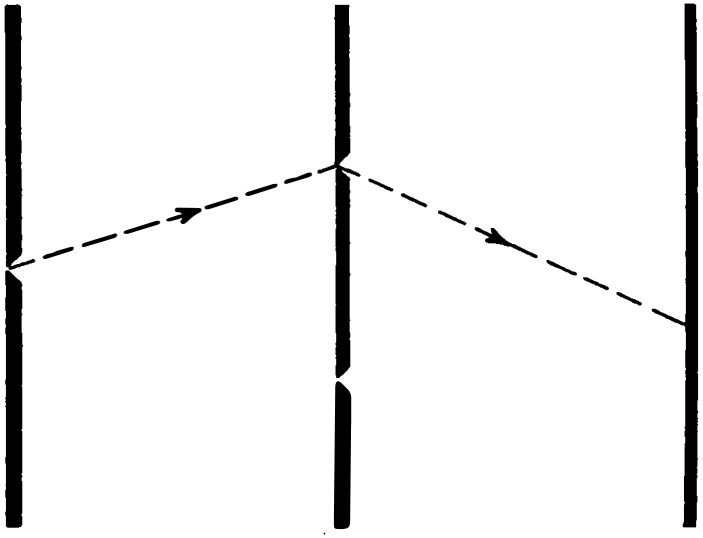


Şekil 8.1 Tek bir yarıktan geçen elektron demeti, en yoğun "parçacık" dağılımını yarığın hizasında oluşturur.

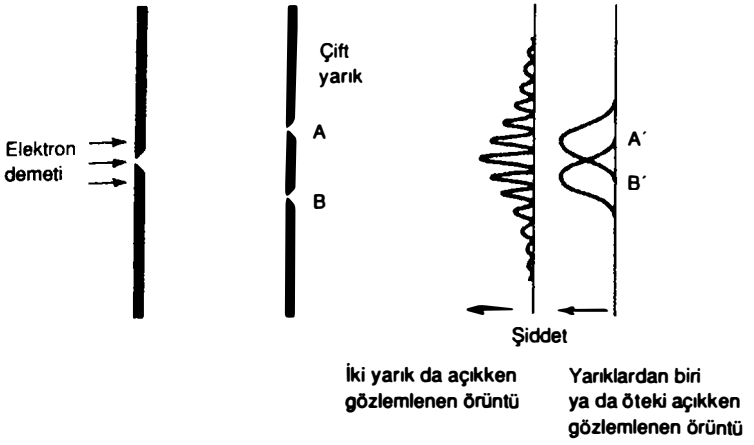
ünlü deneyinde olduğu gibi uzun, ince yarıklar şeklinde olabilir, fakat küçük yuvarlak delikler de aynı işi görür. Bu duvarın bir tarafında bir tür detektör görevi gören başka bir duvar vardır. Eğer deneyi ışıkla yapıyorsak detektör üzerinde açık ve koyu şeritler görebileceğimiz beyaz bir yüzey olmalı ya da boş zamanımızda tabedip inceleyebileceğimiz bir fotoğraf plakası. Eğer elektronlarla çalışıyorsak perde bir dizi elektron detektörüyle kaplanabilir ya da perdenin belli bir yerine kaç tane elektron düşmüş anlamak için istediğimiz zaman hareket ettirebileceğimiz tekerlekli bir detektör de düşünebiliriz. Perdede neler olup bittiğini kaydetmenin bir yolunu bildiğimiz takdirde ayrıntılar önemli değil. İki delikli duvarın öteki yanında bir foton, elektron vb. kaynağı var. Bir lamba olabilir ya da televizyonunuzda ekranı tarayarak görüntü oluşturmada kullanılan bir elektron tabancası; yine ayrıntılar önemli değil. Gönderilen şey-

ler iki delikten geçerken ve arkadaki perdede neler olur – bunlar detektörümüzde nasıl bir örüntü oluştururlar?

Önce fotonların ve elektronların kuantum dünyasından biraz uzaklaşıp gündelik hayatta neler olur ona bir bakalım. Bütün deney düzeneğini bir su kabına koyarak dalgaların delikten geçerken nasıl kırındıklarını görmek çok kolay. Burada kaynak olarak düzenli dalgalar yaratmak için çalkalanıp duran bir tür cihaz kullanılır. Dalgalar deliklerden yayılıp her bir delikten gelen dalgaların girişiminden dolayı tepe ve çukurlardan oluşan düzenli bir örüntü oluştururlar. Duvardaki deliklerden bir tanesini kapatırsak perdedeki dalgaların yüksekliği basit, düzenli bir şekilde değişir. En büyük dalgalar deliğe en yakın olanlardır, yani su kabındaki en kısa mesafede olanlar. Her iki yana gittikçe dalga genliği azalır. Bu deliği kapatıp öte-



Şekil 8.2 Bir yarık çiftinin bir tanesi içinden geçen bir elektron ya da fotonun sağduyuya göre tek bir yarıktan geçenle aynı şekilde davranması "gerekir".



Şekil 8.3 Fakat elektronlar ve fotonlarla yapılan deneylerde her iki yarık da "açık"ken gözlemlenen örüntünün her bir yarıktan ayrı ayrı gördüklerimizi birleştirdiğimizde elde ettiğimiz örüntüyle aynı olmadığı görülmüştür.

ki deliği açtığımızda aynı görüntü elde edilir. Dalganın şiddeti, yani dalganın taşıdığı enerji miktarının ölçüsü yüksekliğin, yani genliğin karesiyle (H^2) doğru orantılıdır ve her iki ayrı delik için aynı örüntüyü gösterir. Fakat her iki delik de açıkken örüntü çok daha karmaşıktır. İki deliğin hizasında büyük bir tepe oluşur, fakat tepenin her iki yanında da çok düşük bir şiddet vardır, burada iki dalga grubu birbirini yok eder ve perde üzerinde bir alçak bir yüksek dalga örüntüsü tekrarlanıp durur. Matematiksel olarak iki deliğin beraberkenki şiddetlerinin, deliklerin ayrı ayrı şiddetlerinin toplamı olduğunu bulmak yerine (karelerinin toplamı), iki genliğin toplamlarının karesi olduğu çıkar ortaya. Genlikleri H ve J olan dalgaların şiddeti, $I = H^2 + J^2$ değil,

$$I = (H + J)^2$$

şeklinde ifade edildiği gibidir ve

$$I = H^2 + J^2 + 2HJ$$

halini alır.

Bu fazladan terim iki dalganın oluşturduğu girişim yüzündendir ve *H*'lerin ve *J*'lerin hem negatif hem de pozitif olmalarına açık kapı bırakarak girişim örüntüsündeki tepe ve çukurları tam olarak açıklar.

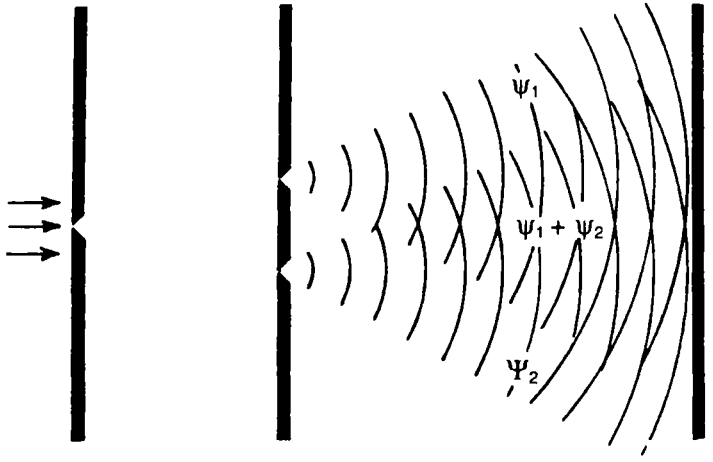
Eğer aynı türden bir deneyi gündelik hayattaki büyük nesnelerle gerçekleştirseydik (Feynman uçarılık yapıp duvardaki deliklerden mermiler geçiren bir makineli tüfekle, arka perdeye bu mermilerin toplanacağı kum torbalarının olduğu bir deney düzeneği hayal etmişti) herhangi bir "girişim terimi" bulmayacaktık. Çok sayıda mermiyi deliklerden geçirdikten sonra farklı kum torbalarında farklı sayıda mermiler *bulurduk*. Tek bir delik açıkken "perde"ye yayılmış mermi örüntüsü tıpkı su dalgalarının tek delik açıkken gösterdiği şiddet çeşitliliğine benzerdi. Fakat *iki delik birden* açıkken farklı kaplarda bulunan mermi örüntüsü, iki delikten ayrı ayrı geçmiş olduğu zamanki sonuçların toplamından ibaret olurdu – mermilerin çoğu iki deliğin hemen arkasındaki bölgede toplanırdı ve girişimin oluşturduğu tepe ve çukur olmaksızın her iki yanda çok güzel düzgün bir azalma eğrisi görülürdü. Bu örnekte, her merminin bir enerji birimini temsil ettiğini varsayarsak şiddet dağılımı şu denklemle verilir:

$$I = I_1 + I_2,$$

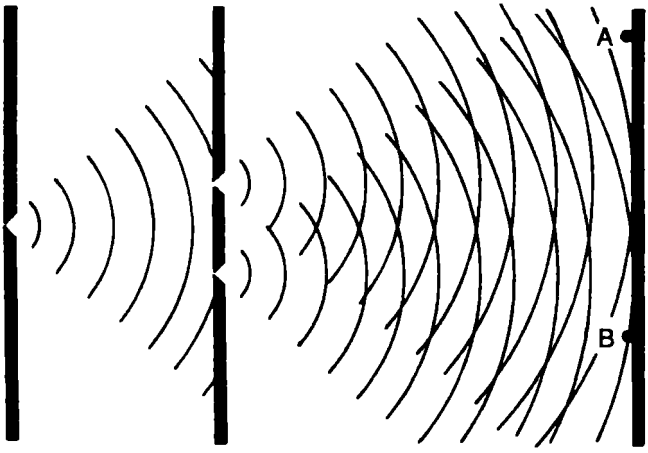
burada I_1 dalga denklemindeki H^2'ye, I_2 de J^2'ye karşılık gelir. Girişim terimi yoktur.

Sırada ne olduğunu biliyorsunuz. Şimdi aynı deneyin ışıkla ve elektronlarla yapıldığını hayal edin. Tabii çift yarık deneyi gerçekten pek çok, pek çok defa ışıkla aynı bu şekilde yapılmıştır ve tıpkı dalga örneğinde olduğu gibi kırınım örüntüleri oluşturur. Elektron deneyi tam böyle yapılmamıştır –bazı şeyleri yeterince küçük ölçekte yapmanın zorlukları vardır– fakat kristallerdeki atomlardan elektron demetleri saçma yoluyla eşdeğer deneyler gerçekleştirilmiştir. Hikâyeyi basitleştirmek için gerçek elektron deneylerinden çıkan bariz sonuçları o hayali çift yarık deneyindeki dile dönüştüreceğim. Tıpkı ışık gibi elektronlar da kırınım örüntüsü gösterirler.

Peki ne var bunda? Birlikte yaşamayı öğrendiğimiz parçacık/dalga ikiliği değil mi bu? Mesele şu ki, onu kuantumla yemek pişir-



Şekil 8.4 "Olasılık dalgaları" demetteki her bir "parçacığın" nereye gideceğine karar veriyor gibidir ve olasılık dalgaları tıpkı su dalgaları gibi girişim yaparlar (bkz. Şekil 1.3).



Şekil 8.5 Bir elektronun A'da ya da B'de görünme olasılığını belirlemek için dalga davranışının kuralları gereklidir; ne var ki, A'ya ya da B'ye baktığımızda ya bir elektron –bir parçacık– görürüz ya da görmeyiz. Dalgaysa görülmez. Elektronun düzenekten geçerken "gerçekten" ne yaptığını söyleyemeyiz.

me amacıyla öğrenmiştik, fakat derinde yatan imalara bakmamıştık. Artık bunu yapmanın zamanı geldi. Schrödinger'in dalga denklemindeki değişken ψ fonksiyonunun elektronla (ya da denklem hangi parçacığı tarif ediyorsa onunla) bir ilgisi vardır. ψ bir dalgaysa kırınıp girişim örüntüsü oluşturmasına şaşmamak gerekir ve ψ'nin dalganın genliği gibi davrandığını ve ψ^2'nin de şiddeti gibi davrandığını göstermek kolay bir aşamadır. Elektronla yapılan iki delik deneyinin kırınım örüntüsü bir ψ^2 örüntüsüdür. Demette pek çok elektron varsa bunun basit bir yorumu vardır – ψ^2 bir elektronun belli bir yerde bulunma *olasılığını* temsil eder. Binlerce elektron iki delik içinden hızla geçer ve ψ dalgası yorumunu kullanarak istatistiksel anlamda nerede bulunacakları tahmin edilebilir – Born'un kuantum aşçılığına büyük katkısı budur. Fakat tek tek her bir elektronun başına ne gelir?

Bir dalganın –su dalgası mesela– perdedeki iki delikten de geçebileceğini kolay anlayabiliriz. Dalga yayılan bir şeydir. Fakat bir elektron, dalgamsı özelliklerle bağdaştırılsa bile hâlâ bir parçacık gibi görünmektedir. Her bir elektronun tabii ki ya bir delikten ya da ötekinden geçmek *zorunda* olduğuna inanmak gayet doğaldır. Deneysel olarak her bir deliği dönüşümlü olarak kapatmanın eşdeğeri bir şeyi deneyebiliriz. Böyle yaptığımızda perdede tek delik deneylerindeki her zamanki örüntüyü elde ederiz. Fakat, iki deliği birden açtığımızda mermilerde olduğu gibi bu iki örüntünün birbiriyle toplamından ortaya çıkan örüntüyü elde etmeyiz. Onun yerine dalgaların girişim örüntüsü çıkar karşımıza. Hatta öyle ki, elektron tabancamızı düzenekten her seferinde tek bir elektron geçirecek şekilde yavaşlatsak bile *yine* bu örüntüyü elde ederiz. Bir elektron sadece bir delikten geçer ve detektörümüze ulaşır, diye tahmin ederiz; sonra bir elektron daha bırakılır ve böyle devam eder. Eğer yeterince elektron geçecek kadar sabırla beklersek detektör perdemizde oluşan örüntü, dalgaların kırınım örüntüsüdür. Gerçekten de elektronlar ve fotonlarla bin aynı deneyi bin farklı laboratuvarda gerçekleştirsek ve her deneyde sadece tek bir parçacık geçirsek ve bin farklı sonucu toplasak yine kırınımı gösteren bir toplam dağılım örüntüsü elde ederdik, tıpkı o deneylerden birinde bin elektronu birlikte ge-

çirmişiz gibi. Tek bir elektron ya da tek bir foton duvardaki deliklerden birine giderken ancak öteki deliğin açık olup olmadığını "bildiği" takdirde uygulanabilir olan istatistik yasalarına uyar. Bu, kuantum dünyasının merkezindeki gizemdir.

Hile yapmayı deneyebiliriz – elektron düzenek içinde yol alırken deliklerden birini çabucak kapatabilir ya da açabiliriz. Ama işe yaramaz – elektronun geçtiği anda deliklerin durumuna göre perdedeki örüntü hep "doğru" çıkar. Elektronun hangi delikten geçtiğini "görmek" için çaktırmadan gözlemlemeyi deneyebiliriz. Bu deneyin dengi yapıldığında sonuç daha da acayip olur. Elektronun hangi delikten geçtiğini kaydeden ama arkadaki detektör perdeye gidişine izin veren bir düzenek hayal edin. O zaman elektronlar normal, akıllı uslu her günkü parçacıklar gibi davranırlar. Daima bir delikte ya da ötekinde bir elektron görürüz, ama asla ikisini birden değil. Detektör perdesinde oluşan örüntü, mermilerin oluşturduğu örüntüyle tıpatıp aynıdır, girişimden eser yoktur. Elektronlar iki deliğin birden açık olup olmadığını bilmekle kalmaz onları seyredip seyretmediğimizi de bilirler ve hareketlerini de ona göre ayarlarlar. Gözlemcinin deneyle etkileşimine dair bundan daha açık bir örnek yoktur. Etrafa yayılan elektron dalgasına bakmaya çalıştığımızda, elektron belli bir parçacık haline gelir, fakat biz ona bakmazken seçeneklerini açık tutar. Born'un olasılıklarıyla ifade edersek, elektron bizim ölçümümüzden dolayı bir dizi olasılık içinden tek bir gidişatı seçmeye zorlanmaktadır. Bir delikten geçmesi için belli bir olasılık vardır ve ötekinden geçmesi için de aynı oranda bir olasılık vardır; olasılık girişimi detektörümüzdeki kırınım örüntüsünü oluşturur. Elektronun yerini tespit ettiğimizde sadece tek bir yerde olabilir ve bu onun gelecekteki davranışının olasılık örüntüsünü değiştirir – çünkü artık onun hangi delikten geçtiği kesindir. Fakat hiç kimse bakmadığı sürece doğanın kendisi de elektronun hangi delikten geçtiğini bilmez.

ÇÖKEN DALGALAR

Ne görürsen onu alırsın. Bir deney gözlemi sadece deney bağlamında geçerlidir ve gözlemlemediğimiz şeylerin ayrıntısını tamamlamak için kullanılamaz. Çift yarık deneyinin bize dalgalarla uğraştığımızı söylediğini iddia edebilirsiniz; aynı şekilde sadece detektör perdesindeki örüntüye bakarak düzenekte bir değil iki delik olduğu çıkarsamasını yapabilirsiniz. Önemli olan bu meselenin tamamıdır – düzenek, elektronlar ve gözlemcinin hepsi deneyin parçasıdır. Elektron geçerken bakmazsak elektronun hangi delikten geçtiğini söyleyemeyiz (bu da başka bir deneydir). Bir elektron tabancadan çıkıp detektöre ulaşır ve sanki gözlemci de dahil bütün deney kurulumuyla ilgili bilgiye sahip görünmektedir. Feynman'ın 1965'te BBC seyircilerine açıkladığı gibi eğer elektronun hangi delikten geçtiğini söyleyebilecek bir deney düzeneğiniz varsa, ya bir delikten ya da ötekinden geçeceğini söyleyebilirsiniz. Fakat bu şeyin hangi delikten geçtiğini söyleyecek bir düzeneğiniz yoksa şu delikten ya da bu delikten geçer diyemezsiniz. "Bakmazken ya bu delikten ya da şu delikten geçer diye bir sonuca varmak hata olur," diyor Feynman. "Bütüncü" terimi öylesine yanlış kullanılan moda bir kelime oldu ki burada kullanmaya tereddüt ediyorum. Fakat kuantum dünyasını tarife daha yakışan bir kelime yok. Kuantum dünyası bütüncüdür; parçalar bir anlamda bütünle temas halindedir. Bunun anlamı bir deney kurulumunun tamamı da değildir sadece. Dünya bütün seçeneklerini, bütün olasılıklarını mümkün olduğu kadar uzun süre açık tutuyor gibi. Kuantum dünyasının standart Kopenhag yorumunun en garip özelliği şudur: Bir sistemi seçeneklerden birini seçmeye zorlayan ve bu seçeneği ancak o zaman gerçeğe dönüştüren şey, o sistemi gözlemleme edimidir.

İki delikle yapılan en basit deneyde olasılık girişimi, tabancadan çıkan elektronun gözden kaybolunca ortadan kaybolması ve her biri detektör perdesine farklı yollardan giden bir dizi hayalet elektronla yer değiştirmesi şeklinde yorumlanabilir. Hayaletler birbiriyle gi-

rişim yapar ve her seferinde tek bir "gerçek" elektronu ele almış olsak da elektronların perde tarafından tespit ediliş şekline bakınca bu girişimin izlerini buluruz. Ne var ki bu bir dizi hayalet elektron sadece biz bakmadığımız zaman ne olduğunu tarif etmektedir; baktığımız zaman da biri dışında hepsi yok olur ve bu bir tane hayalet gerçek bir elektron olarak cisimleşir. Schrödinger'in dalga denklemleri diliyle söylersek her bir "hayalet" bir dalgaya karşılık gelmektedir, daha doğrusu bir dalga paketine. Bu dalgaları Born bir olasılık ölçü birimi olarak yorumlamıştı. Bir dizi potansiyel elektrondan bir hayaleti somutlaştıran bu gözlem, dalga mekaniğinde tek bir gerçek elektronu tarif eden bir dalga paketi hariç bütün olasılık dalga dizisinin ortadan kalkmasına karşılık gelmektedir. Buna "dalga fonksiyonunun çöküşü" denir ve tuhaf da olsa Kopenhag yorumunun belkemiğidir ki Kopenhag yorumu da kuantum aşçılığının temelidir. Fakat kuantum yemek kitabındaki tarifleri güle oynaya kullanan fizikçilerin, elektronik mühendislerinin ve diğerlerinin çoğunun, lazerlerin ve bilgisayarların tasarımında ya da genetik maddenin incelenmesi çalışmalarında son derece güvenilir olduğu kanıtlanmış kuralların, aslında düpedüz, binlerce hayalet parçacığın sürekli birbiriyle girişim yaptıkları ve sadece bir gözlem sırasında dalga fonksiyonu çökünce gerçek bir tek parçacık şekline büründükleri varsayımına dayalı olduğunun farkında oldukları şüphe götürür. Daha beteri, biz elektronlara ya da her neye bakıyorsak bakmayı *bırakır* bırakmaz hemen yeniden bir dizi hayalet parçacığa bölünür ve bunların her biri kuantum dünyasındaki kendi olasılık yollarını tutturur. Bakmadığımız sürece hiçbir şey gerçek değildir ve bakmayı bıraktığımız anda gerçekliği sona erer.

Belki de kuantum yemek kitabını kullanan insanların kafaları, matematik denklemlerine aşinalıklarından dolayı pek rahattır. Feynman temel tarifi basit bir şekilde açıklamaktadır. Kuantum mekaniğinde bir "olay" bir dizi başlangıç şartından ve nihai şarttan ibarettir, ne eksik ne fazla. Elektron, düzeneğimizin bir ucundaki tabancadan çıkar ve elektron deliklerin öteki tarafındaki belli bir detektöre ulaşır. Bu bir olaydır. Bir olayın olasılığı Schrödinger'in dalga fonksiyonu olan bir sayının (ψ) karesiyle gösterilir. Eğer olayın

meydana gelebileceği birden fazla yol varsa (deneydeki iki delik de açıkken), o zaman her bir olası olayın olasılığı (elektronun her bir seçilmiş detektöre varma olasılığı) ψ'lerin toplamının karesiyle verilir ve burada girişim vardır. Fakat alternatif olasılıklardan gerçekten hangisinin meydana geldiğini bulmak için gözlem yaparsak (elektronun hangi delikten geçtiğine bakarsak) olasılık dağılımı ψ' lerin karelerinin toplamına eşit çıkar ve girişim terimi yok olur – dalga fonksiyonu çöker.

Bunun fiziği imkânsızdır, fakat matematiği yalın, basit, her fizikçiye aşina gelen denklemlerdir. Denklemin ne anlama geldiğini sormadığınız sürece sorun yok. Dünyanın neden böyle olduğunu sorun, Feynman bile "Hiçbir fikrimiz yok," diye cevap verir. Olup bitenlerin fiziksel bir resmini istemekte ısrar edin, o zaman da bütün fiziksel resimlerin bir hayaletler dünyasına dönüşeceğini görürsünüz. Burada parçacıklar sadece gözlemlediğimiz zaman gerçektir ve momentum ya da konum gibi bir özellik bile gözlemin bir ürünüdür. Einstein gibi pek çok saygın fizikçinin kuantum mekaniğinin bu yorumundan kaçabilmek için onlarca yıl çalışmasına pek şaşmamak gerek. Einstein'ın bir sonraki bölümde kısaca değineceğim çabaları hep boşa çıkmıştır ve Kopenhag yorumunun yanlışlığını ispatlamaya çalışan yeni başarısız girişimler bu hayaletsi olasılıklar dünyası tablosunun temelini güçlendirmiş ve kuantum dünyasının ötesine geçip yeni bütüncü bir evren resmi geliştirmeye kapıları açmıştır. Bu yeni resmin temeli tamamlayıcılık kavramının nihai ifadesidir, fakat bunun getireceği sonuçlara bakmadan önce çetrefil bir konuyu daha ele almamız gerekiyor.

TAMAMLAYICILIK KURALLARI

Genel görelilik ve kuantum mekaniği genellikle yirminci yüzyıl kuramsal biliminin ikiz zaferleri gibi görülürler ve bugünün fizikçilerinin en büyük hayali bu ikisini tek büyük bir kuramda gerçek anlamda birleştirmektir. Birazdan göreceğimiz gibi bu çabaları evrenin doğasına dair derin kavrayışlar sağlamaktadır kesinlikle. Fakat

bu çabalar dünyanın bu iki resminin tam anlamıyla uyuşmaz olabileceğini hesaba katmıyor gibi.

Bohr, daha sonraları Kopenhag yorumu diye bilinegelen, 1927'de yaptığı daha o ilk açıklamasında dünyanın sadece uzay-zaman koordinatları ve mutlak nedenselliğe dayanan tarifleriyle, gözlemcinin gözlemlenen sistemin bir parçası olduğu, bu sisteme müdahale ettiği kuantum resmi arasındaki zıtlığı vurgulamıştı. Uzay-zamandaki koordinatlar konumu temsil eder; nedensellik her şeyin tam olarak nereye gittiğini bilmenize bağlıdır, esas olarak da momentumları bilmenize. Klasik kuramlar ikisini birden bilebileceğinizi varsayar; kuantum mekaniği uzay-zamandaki kesinliğin bedelinin momentumun belirsizliği, dolayısıyla da nedensellik olduğunu gösterir. Genel görelilik bu anlamda klasik bir kuramdır ve bu yüzden evrenin temel tarifi olarak kuantum mekaniğiyle aynı kefeye koyulamaz. Aralarında bir çelişki olursa ya da olduğunda üzerinde yaşadığımız dünyanın en iyi tarifi için yönümüzü kuantum kuramına çevirmemiz gerekir.

Fakat üzerinde yaşadığımız dünya nedir? Bohr emsalsiz bir "dünya" fikrinin bizatihi kendisinin yanıltıcı olabileceğini ileri sürüyordu ve iki delik deneyinin başka bir yorumunu sunuyordu. O basit deneyde bile, tabii ki, bir elektronun ya da fotonun iki delikten *her birinden* geçmek için takip edeceği pek çok yol vardır. Fakat kolaylık olsun diye biz sadece iki olasılık olduğunu varsayalım, yani parçacık ya A deliğinden geçer ya da B deliğinden. Bohr her bir olasılığın farklı bir dünyayı temsil ettiğini düşünebileceğimizi söylüyordu. Bir dünyada parçacık A deliğinden geçer; ötekinde B deliğinden. Fakat, gerçek dünya, bizim yaşadığımız dünya, bu basit dünyaların ikisi de değildir. Bizim dünyamız parçacığın iki güzergâhına karşılık gelen iki olası dünyanın melez bileşimidir ve bu dünyalar birbiriyle girişim yapar. Parçacığın hangi delikten geçtiğine baktığımızda artık tek bir dünya vardır, çünkü öteki olasılığı saf dışı bırakmışızdır ve bu durumda girişim olmaz. Bohr kuantum denklemlerinden sadece hayalet elektronları ortaya çıkarmamış aynı zamanda hayalet gerçeklikleri, sadece bakmadığımız zamanlar var olan hayalet *dünyaları* da çıkarmıştır. Bu basit örneğin sadece

bir iki delik deneyiyle birleştirilmiş iki dünyayı kapsamayıp bütün evrendeki her kuantum sisteminin sıçramak için "seçebileceği" binlerce yola karşılık gelen binlerce hayalet gerçeklikleri kapsadığını düşünün; her olası parçacık için her olası dalga fonksiyonu; Dirac'ın q sayısının mümkün olan bütün değerleri. Bunu A deliğindeki elektronun B deliğinin açık mı kapalı mı olduğunu *bilmesi* ve ilke olarak bütün evrenin kuantum durumunu bilmesi muammasıyla birleştirin, işte o zaman neden Kopenhag yorumuna onun en derin imalarını anlayan bazı uzmanlar tarafından çok sert saldırıldığını ve bazı başka uzmanların bu imalardan rahatsız olsalar da yorumu heyecan verici bulduğunu, öte yandan derin imaları dert etmeyen sıradan ölümlülerin güle oynaya kuantum yemek kitabını, çöken dalga fonksiyonlarını ve ötekileri yaşadığımız dünyayı değiştirmek için kullanmaya devam ettiklerini anlamak kolay olur.

Dokuzuncu Bölüm

Paradokslar ve Olasılıklar

Kopenhag yorumuna yapılan her saldırı onun yerini daha da sağlamlaştırdı. Einstein çapındaki düşünürler bir kuramın kusurunu bulmaya çalışır da, kuramın savunucuları saldırıya geçenlerin bütün argümanlarını boşa çıkarmayı başarırsa o kuram davadan daha da güçlü çıkar tabii. Kopenhag yorumu kesinlikle iş görmesi anlamında "doğru"dur; kuantum kurallarının daha iyi herhangi bir yorumu, deneycilerin deneylerinin sonuçlarını tahmin edebilmesini –en azından istatistiksel olarak– sağlayan ve mühendislerin işleyen lazer sistemleri, bilgisayarlar vb. tasarlamalarını sağlayan işe yarar bir görüş olarak Kopenhag yorumunu kendi kapsamına dahil etmek zorundadır. Kopenhag yorumuna karşı getirilen bütün önerilerin çürütülmesini sağlayan bütün o temel çalışmaların tekrar üzerinden gitmenin anlamı yok. Başkaları bunu çok güzel yapmış. Ne var ki, belki dikkat edilecek en önemli nokta Heisenberg'in 1958'de *Fizik ve Felsefe* adlı kitabında dile getirdiği husus olabilir. Heisenberg bütün karşı görüşlerin "kuantum kuramının temel simetrisini (örneğin dalgalarla parçacıklar arasındaki simetriyi ya da konumla hız arasındaki simetriyi) feda etmek zorunda" kaldığını vurguluyordu. "Bu yüzden eğer bu simetri özellikleri... doğanın hakiki birer özelliği olarak kabul edilecekse Kopenhag yorumundan kaçış yok; kaldı ki şu ana kadar yapılmış olan her deney bu görüşü desteklemektedir"(sayfa 128).

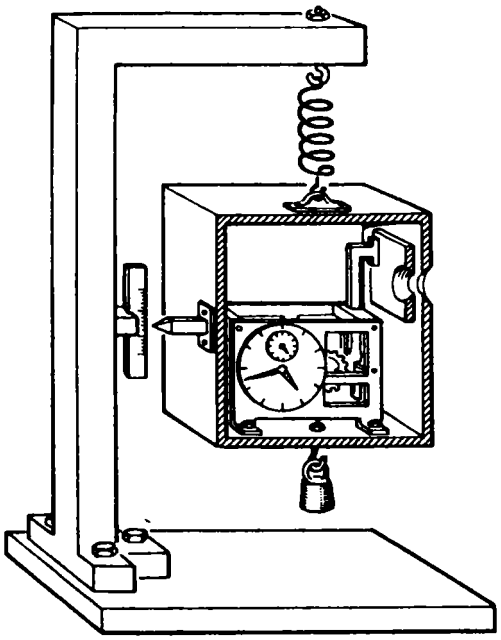
Hâlâ bu temel simetriyi taşıyan *gelişmiş* bir Kopenhag yorumu mevcut (çürütme ya da karşı öneri *değil*) ve kuantum gerçekliğinin "bütçeye" en uygun bu resmi On Birinci Bölüm'de tarif edilecek. Fakat Heisenberg'in 1958'de basılmış bir kitapta bundan söz etme-

miş olması pek şaşırtıcı değil, zira bu yeni resmi o sıralarda ABD'deki bir doktora öğrencisi daha yeni yeni geliştirmeye başlamıştı. Fakat oraya geçmeden önce, 1982'ye gelindiğinde Kopenhag yorumunun kuantum gerçeği konusunda işe yarayan bir görüş olarak doğruluğunu hiçbir şüpheye yer bırakmadan tesis eden bir kuram ve deney bileşiminin izlerini sürmek doğru olacak. Hikâye Einstein'la başlıyor, elli yılı aşkın bir süre sonra Paris'teki bir fizik laboratuvarında son buluyor; bilimin en müthiş hikâyelerinden biridir bu.

KUTUDAKİ SAAT

Bohr'la Einstein'ın kuantum kuramı hakkında yaptıkları büyük tartışma 1927'de beşinci Solvay Kongresi'nde başlamış ve Einstein'ın 1955'te ölümüne kadar sürmüştür. Einstein konuyla ilgili olarak Born'la da yazışmıştır ve *The Born-Einstein Letters*'dan da tartışmaya dair bir fikir edinmek mümkündür. Tartışma Kopenhag yorumunun öngörüleri hakkında bir dizi hayali deneyler üzerinde odaklanmıştı – laboratuvarda yapılan gerçek deneyler değil, "düşünce deneyleri". Burada oynanan oyunun kuralına göre Einstein'ın iki tamamlayıcı şeyi, bir parçacığın konumu ve kütlesini ya da kesin bir zamandaki kesin enerjisini vs. aynı anda ölçebilmenin mümkün olacağı bir deney düşünmesi gerekiyordu. Bohr ve Born da Einstein'ın düşünce deneyinin kuramı alaşağı edecek şekilde gerçekleştirilemeyeceğini göstermeye çalışacaklardı. Bunlardan bir örnek olan "kutudaki saat", oyunun nasıl oynandığını göstermeye yetecektir.

Einstein bir kutu hayal etmemizi istiyordu, yan tarafına açılmış bir deliğin bir de kapağı vardı ve kutunun içindeki bir saatin kontrolünde açılıp kapatılabilecekti. Saat ve kapak mekanizması dışında kutu ışımayla doluydu. Bu düzeneği öyle kurun ki saatin gösterdiği önceden belirlenmiş kesin bir zamanda kapak açılıp bir fotonun kaçmasına izin versin ve sonra tekrar kapansın. Şimdi kutuyu tartın, fotonun kaçmasını bekleyin, kutuyu tekrar tartın. Kütle enerji demek olduğundan, iki ağırlık arasındaki fark bize kaçan elektro-



Şekil 9.1 "Kutudaki saat" deneyi. Deneyi pratikte uygulayabilmek için gerekli ıvır zıvır (ağırlıklar, yaylar vs.) enerjiyle zamanın birlikte ölçümündeki belirsizliği kaldırmayı daima imkânsız kılar.

nun enerjisini verir. Böylece ilkesel olarak fotonun tam enerjisini ve delikten çıktığı tam zamanı bilerek belirsizlik ilkesini çürütürüz.

Bohr, bu argümanlarda hep olduğu gibi, ölçümlerin pratikte nasıl yapılacağının ayrıntılarına bakarak tartışmayı kazandı. Kutunun tartılması gerekiyordu, demek ki bir kütle çekim alanında mesela bir yayla asılı olmalıydı. Fotonun kutudan kaçmasından önce, hayali deneyci kutuya iyice sabitlenmiş bir skaladaki ibrenin yerini kaydeder. Foton kaçtıktan sonra deneyci ilke olarak ibreyi aynı konuma getirmek için ağırlık ekleyebilir. Fakat bunun kendisi belirsizlik ilişkilerini içerir. İbrenin konumu sadece Heisenberg'in bağıntısının

koyduğu sınırlar içerisinde belirlenebilir ve kutunun momentumunda ibrenin konumunun belirsizliğiyle bağlantılı bir belirsizlik vardır. Kutunun ağırlığını ne kadar hassas ölçerseniz, momentumu hakkındaki hayati bilgisinde o derece belirsizlik vardır. Kutuya küçük bir ağırlık ekleyip yayı eski yerine getirerek baştaki durumu tekrar sağlamaya çalışsanız ve de bu fazladan ağırlığı kaçan fotonun enerjisini bulmak için tartsanız bile belirsizliği Heisenberg bağıntısının izin verdiği sınırlara indirmekten daha fazlasını yapamazsınız, o da bu örnekte $\Delta E\ \Delta t > \hbar$ olur.

Bunun ve Einstein-Bohr tartışmasında konu olmuş başka düşünce deneylerinin ayrıntıları Abraham Pais'ın *Subtle Is the Lord...* kitabında bulunabilir. Pais Bohr'un hayali deneylerin tam ve ayrıntılı tarifini –bu örnekte tartının kasasını yerine sabitleyen ağır cıvatalar, kütlenin ölçülmesini sağlayan ama bununla da kutuyu hareket ettirmesi gereken yay, eklenmesi gereken küçük ağırlık vb.– istemekteki ısrarının hiçbir şekilde kapris olmadığını vurguluyor. Bütün deney sonuçları klasik dille, gündelik gerçeklik diliyle yorumlanmak zorunda. Kutuyu konumu hakkında hiçbir belirsizlik olmayacak şekilde sıkıca yerine *sabitleyebilirdik*, fakat o zaman da kütle değişimini ölçmemiz mümkün olmazdı. Kuantum fikirlerini gündelik dille ifade etmeye çalıştığımız için kuantum belirsizliği ikilemi karşımıza çıkıyor, zaten Bohr da o yüzden deneylerin iciğini ciciğini vurguluyordu.

"EPR PARADOKSU"

Einstein Bohr'un bu ve öteki düşünce deneyleriyle ilgili eleştirilerini kabul etmiş ve 1930'ların başlarına gelindiğinde kuantum kurallarını yeni bir tür hayali deneyle sınamıştı. Bu yeni yaklaşımın ardındaki temel düşünce bir parçacık hakkındaki deneysel bilgiyi ikinci bir parçacığın konum ve momentum gibi özelliklerini ortaya çıkarmak için kullanmaktı. Tartışmanın bu versiyonu Einstein hayattayken hiç sonuçlandırılamadı, fakat şimdi başarıyla test edilmiş bir şey, hem de geliştirilmiş bir düşünce deneyiyle değil laboratu-

vardaki gerçek bir deneyle. Bir kere daha Bohr kazanıp Einstein kaybediyor.

1930'ların başlarında Einstein'ın özel hayatı allak bullaktı. Nazi rejiminin tehdidi altında Almanya'dan ayrılmak zorunda kalmıştı. 1935'e gelindiğinde Princeton'a yerleşmişti ve Aralık 1936'da ikinci karısı Elsa uzun bir hastalığın ardından ölmüştü. Einstein bütün bu hengâme içerisinde kuantum kuramı yorumu üzerine kafa yormaya devam etti. Bohr'un argümanlarına yenik düşmüştü fakat, belirsizliği içermesi ve kesin nedensellikten yoksun olması sebebiyle Kopenhag yorumunun gerçek dünyanın geçerli bir tarifini sunacak en son söz olduğuna kanaat getirmiş durumdaydı. Max Jammer *The Philosophy of Quantum Mechanics*'de Einstein'ın o sıralar bu konu üzerindeki düşüncelerinin bazı ince ayrıntılarını anlatmıştır. 1934'te ve 1935'te Einstein, Boris Podolsky ve Nathan Rosen'la birlikte, aslında hiç de bir paradoksu anlatmasa da "EPR Paradoksu" diye bilinegelen bir paradoksu serimleyen bir yazı üzerinde çalışırken birkaç şey aynı yönde seyretti.[49]

Argümanın çıkış noktası Einstein'a ve çalışma arkadaşlarına göre Kopenhag yorumunun *tamamlanmamış* olmasıydı – yani gerçekten evrenin işlemesini sağlayan, altta yatan bir saat vardı ve kuantum seviyesinde istatistiksel değişimler göstererek belirsizlik ve tahmin edilemezlik *görüntüsü* veren de sadece buydu.

Birbiriyle etkileşim içine girip sonra birbirinden ayrılarak uçan ve deneyci onlardan birini araştırmaya karar verene kadar başka hiçbir şeyle etkileşim içine girmeyecek iki parçacık hayal edin, diyordu Einstein, Podolsky ve Rosen. Her bir parçacığın kendi momentumu var, her biri uzayda bir konumda yerleşmiş durumda. Kuantum kuramı kuralları çerçevesinde bile iki parçacığın toplam momentumunu (birbiriyle toplayarak) ve birbirlerine yakın oldukları zaman aralarında bulunan mesafeyi *tam olarak* ölçmemize izin var-

49. A. Einstein, B. Podolsky ve N. Rosen, "Fiziksel gerçekliğin kuantum mekaniksel tarifi tamamlanmış sayılabilir mi?", *Physical Review*, cilt 47, s. 770-80, 1935. Bu makale *Physical Reality* cildinde yeniden basılmışların arasında, y.h. S. Toulmin, Harper & Row, 1970.

dır. Çok daha sonra parçacıklardan tekinin momentumunu ölçmeye karar verirsek öteki parçacığın momentumunun ne olması gerektiğini otomatik olarak biliriz çünkü toplamın değişmemesi gerekir. Aynı şekilde ilk parçacığın tam konumunu ölçüp bundan ikinci parçacığın konumunu ortaya çıkarabilirdik. Şimdi, A parçacığının momentumunun fiziksel ölçümünün, *kendi* konumuyla ilgili bilgiyi yok ettiğini, bu yüzden tam olarak konumunu bilemeyeceğimizi, aynı şekilde A parçacığının konumunun fiziksel ölçümünün momentumunu bozacağını bu yüzden momentumun bilinemeyeceğini ileri sürmek ile Einstein ve çalışma arkadaşlarına göre B parçacığının durumunun A parçacığı üzerinde bizim karar vererek yapacağımız iki ölçümden birine bağlı olduğunu ileri sürmek bambaşka bir şeydi. B parçacığı nasıl olur da kesin olarak tanımlı bir momentumu mu olsun *yoksa* kesin olarak tanımlı bir konumu mu olsun "bilebilir"? Kuantum dünyasında *buradaki* bir parçacık üzerinde yaptığımız bir ölçüm onun *oradaki* ortağını etkiliyor gibiydi. Bu nedenselliğe karşıydı, uzayda seyahat eden, "uzaktan etki" adı verilen bir anında "iletişim"di.

EPR yazısı şu sonuca varıyordu: Kopenhag yorumunu kabul ederseniz o zaman bu yorum "[ikinci sistemdeki konum ve momentumun] gerçekliğini ikinci sistemi herhangi bir şekilde etkilemeyen ilk sistem üzerinde yapılan ölçme sürecine bağlı kılar. *Akla yatkın hiçbir gerçeklik tanımı buna izin veremez.*"[50] İşte bu ekibin öteki meslektaşlarından ve bütün Kopenhag ekolünden ayrıldığı nokta burasıdır. Kimse bu argümanın mantığına karşı çıkmamıştı, fakat gerçekliğin "akla yatkın" tanımını neyin teşkil ettiği konusunda anlaşamadılar. Bohr ve mesai arkadaşları ikinci parçacığın konum ve momentumunun, ilk parçacığa ne yaparsanız yapın, ölçülene kadar hiçbir nesnel anlamının olmadığı bir gerçeklikte yaşayabiliyorlardı. Nesnel gerçeklik dünyasıyla kuantum dünyası arasında bir seçim yapılması gerekiyordu, buna şüphe yoktu. Fakat Einstein açık olan o iki seçenekten nesnel gerçekliğe bağlı kalıp Kopenhag yorumunu reddederek çok küçük bir azınlık içinde kalıyordu.

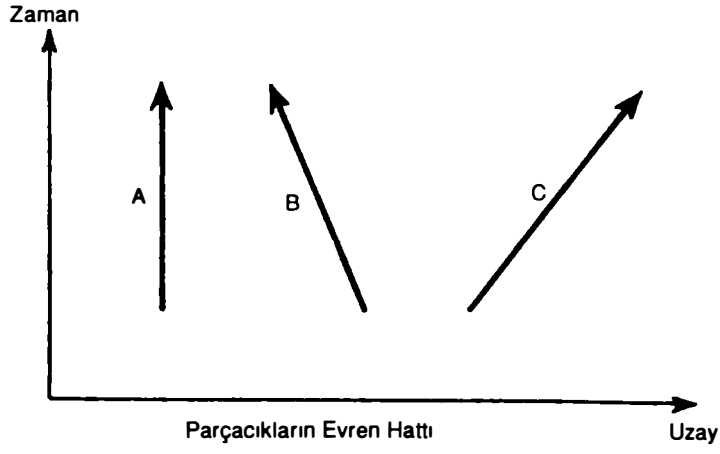
50. Aktaran Pais, s. 456.

Ne var ki Einstein dürüst adamdı, makul deneysel kanıtları kabul etmeye her zaman hazırdı. Eğer ömrü vefa etseydi yakın zamanda gerçekleştirilmiş, sonuç itibariyle bir tür EPR etkisi denebilecek şeyle ilgili deneysel testler onu kesinlikle yanılmış olduğuna ikna ederdi. Nesnel gerçekliğin bizim temel evren tanımımızda hiçbir yeri *yok*, fakat uzaktan etki ya da nedensizliğin böyle bir yeri var. Bunun deneysel olarak doğrulanması o kadar önemli ki kitapta kendi başına ayrı bir bölümü hak ediyor. Ama önce tamamlamak açısından kuantum kurallarına içkin başka paradoksal olasılıkların bazılarına bakalım – zamanda geriye yolculuk eden parçacıklara ve en nihayetinde Schrödinger'in ünlü yarı-ölü kedisine.

ZAMAN YOLCULUĞU

Fizikçiler parçacıkların uzayda ve zamandaki hareketlerini kâğıt üzerinde ya da tahtada göstermek için basit bir araç kullanırlar ki bu da zamanın akışını sayfanın altından yukarısına, hareketi de soldan sağa çizerek göstermekten ibarettir. Bu yaklaşım üç uzay boyutunu bire indirir, fakat grafiklerle çalışmış olan herkese hemen aşina gelen şekiller çıkarır ortaya, "y" eksenine karşılık gelen zaman ve "x" eksenine karşılık gelen uzay. Bu uzay-zaman diyagramları ilk olarak modern fiziğin görelilik kuramındaki paha biçilmez bir aracı olarak ortaya çıkmıştı. Bunlar Einstein'ın denklemlerinin pek çok kendine özgü niteliğini geometrik olarak ifade etmede kullanılabilir ki bu sayede üzerinde bazen daha rahat oynanabiliyor ve anlaşılması da çoğu zaman daha kolay oluyor. Bu diyagramları, 1940'larda Richard Feynman parçacık fiziği için kullandı ve o bağlamda bunlara genellikle "Feynman diyagramları" denir; parçacıkların kuantum dünyasında uzay ve zaman temsilleri momentum ve enerji cinsinden de ifade edilebilir, ki parçacıkların çarpışmasını ele alırken bu daha uygun düşer, fakat burada basit bir uzay-zaman tarifiyle yetineceğim.

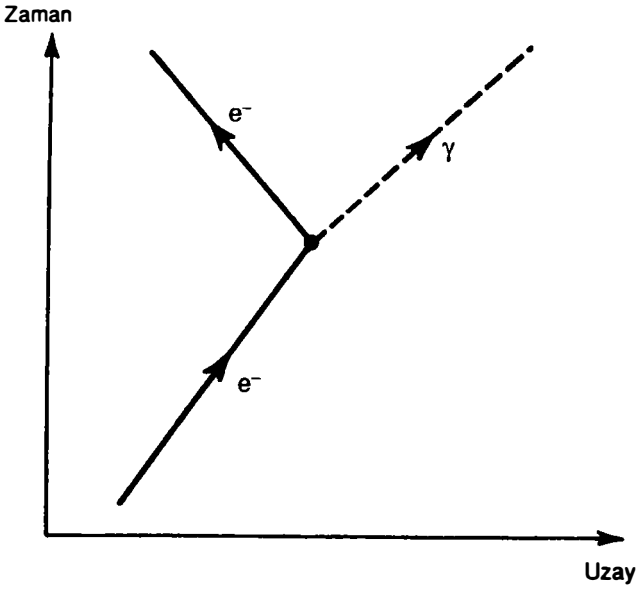
Bir elektronun çizdiği rota Feynman diyagramında bir doğruyla gösterilir. Bir yerde oturan ve hiç hareket etmeyen bir elektron say-



Şekil 9.2 Bir parçacığın hareketi zaman ve uzay içindeki bir "evren hattı" olarak gösterilebilir.

fada yukarıyı işaret eden dik bir doğruyla gösterilir, burada sadece zaman yönünde bir hareket söz konusudur; konumunu yavaş yavaş değiştiren bir elektron, zamanın akışıyla taşınıp gitmesi yanı sıra, sayfada dik yukarıyı işaret eden doğruya küçük bir açı yaparak eğilmiş bir doğruyla gösterilir; hızlı hareket eden bir elektron ise durağan bir parçacığın "evren hattı"yla [*world line*] daha geniş bir açı yapar. Uzaydaki hareket iki tarafa da olabilir, yani sağa da sola da ve eğer elektronun doğrultusu başka parçacıklarla olan çarpışmalarla saptırılırsa bu hat zikzak da olabilir. Fakat gündelik dünyada ya da görelilik kuramındaki basit uzay-zaman diyagramları dünyasında evren hattının geri dönüp sayfadan aşağıya gitmesini beklemeyiz, çünkü bunun anlamı zamanda geriye gitmek olurdu.

Örnek olarak elektronlarla devam edersek bir elektronun uzay ve zaman içinde nasıl hareket ettiğini, bir fotonla çarpışıp yönünü değiştirip ardından bir foton yaydığını ve başka bir yöne geri çekildiğini gösteren basit bir Feynman diyagramı çizebiliriz. Bu parçacık davranışı tarifinde fotonlar son derece önemli çünkü elektrik kuvve-

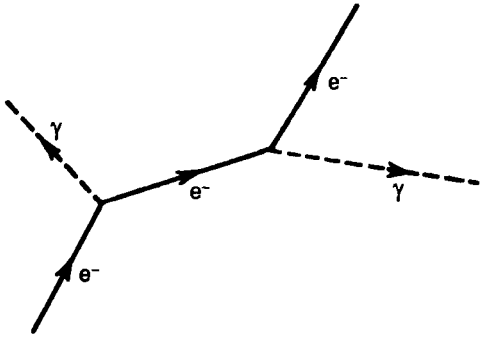


Şekil 9.3 Bir elektron uzay ve zaman içinde hareket eder, bir foton yayar (γ ışını) ve belli bir açıyla geri çekilir.

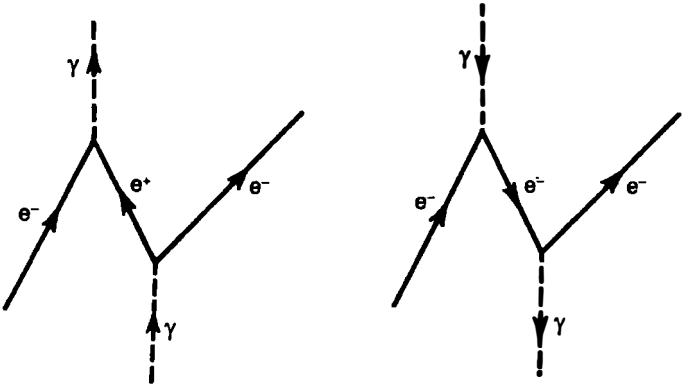
tinin taşıyıcılığını yapmaktadırlar. İki elektron birbirine yaklaşınca benzer yüklerinden doğan elektrik kuvvetinden dolayı birbirlerini itip tekrar ayrılırlar. Böyle bir karşılaşmanın Feynman diyagramında, iki elektronun evren hatlarının birleştiği, sonra bir fotonun (geri çekilip giden) bir elektronu terk ettiği ve (öteki yöne doğru itilmiş) öteki elektron tarafından soğrulduğu görülür.[51] Fotonlar elektrik alanının taşıyıcısıdırlar. Fakat bundan daha fazlasını da yapabilirler. Dirac yeterince yüksek enerjili bir fotonun, enerjisini bir elektron ve bir pozitronun kütlelerine dönüştürerek onları boşluktan üretebile-

51. Tabii bu son derece basitleştirilmiş hali. Elektron çiftinin etkileşim halindeyken aslında pek çok foton alışverişinde bulunduğunu hayal etmemiz gerekir. Aynı şekilde, bundan böyle bir pozitron/elektron çifti yaratan "bir foton"dan bahsedeceğim, halbuki gerçekte birden fazla fotonla, belki de bir çift çarpışan gama ışınıyla ya da daha da karmaşık bir durumla karşı karşıyayızdır.

ceğini göstermiştir. Pozitron (negatif enerjili elektron "deliği") kısa ömürlü olacaktır, çünkü çok geçmeden başka bir elektronla karşılaşacaktır ve bu ikili bir enerji ışımasıyla –ki bunu kolaylık olsun diye bir foton olarak gösterebiliriz– birbirini yok edecektir.

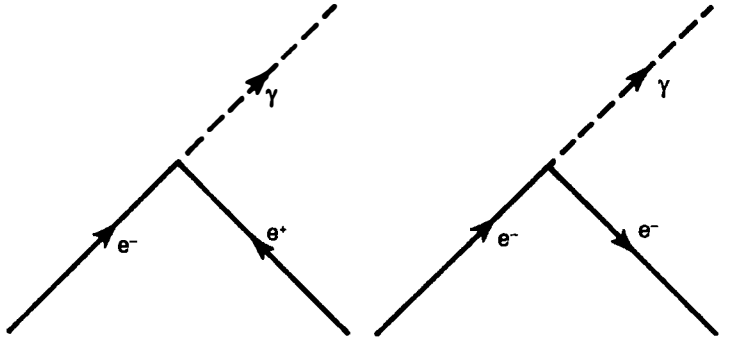


Şekil 9.4 İki fotonla etkileşime giren bir elektronun hayat hikâyesinden bir parça.



Şekil 9.5 Solda bir gama ışını bir elektron/pozitron çifti üretir, sonra pozitron başka bir elektronla karşılaşır ve onunla birlikte yok olup bir foton açığa çıkarır. Sağda tek bir elektron uzay-zaman içinde zikzak çizer ve iki fotonla etkileşime girer, tıpkı Şekil 9.4'teki gibi. Fakat bu elektron hayatının bu kısmında zamanda geriye hareket eder. Bu iki resim matematiksel olarak birbirine denktir.

Yine bütün bu etkileşim basit bir Feynman diyagramıyla gösterilebilir. Uzay ve zaman içinde yolculuk eden bir foton kendiliğinden bir elektron/pozitron çifti yaratır; elektron yoluna devam eder; pozitron başka bir elektronla karşılaşır ve yok olur; sahneyi bir foton daha terk eder. Fakat Feynman'ın 1949'da yaptığı etkileyici keşfe göre, zamanda ileriye doğru hareket eden bir pozitronun uzay-zaman tarifi Feynman diyagramında zamanda aynı güzergâhta geriye doğru ilerleyen bir elektronun matematiksel ifadesiyle *tam* tamına özdeştir. Ayrıca, fotonların karşı-parçacıkları kendileri oldukları için bu tarifte zamanda geriye giden fotonla zamanda ileriye giden foton arasında bir fark yoktur. Tamamen kolaylık olsun diye diyagramdaki fotonların oklarını kaldırabiliriz ve pozitron güzergâhındaki oku ters çevirip onu elektrona dönüştürebiliriz. Aynı Feynman diyagramı şimdi bize başka bir hikâye anlatmaktadır. Uzay ve zaman içinde hareket eden bir elektron yüksek enerjili bir fotonla karşılaşır, onu soğurur ve *zamanda geriye* doğru saçılır, ta ki yüksek enerjili bir foton yayınlayıp tekrar zamanda ileri doğru gidecek şekilde geri çekilene kadar. Karmaşık bir danstaki üç parçacık, yani iki elektron ve bir pozitron yerine elimizde bir parçacık, yani uzay *ve* zaman içinde yolunu zikzak çizerek bulan ve yol boyunca şurada



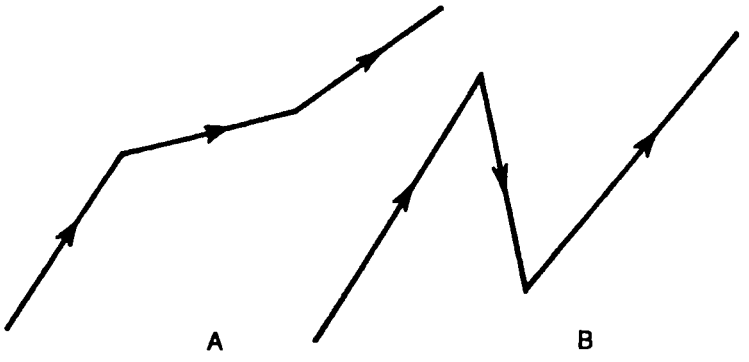
Şekil 9.6 Genel olarak bir parçacık/karşı-parçacık çiftinin birlikte yok oluşu, parçacığı zamanda geriye gönderecek kadar şiddetli bir saçılma olayı olarak da tarif edilebilir.

burada fotonlarla çarpışan tek bir elektron vardır.

Diyagramın geometrisi açısından düşük enerjili bir fotonu soğuran ve yolunu hafifçe değiştiren, sonra da fotonu yayıp tekrar yön değiştiren bir elektron örneği ile foton etkileşimiyle çok şiddetli şekilde saçılarak ömrünün bir kısmında zamanda geriye giden elektron arasında açık bir benzerlik vardır. İki durumda da üç doğru kısım ve iki köşeyle bir zikzak çizgi vardır. Fark sadece, ikinci örnekteki köşelerin ilkine göre daha keskin oluşlarıdır. İki zikzak çizimin de aynı tür olayı gösterdiği ilk kez John Wheeler'ın içine doğmuştu, fakat iki durumun da matematiksel bakımdan özdeş olduğunu Feynman ispatlamıştır.

Burada özümsenecek dünya kadar şey var, ilk bakışta görünen de daha çok. O yüzden gelin yavaş yavaş, parça parça alalım.

Önce fotonun kendi karşı-parçacığı olduğunu o yüzden foton yollarından okları kaldırabileceğimizi söylemiştim. Zamanda ileri giden bir foton zamanda geriye giden bir karşı-fotonla aynıdır, fakat karşı-foton bir fotondur, o yüzden zamanda ileri giden bir fotonla zamanda geriye giden bir foton aynıdır. Bu size garip gelmiş miydi? Gelmiş olması gerekir. Her şey bir yana, uyarılmış durumda enerji yayan ve temel duruma düşen bir atom gördüğümüzde za-



Şekil 9.7 Richard Feynman ikili kıvrım olan bütün uzay-zaman diyagramlarının matematiksel olarak birbirlerine eşdeğer olduğunu kanıtlamıştır.

manda geriye yolculuk eden elektromanyetik enerjinin atoma ulaşıp bu değişimi gerçekleştirdiğini de pekâlâ söyleyebiliriz. Bunu hayal etmek biraz zordur, çünkü şu an uzayda düz bir doğrultuda hareket eden tek bir fotondan bahsetmiyoruz, sözünü ettiğimiz şey genişlemekte olan küresel elektromanyetik enerji kabuğudur, atomdan çıkarak her yönde etrafa yayılan ve yol alırken saptırılıp dağılan bir dalga cephesidir. Bu resmi tersine çevirmek, seçtiğimiz atom üzerinde odaklanmış, birlikte işleyen ve o belli atomun üzerinde bir noktada birleşen bir dizi saçılma süreci sonucu evren tarafından yaratılan kusursuz küre biçimindeki dalga cephesini içeren bir evren meydana getirir.

Bu düşünce tarzının derinlerine girmek istemiyorum, çünkü bu bizi kuantum kuramından alıp kozmolojiye götürür. Fakat bu fikir bizim zamanı anlayışımız ve zamanı neden tek yönde akıyor gibi gördüğümüz konusunda derin imaları içermektedir. Çok basit olarak, bir atomun şimdi yaydığı ışıma daha sonra başka atomlar tarafından soğurulacaktır. Bu ancak öteki atomların çoğu temel durumlarında olduğu için mümkün olabilir, bunun anlamı da evrenin geleceğinin soğuk olduğudur. Zaman oku olarak gördüğümüz asimetri, evrenin soğuk ve sıcak dönemlerinin asimetrisidir. Eğer evren genişliyorsa soğuk bir gelecek için gerekli soğurmayı ayarlamak daha kolaydır çünkü genişlemenin kendisi soğutma etkisi yaratır ve biz de genişleyen bir evrende yaşıyoruz. Zamanın bizim gördüğümüz doğası bu yüzden genişleyen evrenin doğasıyla sıkı sıkıya bağlı olabilir.[52]

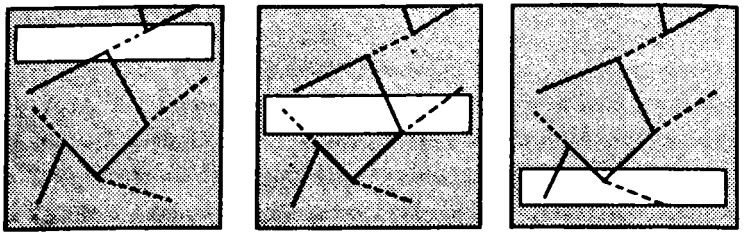
52. Bu fikirler daha ayrıntılı fakat daha açık, matematiksel olmayan bir dille Jayant Narlikar'ın şu kitabında tartışılıyor: *The Structure of the Universe*, Oxford University Press, 1977. Paul Davies'in *Space and Time in the Modern Universe* (Cambridge University Press, 1977) eseri daha da ayrıntıya giriyor ve konunun matematiksel kısmından bazı şeyler de J. N. Islam'ın *The Ultimate Fate of the Universe* (Cambridge University Press, 1983) kitabında bulunabilir.

EINSTEIN'IN ZAMANI

Fakat fotonun kendisi zaman oku olarak neyi "görüyor"? Görelilik kuramından, hareket eden saatlerin yavaş işlediğini öğreniyoruz ve ışık hızına yaklaştıkça daha da yavaşladığını. Gerçekten de ışık *hızındayken* zaman akmaz, saat durur. Bir foton doğal olarak ışık hızında hareket eder, bunun anlamı da foton için zamanın bir anlamının olmamasıdır. Uzaktaki bir yıldızdan yola çıkan ve yeryüzüne ulaşan bir foton dünyadaki saatlerle ölçüldüğünde yolda binlerce yıl geçirebilir, fakat foton açısından bu yolculuk hiç zaman almaz. Kozmik ışıma geçmişi olan bir foton, bizim bakış açımızla, belki de evrenin başladığı 15 milyar yıl önceki Büyük Patlama'dan beri yolculuk ediyor olabilir, fakat fotonun kendisi için Büyük Patlama ve bizim şu anımız aynı zamandır. Feynman diyagramında fotonun yol çizgisi üstünde herhangi bir ok yoktur, bunun nedeni fotonun sadece kendi karşı-parçacığı olması değil, aynı zamanda zaman içindeki hareketin foton için bir anlamı olmamasındandır – zaten *bu yüzden* kendi karşı-parçacığıdır.

Doğu felsefesiyle modern fiziği bağdaştırmaya çalışan mistikler ve popüler bilim yazarları bu noktayı, yani evrendeki her şeyin, geçmişin, bugünün ve geleceğin her şeyi aynı anda "gören" bir elektromanyetik ışıma ağıyla başka her şeye bağlı olduğunu ıskalamışa benziyorlar. Elbette fotonlar yaratılabilir ve yok edilebilir, yani bu ağ tamamlanmış değil. Fakat gerçek o ki, bir fotonun uzay-zamandaki yol izi benim gözümü belki Kutup Yıldızı'yla bağlıyor. Yıldızdan benim gözüme giden bir yol izini gören gerçek bir zaman hareketi söz konusu değil; bu sadece benim açımdan geçerli olan bir algı. Başka ve aynı şekilde geçerli bir bakış açısı da o yol izini, evrenin etrafında değiştiği ebedi bir özellik olarak görür ve evrendeki bu değişiklikler sırasında meydana gelen şeylerden birisi de benim gözümün ve Kutup Yıldızı'nın tesadüfen yol izinin zıt uçlarında bulunmasıdır.

Feynman diyagramındaki öteki parçacık izlerinde durum nedir?



Şekil 9.8 Eğer bütün parçacık izleri bir şekilde uzay-zamanda sabitlenmiş olsa algılamamız "şimdi"den (sağdaki resim) zaman içinde ileriye ve sayfadan yukarıya giderken bir hareket ve etkileşimler yanılsaması görebiliriz. Parçacıkların dansı acaba bizim zaman akışını algılayışımızın sebep olduğu bir yanılsamadan mı ibaret?

Onlar ne kadar "gerçek"tir? Onlar hakkında da aynı şeyleri söyleyebiliriz. Bütün uzay ve zamanı içine alan bir Feynman diyagramı düşünün, üzerinde her parçacığın izi sergilenmiş olsun. Şimdi de o diyagramı ancak dar bir yarıktan görebildiğimizi ve bu yüzden sadece sınırlı bir zaman dilimini tarayabildiğimizi hayal edin ve bu yarığı düzenli bir şekilde sayfadan yukarı hareket ettirin. Bu yarıktan etkileşim içindeki parçacıkların karmaşık bir dansını görürüz, çiftlerin oluşması, karşılaşınca yok oluşları ve daha da karmaşık olaylar, hiç durmadan değişen bir panorama. Tek yaptığımız uzay ve zamanda sabitlenmiş bir şeyi taramaktır. Değişen bizim algılayışımızdır, altta yatan gerçeklik değil. Çünkü biz düzenli bir şekilde hareket eden izleme yarığına mahkûm edilmiş durumda olduğumuzdan zamanda geri giden elektron yerine ileri giden bir pozitron görürüz, fakat iki yorum da eşit ölçüde gerçektir. John Wheeler daha da ileri giderek evrendeki *bütün* elektronları uzay zaman içinde ileri ve geri son derece karmaşık bir zikzak oluşturacak etkileşimlerle birbirine bağlanmış şekilde görebileceğimizi söylemiştir. Bu Feynman'ı nihai çalışmasına götüren ilk ilham fışkırmasının bir parçasıydı – "zamanın dokuma tezgâhında belki de dünyadaki bütün elektron ve pozitronları içeren gösterişli bir halıyı dokumak için bir ileri bir geri, bir ileri bir geri, bir ileri bir geri gidip gelen tek bir

elektron" imgesi.[53] Böyle bir tabloda evrende her yerdeki her elektron sadece tek bir evren hattının farklı bir diliminden ibaret olurdu, tek "gerçek" elektronun evren hattı.

Bu fikir bizim evrenimizde işe yaramaz. İşe yaraması için evren hattında ileriye giden dilim –elektron– sayısı kadar tersine çevrilmiş evren hattı dilimleri, yani pozitron bulmanız gerekir. Sadece bizim görüşümüzün değiştiği sabit bir gerçeklik fikri de muhtemelen bu basit seviyede bile işlemeyecektir – belirsizlik ilkesiyle nasıl bağdaşabilir ki bu?[54] Fakat bu fikirler bir arada, zamanın doğasına ilişkin bizim gündelik tecrübelerimizin sağladığından çok daha iyi bir kavrayışı temsil eder. Gündelik hayattaki zaman akışı istatistiksel bir etkidir, büyük ölçüde evrenin daha sıcak bir durumdan daha soğuk bir duruma genişlemesinden kaynaklanmaktadır. Fakat o seviyede bile görelilik denklemleri zaman yolculuğuna izin verir ve bu kavram uzay-zaman diyagramlarıyla çok kolay anlaşılabilir.[55]

Uzaydaki hareket herhangi bir yönde ilerleyebilir ve geri dönebilir. Zamandaki hareket gündelik hayatta, parçacık düzeyinde her ne olursa olsun, sadece tek bir yönde ilerleyebilir. Uzay-zamanın birbirlerine dik açıyla bağlı dört boyutunu gözümüzde canlandırmak zordur, fakat bir boyutu çıkarıp bizim alışık olduğumuz üç boyuttan birine uyguladığımızda bu katı kuralın ne anlama geleceğine bir bakalım. Adeta ya yukarı ya aşağı, ya ileri ya geri hareket etmemize izin verilmiş gibidir, yana hareket sola ayak sürümeyle sınırlıdır. Sağa hareket yasaktır. Eğer bu ana kuralı bir çocuk oyununda uygulasak ve bir çocuğa sağdaki bir ödüle ulaşmanın ("zamanda

53. Wheeler'ın kendi tasavvuruna dair açıklamasını aktaran Banesh Hoffmann, *The Strange Story of the Quantum*, Pelican basımı, 1963, s. 217.

54. Feynman aslında benim bu basit açıklamada gösterdiğimden çok daha ileri gitmiş ve olasılıkları da içeren bir evren hattı izahı geliştirip bu sayede yeni bir kuantum mekaniği versiyonu ortaya çıkarmıştır. Yarattığı sonuçlar bakımından kuramın ilk versiyonlarıyla tamamen denk olduğu Freeman Dyson tarafından gösterilmiş olan bu versiyonun çok daha güçlü bir matematik aracı olduğu daha sonraki gelişmelerle açıkça ortaya çıkmıştır. Dahası sonra.

55. Kuantum kuramının evreni anlayışımızla ilgili içerimleri ve zaman yolculuğuyla ilgili içerimleri *Spacewarps* (Delacorte, New York; ve Pelican, Londra, 1983) adlı kitabımda daha ayrıntılı ele alınıyor.

geriye gitmenin") yolunu bulmasını söylesek çocuğun bu kapandan çıkış yolunu bulması uzun sürmezdi. Ödülün başınıza göre "yukarı" konuma geleceği şekilde yere uzanın. Şimdi ödülü almak için "yukarı," önceki konumunuza dönmek için "aşağı" hareket edebilirsiniz, sonra da ayağa kalkıp seyredenlerinki gibi kişisel uzay konumunuza geçersiniz.[56] Görelilik kuramının izin verdiği zaman yolculuğu tekniği buna çok benzer. Bu teknik, uzay-zaman dokusunu, yerel bir uzay-zaman bölgesindeki zaman ekseninin, uzay-zamanın bükülmemiş bölgesindeki üç uzay yönünden birine denk bir yöne işaret edecek şekilde bozmayı içerir. Öteki uzay yönlerinden biri zamanın rolünü üstlenir; böyle bir araç zaman ile uzayı değiştirerek zaman yolculuğunu ileriye ve geriye olmak üzere gerçek kılardı.

Amerikalı matematikçi Frank Tipler böyle bir hilenin kuramsal olarak mümkün olduğunu ispatlayan hesaplamaları yapmıştır. Uzay-zaman güçlü kütle çekim alanlarıyla bükülebilir, Tipler'ın hayali zaman makinesi 100 km uzunluğunda ve 10 km yarıçapındaki bir hacimde güneşin kütlesini içeren ve bir atomun çekirdeği kadar yoğun olan devasa bir silindirden ibarettir. Her milisaniyede iki tur atar ve uzay zaman dokusunu da etrafında sürükler. Silindirin yüzeyi yarım ışık hızında hareket eder. Bu tabii zırdeli mucidin bile arka bahçesinde yapmayı deneyeceği bir şey değildir, fakat mesele bunun bildiğimiz bütün fizik yasalarınca mümkün olduğudur. Evrenimizde güneşimizin kütlesinde, bir atom çekirdeği yoğunluğunda ve 1.5 milisaniyede bir kere dönen (yani Tipler'ın makinesinden sadece üç kat daha yavaş) bir nesne var bile zaten. Bu 1982'de keşfedilmiş "milisaniye atarcası" denen şeydir. Bu nesnenin silindirik olması pek muhtemel değil – böylesine aşırı hızlı bir dönüş onu mutlaka yamyassı etmiştir. Öyle bile olsa onun çevresinde çok tuhaf uzay-zaman bükülmeleri olmuştur. "Gerçek" zaman yolculuğu imkânsız olmayabilir, sadece son derece zordur ve hiç ama hiç muh-

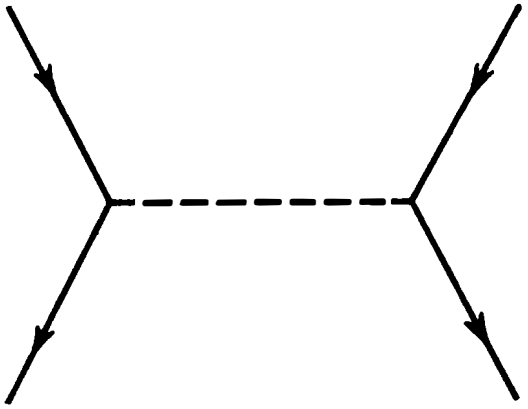
56. Bunu birkaç çocukta ve yetişkinde ayrı ayrı denedim. Çocukların yaklaşık yarısı numarayı anladı, ama yetişkinlerin çok azı bulabildi. Numarayı anlayamayanlar hileden şikâyetçi oldular; mesele şu ki Einstein'ın denklemlerine göre doğanın kendisi de bu tür hilelere tenezzül ediyor.

temel görünmemektedir. Fakat, belki de koskoca bir buzdağının tepesi olan bu şey, kuantum seviyesindeki zaman yolculuğunun normalliğini biraz daha kabul edilir hale getirebilir. Kuantum kuramı da görelilik kuramı da şu ya da bu şekilde bir zaman yolculuğuna izin verir. Her iki kuramın kabul edeceği her şeyin de, ne kadar paradoksal görünürse görünsün, ciddiye alınması gerekir. Zaman yolculuğu aslında parçacık dünyasının daha garip özelliklerinden bazılarının önemli bir parçasıdır. Burada, eğer çabuk davranırsanız, yoktan bir şey bile elde edebilirsiniz.

YOKTAN BİR ŞEY

1935'te, o zamanlar Osaka Üniversitesi'nde yirmi sekiz yaşındaki bir fizik hocası olan Hideki Yukawa bir atom çekirdeğindeki nötron ve protonların, elektrik kuvvetiyle çekirdeği ayırıp parçalayacak pozitif yüke rağmen bir arada tutulmasına bir açıklama önerdi. Belli ki doğru şartlarda elektrik kuvvetine baskın gelen başka, daha güçlü bir kuvvet olmalıydı. Elektrik kuvveti fotonla taşınır, o yüzden bu güçlü çekirdek kuvvetini aynı zamanda bir parçacık taşımalıdır, diye akıl yürütüyordu Yukawa. Bu parçacık kuantum kurallarını çekirdeğe uygulayınca "mezon" (elektronla protonun arasında bir yerde olması gerekir, ismini buradan alıyor) diye bilinir oldu. Mezonlar foton gibi bozondurlar, fakat sıfır değil tek birim spin'leri vardır; fotonların aksine çok kısa ömürleri vardır, işte o yüzden çekirdeğin dışarısında sadece özel şartlarda görülürler. Daha sonra bir mezon ailesi bulundu, tam Yukawa'nın öngördüğü biçimde olmasa da, güçlü çekirdek kuvvetinin taşıyıcıları olarak çekirdek parçacıklarının mezon alışverişinde bulundukları fikrinin elektrik kuvvetinin taşıyıcıları olarak foton alışverişine benzerliği bakımından, tahmin edilene yeterince yakındı; Yukawa bunun sonucu olarak 1949'da Nobel Fizik Ödülü'nü almıştır.

Çekirdek kuvvetlerinin elektrik kuvvetleri gibi parçacıklar arası etkileşim olarak düşünülebileceğinin bu şekilde doğrulanması fi-

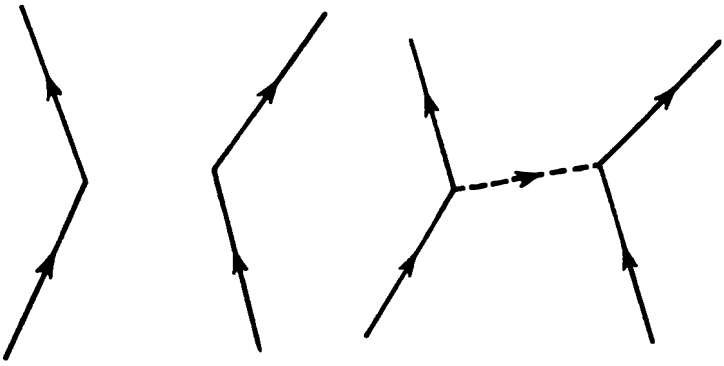


Şekil 9.9 Bir Feynman diyagramında iki parçacık aralarında üçüncü bir parçacık alışverişi yaparak etkileşime giriyor. Bu örnekte bir foton alışverişinde bulunup birbirlerini iten iki elektron olabilir.

zikçilerin bugünkü dünya görüşünde bir köşe taşıdır. Bütün kuvvetler artık etkileşim olarak görülmektedir.

Fakat etkileşimleri taşıyan parçacıklar nereden geliyor? Hiçbir yerden gelmiyor, belirsizlik ilkesiyle uyumlu olarak yoktan bir şey çıkıyor.

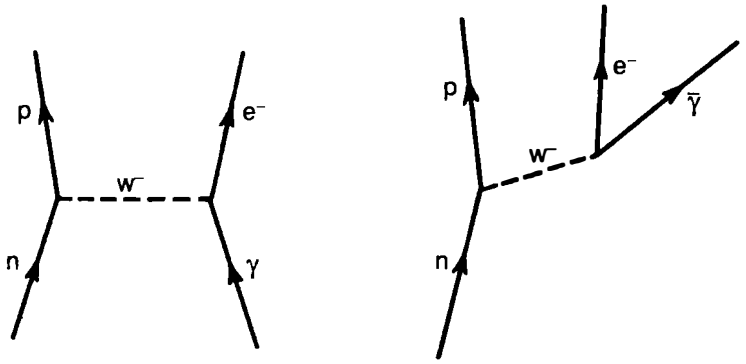
Belirsizlik ilkesi konum/momentumda olduğu gibi tamamlayıcı özellikler olan zaman ve enerjide de geçerlidir. Parçacık seviyesindeki bir olayda yer alan enerji hakkında ne kadar az belirsizlik varsa olayın zamanı hakkında o kadar çok belirsizlik vardır, ya da tam tersi. Elektron tek başına bulunmaz, çünkü belirsizlik ilişkisinden yeterince kısa bir süre enerji ödünç alabilir ve bunu bir foton yaratmada kullanabilir. Buradaki sorun şu ki foton yaratılır yaratılmaz genel olarak dünya, enerjinin korunumunun ihlal edildiğini "fark etmeden" önce elektron tarafından yeniden soğurulması gerekir. Fotonlar saniyenin çok minik bir kesrinde, 10^{-15} saniyeden daha az bir sürede var olurlar, fakat elektronların çevresinde sürekli bir var olup bir yok olurlar. Sanki her elektronun etrafı bir "sanal" foton bulutu tarafından çevrili gibidir, dışarıdan küçük bir dürtme,



Şekil 9.10 Eski "uzaktan etki" fikrinin (solda) yerini kuvvet taşıyıcısı parçacıklar fikri aldı.

küçük bir enerji onların kaçıp gerçek olmasına yeter. Bir atomda uyarılmış bir durumdan daha düşük bir duruma hareket eden bir elektron fazla enerjisini sanal fotonlarından birine verip uçup gitmesini sağlar; enerji soğuran bir elektron serbest bir fotonu kapar. Aynı tür süreç çekirdeği bir arada tutan tutkalı sağlar.

Kabaca söylersek madde ve enerji birbirinin yerini alabildiğinden bir kuvvetin "erimi" tutkalı sağlayan parçacığın ya da birden fazla parçacık varsa en hafif parçacığın kütlesiyle ters orantılıdır. Fotonların hiç kütlesi olmadığı için elektromanyetik kuvvetin erimi yüklü bir parçacıktan sonsuz mesafe uzakta son derece küçük kalsa da kuramsal olarak sonsuzdur. Yukawa'nın varsaydığı mezonların güçlü çekirdek kuvvetiyle verilmiş öyle minik bir erimi vardı ki elektronun 200 ila 300 katı büyüklükte kütleleri olması gerekiyordu. Parçacıklar söz konusu olduğunda mezonlar devasadır. Güçlü çekirdek etkileşiminde bulunan belli mezonlar 1946'da kozmik ışımada bulunmuştur ve bunlara pi mezon ya da piyon denmiştir. Yüksüz piyonun elektronun 264 katı kütlesi vardır ve hem pozitif hem negatif piyonun ağırlığı 273 elektron kütlesi kadar gelir. Yuvarlak hesaba göre bir protonun kütlesinin yedide birine sahiptirler. Yine de iki proton çekirdekte sürekli, protonun ağırlığının çok küçük bir



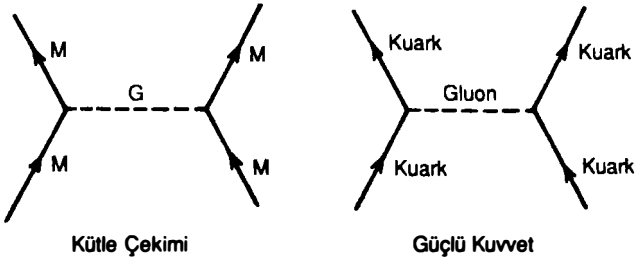
Şekil 9.11 Aynı parçacık etkileşimine iki farklı bakış – gelen bir nötrinoyu giden bir karşı-nötrinoya dönüştürün. Bu bir nötronun bir proton, elektron ve nötrinoya dönüştürüldüğü beta-bozunma sürecidir.

parçasına sahip piyonların değiş tokuşu yoluyla bir arada tutulurlar ve protonlar bunda kütle de kaybetmezler. Bunun mümkün olması tamamen protonların belirsizlik ilkesinden istifade edebilmelerindendir.

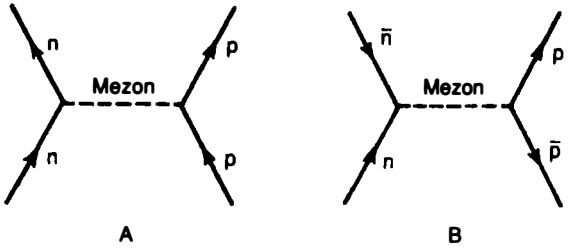
Bir piyon yaratılır, başka bir protona gider ve evrenin "bakmadığı" anda izin verilen belirsizlikte bir anda ortadan kaybolur. Protonlar ve nötronlar –nükleonlar– sadece birbirlerine çok yakınken, hatta biraz uygunsuz kaçacak ama gündelik dille söylersek birbirlerine "dokunurken" mezon alışverişinde bulunabilirler. Aksi halde sanal piyonlar belirsizlik ilkesinin izin verdiği süre içinde o arayı atlayamazlar. İşte bu model güçlü çekirdek etkileşiminin çekirdek dışındaki nükleonlar üzerinde neden hiçbir etkisi olmayıp da çekirdek içindeki nükleonlar üzerinde çok güçlü bir etkisi olduğunu gayet güzel açıklamaktadır.[57]

57. Aslında Yukawa hesaplarını öbür türlü yapmıştı. Güçlü çekirdek kuvvetinin erimini biliyor olması nükleon etkileşimlerinde söz konusu olan belirsizlik süresine sınır koymasını sağladı. Bu da etkileşimi taşıyan (ya da aracılık eden) parçacıkların enerjisi ya da kütlesi hakkında ona kabaca bir fikir vermiştir.

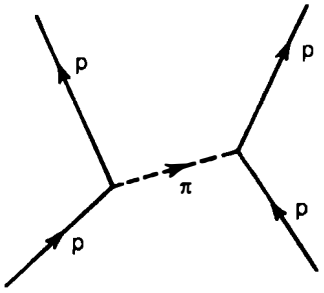
Demek ki bir proton bir elektrondan daha fazla kendi etkinlik bulutunun merkezidir. Serbest bir proton uzayda (ve zamanda) yoluna devam ederken hem sanal fotonları hem de sanal mezonları durmadan yayar ve yeniden soğurur. Bu fenomene bir açıdan daha bakılabilir. Sadece bir piyon yayan ve onu tekrar soğuran tek bir protonu düşünün. Basit. Fakat bir de buna başka türlü bakalım. Önce bir proton vardır; sonra bir protonla bir piyon; sonra yine bir proton. Protonlar birbirinden ayırt edilemeyen parçacıklar olduğundan,



Şekil 9.12 Temel kuvvetlerin hepsi parçacık alışverişiyle gösterilebilir. Bu örneklerde iki devasa parçacık (M) bir graviton (G) alışverişiyle etkileşime giriyor ve iki kuark da bir gluon alışverişiyle etkileşime giriyor.



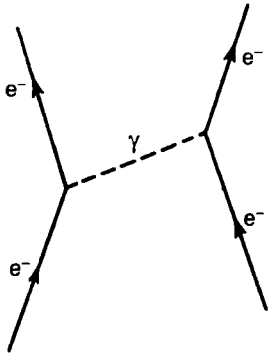
Şekil 9.13 Her zaman olduğu gibi bu diyagramlarda zamanın yönü keyfi biçimde seçilmiştir. A örneğinde sayfadan yukarı hareket eden bir nötron ve bir proton bir mezon alışverişiyle etkileşime girerler. B örneğinde soldan sağa hareket eden bir nötronla karşı-nötron karşılaşıp birbirlerini yok ederek bir mezon üretirler, o da bozunup bir proton/karşı-proton çifti üretir. Bu gibi "çapraz tepkimeler" kuvvet ve parçacık kavramlarının nasıl ayırt edilemez hale geldiğini gösterir.



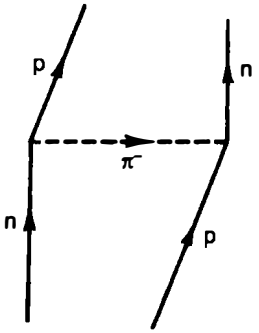
Şekil 9.14 İki proton bir piyon alışverişiyle birbirlerini itiyor.

ilk protonun *kaybolup* kütle enerjisini bıraktığını ve biraz da belirsizlik ilkesinden borç alıp bir piyonla yeni bir proton yarattığını söyleme hakkımız var. Hemen akabinde bu iki parçacık birbiriyle çarpışıp yok olurlar ve bu süreçte üçüncü bir proton yaratıp evrenin enerji dengesini önceki haline getirirler. Peki burada niye dursun? Neden ilk baştaki protonumuz enerjisini bırakıp, biraz enerji daha ekleyip bir *nötronla* pozitif yüklü bir piyon yaratmasın? Yaratabilir. O zaman neden bir proton bu pozitif yüklü piyonu bir nötronla değiştirip kendisi nötron, nötron da proton "olmuyor"? O da mümkün, nötronları protonlara ve negatif yüklü piyonlara "dönüştürme"yi içeren tersi süreçlerin mümkün olması gibi.

Artık işler sarpa sarmaya başladı, çünkü burada durmak için de bir sebep yok. Benzer şekilde bir piyon tek başına kısa süreliğine bir nötron ve karşı-protona dönüşüp tekrar normale dönebilir, hatta bu, kendisi Feynman'ın proton ya da nötron çiziminin bir parçası olan sanal piyonun da başına gelebilir. Kendi yolunda sessiz sakin ilerleyen bir proton patlayarak vızıldayıp duran sanal parçacıklar ağına dönüşebilir ve bu parçacıkların hepsi birbiriyle etkileşip tekrar protona dönüşebilir; bütün parçacıklar Fritjof Capra'nın "kozmik dans" dediği şeye katılan başka parçacıkların bir terkibi olarak görülebilir. Ve yine hikâye burada bitmiyor. Şu ana kadar azıcık verip çok aldığımız olduysa da yoktan bir şey elde etmedik. Şimdi gelin biraz uç noktalara gidelim.

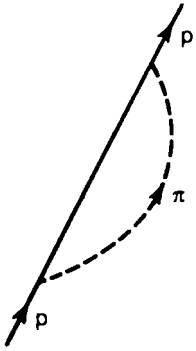


Şekil 9.15 İki elektron bir foton alışverişiyle etkileşime giriyor.

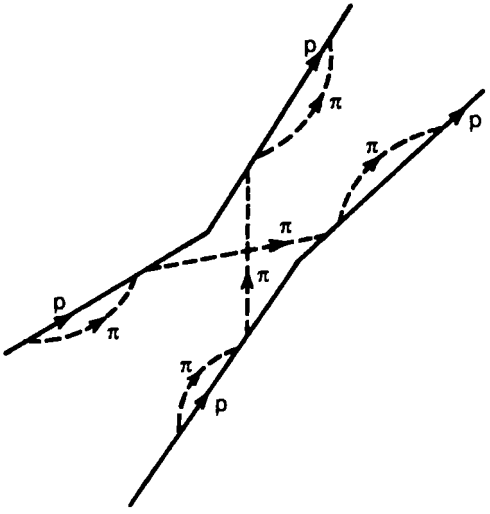


Şekil 9.16 Yüklü bir piyonun yardımıyla bir nötron, nötrona dönüşen bir protonla etkileşime girerek bir protona dönüşür.

Yeterince kısa süreliğine bir parçacığa verilebilen enerji konusunda içkin bir belirsizlik varsa, o zaman bir parçacığın yeterince kısa süreliğine var olup olmadığı konusunda da içkin bir belirsizlik olduğunu söyleyebiliriz. Elektrik yükünün korunumu, parçacık ve karşı-parçacık dengesi gibi belli kurallara uyulması şartıyla koskoca bir grup parçacığın hiç yoktan ortaya çıkıp birbirleriyle yeniden birleşerek bütün bir evren buradaki uyumsuzluğu fark etmeden önce ortadan kaybolmalarına engel olacak hiçbir şey yok. Bir elektron



Şekil 9.17 Bir proton da "sanal" bir piyon yaratabilir, yeter ki çabucak yeniden soğurulsun.



Şekil 9.18 Piyon alışverişiyle iki protonun birbirini itmesi, Şekil 9.14'te göründüğünden daha karmaşıktır.

ve pozitron tamamen yoktan var olabilir, yeter ki yeterince çabuk ortadan kaybolsunlar; protonla karşı-proton da aynı şeyi yapabilirler. Tamı tamına söylemek gerekirse gerekli "saçılımı" sağlamak için elektronlar bu hileyi ancak bir fotonun yardımıyla, protonlar da bir mezonun yardımıyla yapabilir. Var olmayan bir foton, bir pozitron/elektron çifti yaratır, bu çift de daha sonra birbiriyle birleşip yok olarak onları ilk başta yaratmış olan fotonu üretir – hatırlayın, foton gelecekle geçmiş arasındaki farkı bilmez. Ya da bir elektron bir zaman girdabı içinde kendi kuyruğunun peşindeymiş gibi de düşünülebilir. Önce ortaya çıkar, bir tavşanın sihirbazın şapkasından çıkması gibi boşluktan çıkar gelir, sonra zaman içinde ileriye yolculuk eder ta ki kendi hatasını fark edip, kendi gerçekdışılığını anlayana kadar, sonra geldiği yere gitmek için geri döner, zamanda geriye, başladığı noktaya. Orada yine yön değiştirir ve bu şekilde her iki "uç"ta bir foton etkileşimi –yüksek enerji saçılımı olayı– yardımıyla bu döngü devam eder.

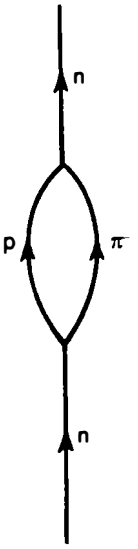
En iyi parçacık davranışı kuramlarımıza göre boşluk kendi başına, fokurdayan bir sanal parçacıklar kütlesidir, burada mevcut hiçbir "gerçek" parçacık olmasa bile. Bu yaptığımızda öyle denklemlerle oynama gibi şeyler söz konusu değil, zira bu boşluk dalgalanmalarının etkisine yer vermeden birbiriyle saçılan parçacıkları içeren problemlere doğru cevaplar alamayız. Bu, kuramın –hatırlayın, doğrudan belirsizlik ilişkilerine dayalıdır– doğru olduğuna dair güçlü bir kanıttır. Sanal parçacıklar ve boşluk dalgalanmaları kuantum kuramının geri kalan kısmı kadar gerçektir – dalga/parçacık ikiliği, belirsizlik ilkesi ve uzaktan etki kadar gerçek. Böyle bir dünyada Schrödinger'in kedisi muammasını paradoks diye anmak pek adil olmaz.

SCHRÖDİNGER'İN KEDİSİ

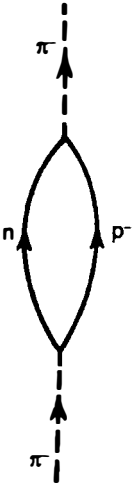
Ünlü kedi paradoksu basılı olarak ilk kez 1935'te, EPR yazısıyla aynı yılda çıktı (*Naturwissenschaften*, cilt 23, s. 812). Einstein Schrödinger'in önerisini maddenin dalga temsilinin, gerçekliğin tamamlanmamış bir temsili olduğunu göstermenin "en şık" yolu olarak görüyordu[58] ve EPR teziyle birlikte kedi paradoksu bugün de kuantum kuramında tartışılmaktadır. Ne var ki EPR tezinin aksine herkesi memnun edecek şekilde çözüme kavuşturulmamıştır.

Fakat bu düşünce deneyinin ardındaki fikir gayet basittir. Schrödinger bir kutunun içinde bir radyoaktif kaynak, radyoaktif parçacıkların varlığını kaydeden bir detektör (belki bir Geiger cihazı), siyanür gibi bir zehir taşıyan cam bir şişe ve canlı bir kedi hayal etmemizi istiyordu. Kutu içindeki düzenek öyle ayarlanmıştır ki, radyoaktif maddenin içindeki atomlardan birinin bozunup da detektörün bir parçacık kaydetme olasılığının sadece yüzde elli olmasına yetecek süre içinde bu detektör açık durur. Eğer detektör böyle bir olayı tespit ederse o zaman cam kap kırılır ve kedi ölür; aksi halde kedi yaşar. Bizim kutuyu açıp içine bakmadan bu deneyin sonucunun ne olduğunu bilme imkânımız yoktur; radyoaktif bozunma tamamen tesadüfen oluşur ve istatistiksel değerler dışında önceden bilinemez. Katı Kopenhag yorumuna göre, tıpkı iki delik deneyinde elektronun her bir delikten geçme olasılığının eşit olması ve üst üste binen bu iki olasılığın üst üste binen durumlar yaratması gibi, bu durumda da, radyoaktif bozunmanın olması ve radyoaktif bozunmanın olmaması şeklindeki eşit olasılıkların üst üste binmiş durumlar yaratması gerekir. Bütün deney, kedi ve diğer her şey, bizim deneye bakacağımız zamana kadar bu üst üste binmenin "gerçek" olduğu kuralıyla yönetilmektedir ve sadece gözlem anında dalga fonksiyonu çökerek iki durumdan birine geçer. Biz bakmadan önce

58. Mesela Schrödinger'in *Letters on Wave Mechanics* kitabındaki 16-18 no.lu mektuplara bakabilirsiniz.



Şekil 9.19 Bir nötron çok kısa süreliğine bir proton ile yüklü bir piyona dönüşebilir, yeter ki bu ikisi hemen tekrar geri dönsünler.

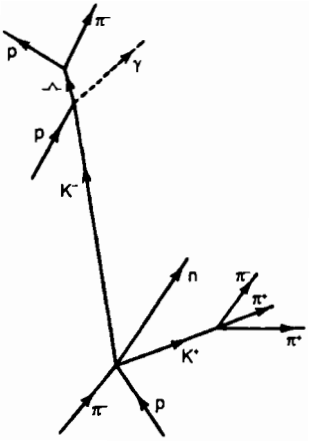


Şekil 9.20 Bir piyon da benzer kısalıktaki bir süre için sanal bir nötron/karşı-nötron çifti yaratabilir.

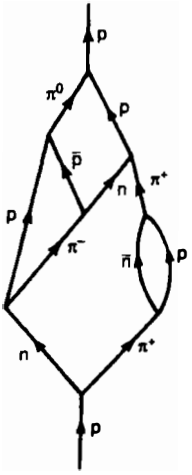
içeride hem bozunmuş hem bozunmamış radyoaktif madde, ne kırılmış ne de kırılmamış olan bir şişe zehir ve hem ölü hem canlı, ne canlı ne de ölü olan bir kedi bulunmaktadır.

Elektron gibi bir temel parçacığın ne burada ne orada olduğunu, bir tür üst üste binmiş durumlarda olduğunu hayal etmek yeterince zor, fakat kedi gibi bildik bir şeyi canlı olup olmadığı belirsiz vaziyette hayal etmek çok daha zor. Schrödinger bu deneyi katı Kopenhag yorumunda bir kusur olduğunu göstermek için düşünmüştü, zira kedinin aynı zamanda hem ölü hem de canlı olamayacağı barizdir. Peki bu elektronun aynı zamanda hem bir parçacık hem de bir dalga olamayacağı "gerçeği"nden daha mı "barizdir"? Sağduyunun kuantum gerçekliğine kılavuzluk edip edemeyeceği önceden sınanmış ve yetersiz kaldığı ispatlanmıştı. Kuantum dünyasında emin olduğumuz tek şey sağduyumuza güvenmemek ve sadece doğrudan gördüğümüz ya da aletlerimizle net bir şekilde tespit ettiğimiz şeylere inanmak gerektiğidir. Bir kutunun içinde ne olduğunu içine bakmadıkça *bilmeyiz.*

Kutudaki kedi tartışmaları elli yıl sürdü. Bir düşünce ekolüne göre burada bir sorun yoktur çünkü kedi canlı mı ölü mü olduğuna kendi gayet iyi karar verebilir ve kedinin bu bilinci dalga fonksiyonunun çöküşünü tetiklemeye yeterlidir. O durumda sınırı nereye çekiyorsunuz? Bir karınca ya da bakteri neler olup bittiğinin farkında olacak mıdır? Öbür tarafa hareket edersek, ne de olsa bu bir düşünce deneyi, kutunun içindeki kedinin yerini bir insanın aldığını hayal edebiliriz (bu gönüllüye bazen kutudaki-kedi deneyi çeşitlemeleri üzerine derin derin düşünmüş bir fizikçi olan Eugene Wigner'e istinaden "Wigner'in arkadaşı" deniyor, bu arada kendisi de Dirac'ın kayınbiraderiydi). Kutunun insan sakini tabii ki dalga fonksiyonlarını çökertmeye muktedir, yetkin bir gözlemcidir. Onu hâlâ sağ bulacak kadar şanslı olduğumuzu varsayarak kutuyu açtığımızda bize herhangi bir mistik tecrübeden bahsetmeyeceğine emin olabiliriz, sadece radyoaktif kaynağın ayrılan süre içinde herhangi bir parçacık üretmediğini anlamış oluruz. Ne var ki yine de kutunun dışında olan bizlere içeri bakana kadar kutunun içindeki şartları tarif etmenin tek doğru yolu durumların üst üste bindiğini söylemektir.



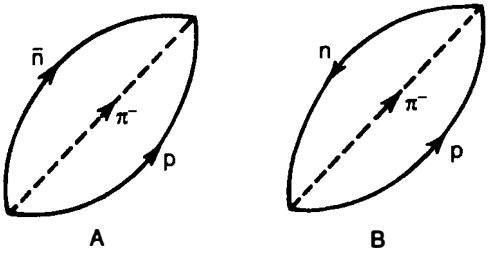
Şekil 9.21 Bir kabarcık odası fotoğrafının ortaya koyduğu çeşitli hakiki parçacıkların etkileşiminin Feynman diyagramı. Fritjof Capra tarafından *Fiziğin Taosu*'nda tarif edilmiştir.



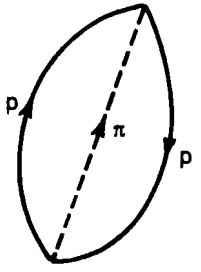
Şekil 9.22 Tek bir proton bunun gibi sanal bir etkileşim ağında yer alabilir. *The World of Elementary Particles*, K. Ford, Blaisdell, New York, 1963. Böyle etkileşimler sürekli devam eder. Hiçbir parçacık ilk bakışta sanıldığı kadar yalnızlık çekmez.

Bu zincirin sonu yoktur. Diyelim ki meraklı bir dünyaya bu deneyi önceden duyurduk, fakat basın karışmasın diye kapalı kapılar ardında gerçekleştirdik. Biz kutuyu açıp da ister arkadaşımızı selamlayalım ister cesedi dışarı çıkaralım, dışarıdaki muhabirler neler olup bittiğini bilmezler. Onlara göre bizim laboratuvarımızın bulunduğu bütün bina üst üste binmiş durumlardan ibarettir. Ve bu böyle sonsuza kadar geri gider.

Fakat diyelim ki Wigner'in arkadaşı yerine bir bilgisayar koyduk. Bilgisayar radyoaktif bozunma ya da bozunmama hakkındaki



Şekil 9.23 Bir proton, karşı proton ve piyon bir boşluk dalgalanması olarak kısa süreliğine hiç yoktan var olup tekrar yok olabilir (A). Aynı etkileşim bir protonla nötronun piyonla bağlanmış bir zaman girdabında birbirini kovaladığı bir zaman döngüsü olarak gösterilebilir (B). İki görüş de eşit ölçüde geçerlidir.



Şekil 9.24 Bir proton aynı biçimde zamanda kendi kuyruğunu kovalayabilir.

bilgiyi kaydedebilir. Bir bilgisayar dalga fonksiyonunu çökertebilir mi (en azından kutunun içinde)? Neden olmasın? Bir başka görüşe göre de önemli olan deneyin sonucunun insan tarafından, hatta canlı bir yaratık tarafından bilincine varılması değil, kuantum seviyesindeki bir olayın sonucunun kaydedilmesi ya da büyük ölçekli dünyada bir etkisinin olmasıdır. Radyoaktif atom üst üste binme durumunda olabilir, fakat Geiger cihazı bile bozunmuş ürünlere "bakar bakmaz" atom bir duruma ya da ötekine zorlanır, ister bozunmuş olsun ister bozunmamış.

O yüzden, EPR düşünce deneyinin tersine kutudaki kedi deneyinin gerçekten paradoksal imaları var. Ölü-canlı bir kedinin "gerçekliğini" kabul etmeden katı Kopenhag yorumuyla uyuşması imkânsız, bu da Wigner ve John Wheeler'ı sonsuz neden-sonuç gerilemesi [*regression*] yüzünden bütün evrenin "gerçek" varlığını sadece akıllı varlıklar tarafından gözlemlenmesine borçlu olabileceği ihtimaline yöneltmiştir. Kuantum kuramına içkin bütün olasılıkların en paradoksal olanı doğrudan Schrödinger'in kedisinden çıkar ve Wheeler'ın gecikmiş-seçim deneyi dediği şeyden fırlar gelir.

KATILIMCI EVREN

Wheeler kuantum kuramı üzerine kırk yılı aşan bir sürede pek çok farklı yerde binlerce kelime yazmıştır.[59] Kendi "katılımcı evren" kavramının belki de en açık biçimde izahı *Some Strangeness in the Proportion*'a yaptığı katkıdır – bu kitapta Einstein'ın yüzüncü doğum yılını kutlamak için düzenlenmiş bir sempozyumun tutanakla-

59. Wheeler 1911'de doğmuştu, yani 1920'lerdeki keşiflerin etkisini tam olarak gösterdiği sıralarda doğru yaştaydı. Sonraki kuşaklar kuantum kuramını hazır bir bilgelik olarak kabul etmeye ve kuantum yemek kitabını oyunun kabul edilmiş kuralları olarak kullanmaya dünden razıydılar; tutarlı bir kuramın bulunmuş olmasının verdiği rahatlık artan yaşın doğal etkileriyle birleşince önceki kuşağın öncülük dürtüsünü köreltti. Wheeler ve Feynman'ın kuşağı, her zamanki gibi bir istisna olan Einstein'la birlikte, bütün olup bitenin anlamını canhıraş bir biçimde bulmaya çalışan kuşak olmuştur kaçınılmaz olarak.

rı yer alır (yayıma hazırlayan Harry Woolf). Orada (kitabın 22. Bölümü) bir akşam yemeği davetinde bir grup insanla oynadığı eski "bil bakalım ne tuttuk" oyunuyla ilgili bir anekdot anlatır. Diğer insanların neyi tutacaklarına karar vermesi için odadan dışarı çıkma sırası ona gelince dışarıda "inanılmaz derecede uzun" bir süre bırakılır, bu da içeridekilerin çok zor bir kelime seçtiğinin ya da bir şeyler karıştırdıklarının kesin işaretidir. Dönünce ilk önce "hayvan mı?" ve "yeşil mi?" gibi sorulara her misafirden hemen cevap geldiğini fark eder, fakat oyun ilerledikçe cevapların gelmesi gitgide daha da uzamaktadır, oysa herkesin ortak seçmiş olması gereken bir nesne söz konusu olduğuna göre ve verilmesi gereken tek cevap da "evet" ya da "hayır" olduğuna göre tuhaf bir durum. Basit bir cevap vermeden önce soru sorulan kişinin neden bu kadar düşünmesi gerekmiştir? En sonunda tek soru kalınca Wheeler tahmin eder – "Bulut mu?" "Evet" cevabıyla birlikte herkes kahkahaya boğulur ve sırrı açıklarlar.

Tahmin edilecek nesnenin *kararlaştırılmaması* yönünde bir plan kurulmuş, bu plana göre herkes sorulduğunda kafasındaki gerçek bir nesneyle ilgili doğru bir cevap verecek ve tabii bu cevap *ondan önce verilmiş bütün cevaplarla tutarlı olacakmış*. Oyun ilerledikçe soru soran kişi kadar sorunun sorulduğu kişinin de işi zorlaşmış tabii.

Bunun kuantum kuramıyla ne ilgisi var? Bizim bakmadığımızda var olan gerçek dünya kavramımız gibi Wheeler bulmaya çalıştığı nesnenin gerçek bir cevabının var olduğunu düşünüyordu. Ama yoktu. Gerçek olan tek şey sorularının cevaplarıydı, aynı biçimde kuantum dünyası hakkında bildiğimiz tek şey deneylerin sonuçlarıdır. O bulut bir anlamda soru sorma süreciyle yaratılmıştır, aynı biçimde elektron da deneysel araştırmalar sonucunda yaratılmıştır. Bu hikâye kuantum kuramının, hiçbir temel fenomen kaydedilmiş bir fenomen olmadan bir fenomen değildir şeklindeki temel aksiyomunu vurgulamakta. Ve bu kayıt süreci bizim gündelik gerçeklik anlayışımıza tuhaf oyunlar oynayabilir.

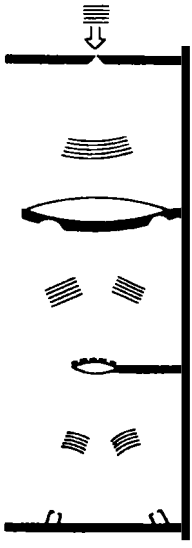
Wheeler söylediğini ispat etmek için bir başka düşünce deneyi uydurdu, iki yarık deneyinin başka bir şekliydi bu. Oyunun bu şeklinde iki yarığa, sistemden geçen ışığı odaklasın diye bir de mercek

eklenmiştir, standart perdenin yerine de iki yarıktan her birinden gelen fotonların iki yana ayrılmasına neden olabilecek başka bir mercek yerleştirilmiştir. Bir yarıktan geçen bir foton ikinci perdeden geçer ve ikinci mercekten saparak soldaki bir detektöre gider; öteki yarıktan geçen sağdaki bir detektöre gider. Bu deney düzeneğinde her bir fotonun hangi yarıktan geçtiğini biliriz; bu deneyin, fotonun geçip geçmediğini görmek için her yarığı izlediğimiz versiyonunda olduğu kadar eminizdir bundan. İşte bu durumda, düzenekten bir kerede tek bir fotonun geçmesine izin verirsek hangi yolu takip ettiğini net bir şekilde tespit ederiz ve üst üste binme durumu olmadığı için girişim de yoktur.

Şimdi düzeneği farklı biçimde ayarlayalım. İkinci merceği panjur gibi şeritler halinde ayarlanmış bir fotoğraf plakasıyla kapatalım. Bu şeritler tam karartma sağlamak için kapanabilir, böylece fotonların mercekten geçip saptırılması önlenir. Ya da şeritler açılabilir ve fotonların önceki gibi geçmeleri sağlanır. Şimdi, şeritler kapalıyken fotonlar perdeye tıpkı klasik iki delik deneyinde olduğu gibi ulaşır. Her birinin hangi delikten geçtiğini bilmemize imkân yoktur ve sanki her bireysel foton iki delikten birden geçmiş gibi bir girişim örüntüsü oluşur. İşte numara burada devreye giriyor. Bu düzenekte fotonun iki deliği geçmesinden önce şeritleri açıp açmamaya karar vermemiz gerekmiyor. Fotonun iki yarığı da geçmesini bekleyebiliriz, ondan *sonra* da tek bir delikten geçtiği bir deneyi mi yoksa "iki delikten birden" geçtiği bir deneyi mi kurmak istediğimize karar verebiliriz. Geçmiş, en azından bir foton için, bir ölçümü nasıl yapmayı tercih ettiğimize bağlıdır.

Filozoflar geçmişin hiçbir anlamı olmaması konusunda çok uzun zaman kafa yormuşlardır – geçmişin bir varlığı yoktur, tabii şimdiki zamanda kaydedilmiş hali hariç. Wheeler'ın gecikmiş-seçim deneyi, bu soyut kavramı pratikte somut bir biçimde ete kemiğe büründürmüştür. "'Foton ne yapıyor' sorusunu sormak –kaydedilene kadar– 'odada tutulan kelime ne?' sorusunu sormak kadar –soru cevap oyunu bitene kadar– anlamsızdır." (*Some Strangeness in the Proportion*, s. 358).

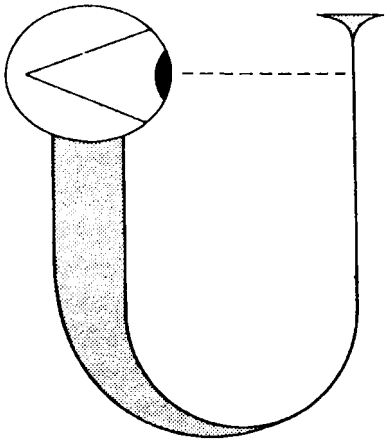
Bu kavram daha ne kadar ileri götürülebilir? Bilgisayarlarını in-



Şekil 9.25 Wheeler'ın gecikmiş-seçimli çift yarık deneyi.

şa eden ve genetik maddelerle oynayan mutlu kuantum aşçıları size bunların hepsinin felsefi spekülasyon olduğunu ve gündelik, büyük ölçekli dünyada bir anlam ifade etmediğini söyleyecektir. Fakat büyük ölçekli dünyadaki her şey kuantum kurallarına uyan parçacıklardan yapılmıştır. Gerçek dediğimiz her şey gerçek olarak değerlendirilemeyecek şeylerden yapılmıştır; "her şeyin, daha keşfedilmemiş bir şekilde, böyle milyarlarca milyarlarca gözlemci-katılımı olayının istatistikleri üzerine kurulmuş olması gerekir demekten başka elimizden ne gelir?"

Büyük sezgisel sıçramayı yapmaktan asla korkmayan Wheeler (yolunu uzay-zamanda dokuyarak giden tek elektron görüşünü hatırlayın) bütün evreni katılımcı, kendi kendini uyaran bir devre olarak düşünmeye başlamıştır. Büyük Patlama'dan başlayarak evren genişleyip soğumaktadır; milyarlarca yıl sonra evreni gözlemeye muktedir varlıklar üretir ve "gözlemci-katılımcılık eylemleri de



Şekil 9.26 Bütün evren bir gecikmiş-seçim deneyi gibi düşünülebilir. Her şeyin kökenine somut gerçekliği veren şey neler olup bittiğini fark eden gözlemcilerin varlığıdır.

–gecikmiş-seçim deneyi mekanizması aracılığıyla– evrenin sadece şimdisine değil başlangıcına da somut bir 'gerçeklik' verir". Kozmik fon ışıması fotonlarını, Büyük Patlama'nın yankısını gözlemleyerek, Büyük Patlama'yı ve evreni biz yaratıyor olabiliriz. Wheeler haklıysa Feynman iki delik deneyinin "mevcut *tek* gizemi içerdiği"ni söylediğinde hakikate sandığından da daha yakınmış.

Wheeler'ın peşinde metafizik diyarlarda dolaştık. Pek çok okurun şunu düşündüğünü tahmin edebiliyorum: Bütün bunlar farazi düşünce deneylerine dayandığı için istediğiniz oyunu oynayabilirsiniz ve hangi gerçeklik yorumunu benimsediğinizin de gerçekten hiçbir önemi yoktur. İhtiyacımız olan şey, önümüzde duran pek çok metafizik seçenekten en iyisini üzerine kuracağımız gerçek deneylerden elde edilen somut kanıtlardır. Bu somut kanıt da 1980'lerin başlarında Aspect deneyiyle sağlanmıştır – kuantum garipliğinin sadece gerçek olmayıp aynı zamanda gözlemlenebilir ve ölçülebilir olduğunun kanıtı.

Onuncu Bölüm

Tatmadan Bilinmez

Kuantum dünyasının paradoksal gerçekliğinin doğrudan deneysel kanıtı EPR düşünce deneyinin modern versiyonlarından geliyor. Modern deneyler parçacıkların konum ve momentum ölçümlerini değil, spin ve kutuplanma –ışığın bazı açılardan bir madde parçacığının spin'ine benzeyen bir özelliği– ölçümlerini içerir. Londra Birkbeck College'dan David Bohm 1952'de yeni bir EPR düşünce deneyi versiyonunda spin ölçümü fikrini ileri sürmüştü, fakat 1960'lara kadar hiç kimse böyle durumlardaki kuantum kuramı öngörülerini test edecek deneyleri yapmayı ciddi ciddi düşünmemişti. Kavramsal bakımdan çığır açacak fikir 1964'te CERN'de (Cenevre yakınlarındaki Avrupa araştırma merkezi) çalışan bir fizikçi olan John Bell'in bir yazısıyla geldi.[60] Fakat bu deneyleri anlamak için önce o önemli makaleden biraz geriye gidip "spin" ve "kutuplanma"nın ne olduğunu tam bir anlayalım.

SPİN PARADOKSU

Neyse ki bu deneylerde elektron gibi bir parçacığın spin özelliklerinin pek çoğu göz ardı edilebilir. Parçacığın bize aynı yüzünü göstermesi için iki kere "etrafında dönmesinin" bir önemi yoktur. Önemli olan bir parçacığın spin'inin uzayda aşağı ve yukarı olarak bir yön tanımlamasıdır, tıpkı dünyanın spin'inin kuzey-güney eksen

60. J. S. Bell, *Physics*, 1. cilt, s. 195, 1964.

yönünü tanımlaması gibi. Eş dağılımlı bir manyetik alanda bir elektron sadece olası iki durumdan birinde hizaya geçebilir, ya alana paralel yöndedir ya da zıt, rasgele bir seçimle buna "yukarı" ya da "aşağı" denmiştir. Bohm'un EPR tartışması üzerine yaptığı çeşitleme tekli yapı adı verilen bir konfigürasyon içinde birbirleriyle bağlanmış bir proton çiftiyle başlar. Böyle bir proton çiftinin toplam açısal momentumu daima sıfırdır, işte o zaman molekülün iki zıt yönde hareket eden iki bileşen parçacığına ayrıldığını düşünebiliriz. Bu protonların her birinin açısal momentumu ve spin'i olabilir, fakat bu çift için toplam değerin birlikteyken olduğu gibi hâlâ sıfır olabilmesi için spin miktarının eşit ve zıt olması zorunludur.[61]

Bu, kuantum kuramının da klasik mekaniğin de kabul ettiği basit bir öngörüdür. Eğer çiftlerden birinin spin'ini bilirseniz, ikisinin toplamı sıfır olduğundan ötekini de biliyorsunuz demektir. Fakat bir parçacığın spin'ini nasıl ölçersiniz? Klasik dünyada ölçüm kolay. Üç boyutlu bir dünyadaki parçacıkları ele aldığımızdan dolayı spin'in üç yönünü ölçmemiz gerekir. Üç bileşeni toplarsak (vektör aritmetiği kurallarına göre, ama oraya girmeyeceğim) toplam spin'i buluruz. Fakat kuantum dünyasında durum çok farklıdır. Bir kere, spin'in bir bileşenini ölçerek öteki bileşenleri değiştirirsiniz; spin vektörleri tamamlayıcı özelliklerdir ve konumla momentumun aynı anda ölçülemediği gibi onlar da aynı anda ölçülemez. İkinci olarak, elektron ya da proton gibi bir parçacığın spin'inin kendisi de kuantalanır. Eğer herhangi bir yöndeki spin'i ölçerseniz sadece aşağı ve yukarının cevabını alırsınız, bazen +1 ya da –1 şeklinde yazılır. Bir yöndeki spin'i ölçerseniz, buna *z* ekseni dersek, +1 cevabını alabilirsiniz (Deneyden bu sonucun çıkma olasılığı tam yarı yarıyadır). Sonra başka bir yöndeki spin'i ölçelim, mesela *y* eksenindeki olsun. Her ne cevap alırsanız alın, geri dönüp ilk baktığınız, daha önce "öğrendiğiniz" yöndeki spin'i yeniden ölçün. Bu deneyi sık tekrarlayın ve aldığınız cevaplara bakın. Parçacığı *z* yönünde ölçüp *y* yö-

61. Bu örnekte Bernard d'Espagnat'nın çok açık ve ayrıntılı Bell deneyi tarifini takip ediyorum ("The Quantum Theory and Reality", *Scientific American Offprint*, no. 3066). Fakat benim versiyonum oldukça basit hali, d'Espagnat'nın makalesinde çok daha fazla ayrıntı var.

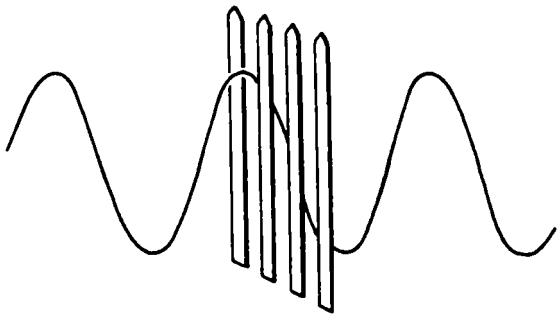
nündeki spin'i ölçmeden önce, onun "yukarı" olduğunu bilseniz de, *y* ölçümünden sonra tekrarlanan *z* ölçümlerinden sadece yarısında "yukarı" cevabı alırsınız. Tamamlayıcı spin vektörü ölçümü sizin daha önce ölçtüğünüz durumun kuantum belirsizliğini tekrar sağlamış oldu.[62]

O halde elimizdeki iki ayrılan parçacığın birinin spin'ini ölçersek ne olur? Tecrit halde ele alırsak her parçacık, parçacıklardan herhangi birinin toplam spin'inin ölçümü için yapılacak her girişimi bozacak olan spin bileşenlerindeki süregiden rasgele dalgalanmalar olarak düşünülebilir. Fakat birlikte ele alındığında iki parçacığın tamamen eşit ve zıt spin'leri olması gerekir. Bir parçacığın spin'indeki rasgele dalgalanmalar, çok uzaktaki öteki parçacığın spin bileşenlerindeki, dengeleyici, eşit ve zıt "rasgele" dalgalanmalarla eşleşmelidir. İlk EPR tartışmasındaki gibi parçacıklar birbirlerine uzaktan etkiyle bağlıdır. Einstein bu "hayaletimsi" yerbilmezliği [*nonlocality*] saçma bulup bunun kuantum kuramındaki bir kusuru ima ettiğini düşünüyordu. John Bell bu hayaletimsi yerbilmezliğin hesaplanması ve kuantum kuramının doğruluğunun ispatlanması için nasıl deneyler kurulabileceğini göstermiştir.

KUTUPLANMA BİLMECESİ

Bugüne kadar bu testi yapmak için gerçekleştirilmiş deneylerin çoğu madde parçacıklarının spin'i yerine foton kutuplanmasını içermiştir, ama ilke aynıdır. Kutuplanma bir fotonun ya da bir foton demetinin uzaydaki bir yönünü tanımlayan bir özelliktir, tıpkı spin'in bir madde parçacığının uzaydaki bir yönünü tanımlaması gibi. Polaroit güneş gözlükleri belli bir kutuplanmada olmayan bütün fotonların önünü keserek gözlüğü takan kişinin gördüğü manzarayı

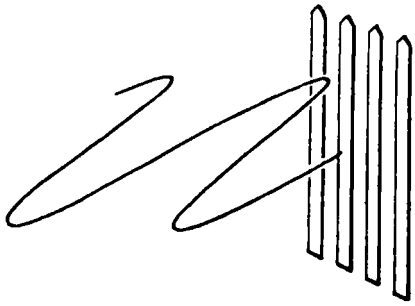
62. Belki de belirsizliğin $\hbar$ olması gerektiğini düşünüyorsunuz. Öyle de zaten. Spin'in temel birimi Dirac'ın tespit ettiği gibi 1/2 $\hbar$'dir ve bizim kısaca "+1 birim spin"den kastımız da odur. +1 birimle −1 birim arasındaki fark, artı ve eksi 1/2 $\hbar$ arasındaki farktır, ki bu da tabii ki sadece $\hbar$'dir. Fakat burada tartışılan deneylerde önemli olan tek şey spin'in *yönüdür*.



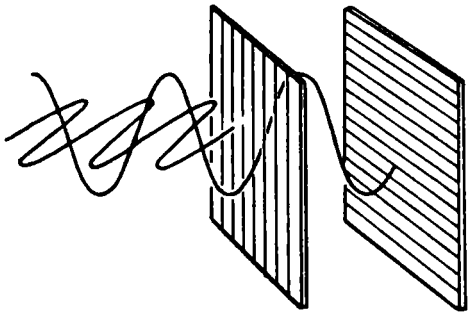
Şekil 10.1 Dikey olarak kutuplanmış dalgalar "tahta parmaklık" arasından geçerler.

daha karanlık yapar. Güneş gözlüklerini panjur gibi bir dizi yatay çıtadan yapılmış olarak düşünün, fotonları da uzun mızraklar taşıyor gibi hayal edin. Mızraklarını göğüslerinde yan tutan bütün fotonlar çıtaların arasından geçebilir ve gözlerimiz tarafından görülebilir; mızraklarını dik tutan bütün fotonlar dar aralardan geçemezler ve böylece önleri kesilir. Sıradan ışıkta her tür kutuplanma vardır – mızraklarını her tür açıyla tutan fotonlar. Bir de dairesel kutuplanma denen bir kutuplanma çeşidi vardır. Bunda foton ilerledikçe kutuplanma değişir, kullandığım analojileri harmanlayacak olursam ortaya geçit resmindeki bando şefinin salladığı tören sopasının hareketleri çıkar. Bu iki türlü olur, biri sağ elli, öteki solak. Bu da kuantum dünya görüşünün doğruluğunu test etmede kullanılabilir. Bütün fotonların mızraklarını aynı açıyla tuttukları doğrusal kutuplanmış [*plane polarized*] ışık doğru şartlarda yansıma yoluyla ya da ışığı sadece belli bir kutuplanmanın geçmesine izin veren polaroit mercek gibi bir cismin içinden geçirerek elde edilebilir. Doğrusal kutuplanmış ışık bir kere daha kuantum belirsizliğinin işbaşında olduğunu gösterir.

Kuantum seviyesindeki bir parçacığın spin'i gibi bir fotonun şu ya da bu yöndeki kutuplanması bir "evet/hayır" özelliğidir. Ya belli bir yönde kutuplanmıştır –dikey olarak mesela– ya da kutuplanma-



Şekil 10.2 Yatay kutuplanmış dalgalar geçemezler.



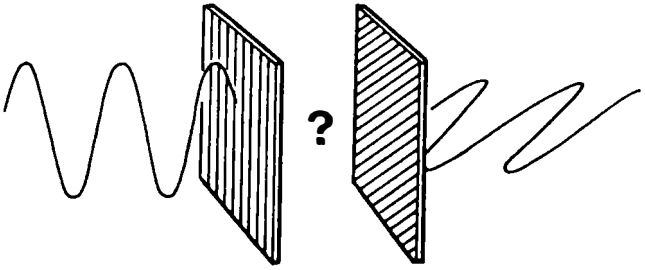
Şekil 10.3 Çapraz kutuplayıcılar bütün dalgaları durdururlar.

mıştır. Yani bir panjurdan geçen fotonların ilkine dik açılı başka bir panjurda takılıp kalması gerekir. Eğer ilk kutuplayıcı yatay panjur gibiyse, ikincisi dik tahta parmaklık gibidir. Tabii ki böyle iki kutuplayıcı "çapraz" koyulursa, hiç ışık geçmez. Fakat ikinci polaroit perde ilk perdeyle 45° açı yapacak gibi yerleştirilse acaba ne olur? Bu ikinci kutuplayıcıya gelen fotonların hepsi düzensiz 45° açılıdır ve klasik resimde buradan geçmemeleri gerekir. Kuantum resmiyse farklıdır. O perspektife göre her bir fotonun yanlış hizalanmış kutuplayıcıdan geçme şansı yüzde 50'dir ve gerçekten de buraya düşen fotonların yarısı bu şekilde geçer. Şimdi gerçekten garip olan şeye

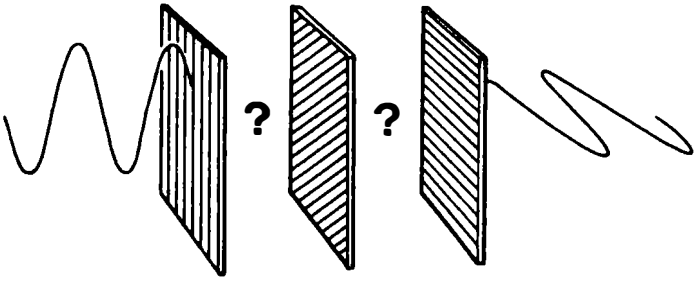
geliyoruz. Bu geçişi başaran fotonlar aslında kıvrılmışlardır. İlk kutuplayıcıya göre 45° kutuplanmış oldular, peki şimdi ilk kutuplayıcıya dik açılı başka bir kutuplayıcıyla karşılaşırlarsa ne olur? Dik açı 90° olduğundan bu kutuplandırıcıyla da aralarında 45° olmalı. O zaman öncekinde olduğu gibi buradan da yarısı geçer.

O halde iki çapraz kutuplayıcıdan hiç ışık geçmiyor. Fakat çaprazlanmış çiftin arasına ikisine de 45° açıyla üçüncü bir kutuplayıcı yerleştirirseniz, ilk kutuplayıcıdan geçen ışığın dörtte biri diğer ikisinden de geçer. Sokak hayvanlarından mülkümüzü korumada yüzde 100 işe yarayan iki parmaklığımız olmuştur adeta, biz yine de daha ihtiyatlı olup ikisi arasına bir üçüncü parmaklık daha yaptırmaya karar veriyoruz. Ama hayretle görüyoruz ki çift parmaklıkla engellediğimiz bazı hayvanlar sanki bu üçlü parmaklık orada yokmuş gibi ellerini kollarını sallayarak geçip geliyorlar. Deneyi değiştirerek kuantum gerçekliğinin doğasını değiştiriyoruz. Aslında farklı açılarda kutuplandırıcılar kullanarak kutuplanmanın farklı vektör bileşenlerini ölçüyoruz ve her yeni ölçüm ilk ölçümlerde aldığımız bütün bilgilerin geçerliliğini yok ediyor.

Bu hemen karşımıza EPR tema'sı üzerine yeni bir çeşitlemeyi getiriyor. Madde parçacıkları yerine fotonları ele alıyoruz fakat temel deney önceki gibidir. Şimdi zıt yönlerde giden iki foton üreten bir atom sürecini hayal ediyoruz. Bunu yapan pek çok gerçek süreç var ve böyle süreçlerde daima iki fotonun kutuplanmaları arasında bir bağıntı vardır. Ya aynı şekilde kutuplanmalıdırlar ya da bir anlamda zıt şekilde. Kolaylık olsun diye bu düşünce deneyimizde iki kutuplanmanın aynı olmasını düşündük. İki foton doğum yerlerini terk ettikten çok sonra onlardan birinin kutuplanmasını ölçmeye karar veriyoruz. Kutuplaştıracak malzemeyi hangi yönde hizaya koyacağımız konusunda özgürüz, bu iş tamamen keyfimize kalmış ve bunu yapınca da fotonun oradan belli bir geçme şansı vardır. Sonrasında uzaydaki o seçilmiş yöne göre fotonun "yukarı" mı yoksa "aşağı" mı kutuplanmış olduğunu biliriz ve uzayda çok uzakta öteki foton da aynı şekilde kutuplanmıştır. Fakat öteki foton bunu nasıl biliyor? İlk fotonun geçtiği aynı testi geçmeyi ve ilk fotonun kaldığı aynı testte kalmayı başarmak için kendini nasıl ayarlayabili-



Şekil 10.4 Birbiriyle 45° açılı iki kutuplayıcı, ilkini geçen dalgaların yarısını geçirir!



Şekil 10.5 Bu şekildeki üç kutuplayıcı, ilkini geçen dalgaların dörtte birini geçirir – oysa ortadaki kutuplayıcı kalksa *hiçbiri* geçemez.

yor? İlk fotonun kutuplanmasını ölçerek sadece bir fotonun değil, çok uzaktaki başka bir fotonun da *aynı zamanda* dalga fonksiyonunu çökertiyoruz.

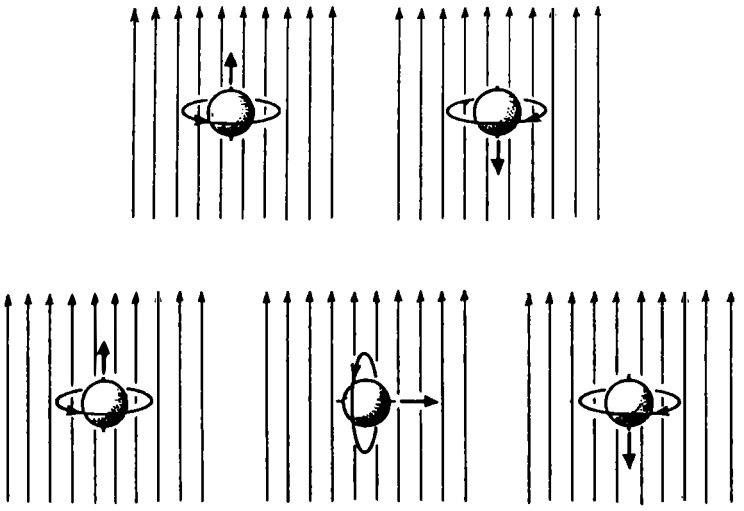
Bütün tuhaflıklarına rağmen bu, Einstein ve meslektaşlarının 1930'larda bilim adamlarının dikkatine sunduğu şeyden daha muammalı değil. Tek bir gerçek deney, bir düşünce deneyi hakkında yarım yüzyıl süren tartışmalardan kat kat daha üstündür. Bell bu hayaletimsi uzaktan etkinin sonuçlarını ölçmek için deneycilere bir yol göstermiştir.

BELL TESTİ

Güney Paris Üniversitesi'nden Bernard d'Espagnat, tıpkı David Bohm gibi EPR ailesi deneylerinin öngörüleri hakkında uzun uzadıya kafa yormuş bir kuramcıdır. Daha önce sözü geçen *Scientific American*'daki makalesinde ve Mehra'nın yayıma hazırladığı *The Physicist's Conception of Nature*'a yazdığı yazıda Bell'in bu bilmeceye yaklaşımının temel noktalarını açıklamıştır. D'Espagnat, bizim gündelik gerçeklik görüşümüzün üç temel varsayıma dayandığını söyler. İlki, biz gözlemlesek de gözlemlemesek de var olan gerçek şeylerin olduğu; ikincisi, tutarlı gözlemlerden ya da deneylerden genel sonuçlar çıkarmanın meşru olduğu; üçüncüsü de, "yerellik" [locality] dediği, hiçbir etkinin ışık hızından daha hızlı yayılamayacağı varsayımlarıdır. Bu temel varsayımlar birlikte, "yerel gerçekçi" dünya görüşlerinin temelini oluşturur.

Bell deneyi yerel gerçekçi dünya görüşüyle başlar. Proton spin'i deneyinde deneyci aynı parçacığın üç spin bileşenini asla bilemez fakat bunlardan istediğini ölçebilir. Bu üç bileşene X, Y, Z dersek deneyci bir protonun X spin'i için her +1 değer kaydedişinde, onun eşinin X spin'i için –1 değeri bulur ve bu böyle devam eder. Fakat bir protonun X spin'ini ve eşinin Y (ya da Z, ama ikisi birden olmaz) spin'ini ölçmeye izin vardır ve bu şekilde çiftteki her bir protonun *hem* X *hem* Y spin'leri hakkında bilgi edinmek mümkün olmalıdır.

İlke olarak bile bunu yapmak hiç kolay değil ve rasgele bir sürü proton çiftinin spin'lerini ölçmeyi ve çiftteki her iki üyede de aynı spin vektörünün ölçülmesi durumunda bunları atmayı içerir. Yine de bu yapılabilir ve deneyci buradan ilkesel olarak gruplardaki proton çiftleri için XY, XZ ve YZ şeklinde yazılabilecek spin çiftlerinin tanımlandığı sonuç gruplarını elde eder. Bell'in 1964 tarihli klasik yazısında gösterdiği şey şuydu: Eğer böyle bir deney gerçekleştirilirse o zaman yerel gerçekçi dünya görüşlerine göre X ve Y bileşenlerinin ikisinin de pozitif spin'e (X^+Y^+) sahip oldukları çift sayısı, XZ ve YZ ölçümlerinin hepsinin pozitif spin değeri gösterdiği



Şekil 10.6 Buçuklu spin'i olan parçacıklar bir manyetik alana göre ya paralel ya da zıt hizada bulunurlar. Tamsayılı spin'i olan parçacıklar da bu alanda dizilebilirler.

($X^+Z^+ + Y^+Z^+$) çiftlerin birleştirilmiş toplamlarından daima küçük olmalıdır. Bu hesap şu bariz olgunun doğrudan devamıdır: Eğer bir ölçüm örneğin belli bir protonun X^+ ve Y^- spin'i olduğunu gösteriyorsa, o zaman toplam spin durumunun ya $X^+Y^-Z^+$ ya da $X^+Y^-Z^-$ olması gerekir. Geri kalanı da küme kuramına dayalı, matematiksel olarak basit bir argümandan gelir. Fakat kuantum mekaniğinde matematik kuralları farklıdır ve eğer doğru işlem yapılırsa tersi bir öngörü çıkar, yani X^+Z^+ çift sayısı X^+Z^+ ile Y^+Z^+ çiftlerinin toplam sayısından az değil *daha çoktur.*

Bu hesap en başta yerel gerçekçi dünya görüşünden yola çıktığı için burada geleneksel olarak *ilk* eşitsizliğe "Bell eşitsizliği" denir ve eğer Bell eşitsizliği *ihlal edilirse* o zaman dünyanın yerel gerçekçi görüşü yanlış demektir, fakat kuantum kuramı bir sınavı daha geçmiştir.

KANIT

Bu testin madde parçacıklarının spin ölçümlerinde de aynı şekilde geçerli olması gerekir, fakat onlarda bu deneyleri yapmak çok zordur, fotonların kutuplanma ölçümleriyse zor olmakla birlikte gerçekleştirmek daha kolaydır. Fakat fotonların sıfır durgun kütlesi olduğu, ışık hızıyla hareket ettiği ve zamanı ayrımsama imkânı olmadığı için bazı fizikçiler fotonla yapılan deneylerden rahatsızdırlar. Gerçekten bir foton için yerellik kavramının ne anlama geldiği açık değil. O yüzden bugüne kadar yapılmış Bell eşitsizliği testlerinin çoğu foton kutuplanmasını içermişse de, bugüne kadar gerçekten proton spin'i ölçümleri kullanarak yapılan tek deney Bell eşitsizliğini ihlal eden sonuçlar vermiştir ve bu yüzden de kuantum dünya görüşünü destekler.

Bu sözü edilen deney Bell eşitsizliğinin ilk testi değildi, fakat Fransa'daki Saclay Nükleer Araştırma Merkezi'ndeki bir ekip tarafından 1976'da bildirilmiştir. Bu deney ilk düşünce deneyini çok yakından takip eder ve pek çok hidrojen atomu bulunduran bir hedefe düşük enerjili proton göndermeyi içerir. Bir proton bir hidrojen atomunun çekirdeğine –ki o da başka bir protondur– çarpınca iki parçacık tekli durum aracılığıyla etkileşime girer ve spin bileşenleri ölçülebilir. Ölçüm yapmadaki güçlükler anlatılacak gibi değildir. Detektörler protonların sadece birkaçını kaydeder ve düşünce deneyinin ideal dünyasının aksine, ölçümler yapılsa bile spin bileşenlerini net bir şekilde kaydetmek daima mümkün olmaz. Yine de, bu Fransız deneyinin sonuçları yerel gerçekçi dünya görüşlerinin yanlış olduğunu açıkça göstermektedir.

Bell eşitsizliğinin ilk testleri Kaliforniya Üniversitesi, Berkeley'de fotonlarla yapılmış ve 1972'de açıklanmıştır. 1975'e gelindiğinde bu deneylerden altı tane daha yapılmış ve bunlardan dördü Bell eşitsizliğini ihlal eden sonuçlar vermiştir. Fotonlar için yerelliğin anlamı konusundaki şüpheler ne olursa olsun, bu kuantum mekaniği lehinde yeni bir kanıttır, özellikle de deneylerde esas itiba-

riyle iki farklı teknik kullanıldığı için. Deneyin en eski foton versiyonunda fotonlar lazer ışığıyla istenilen enerji seviyesine uyarılabilen kalsiyum ya da cıva atomlarından geliyordu.[63] Bu uyarılmış durumdan tekrar temel duruma dönüş güzergâhı bir elektronun iki geçiş aşamasını içerir: İlkin daha aşağıdaki başka, uyarılmış bir duruma geçer, sonra temel duruma; her durum bir foton üretir. Bu deneylerde seçilmiş geçişler için bu iki foton birbiriyle bağıntılı kutuplanmalarla üretilir. Kademeli diziden gelen fotonlar o zaman kutuplama süzgeçlerinin arkasına yerleştirilmiş foton sayaçlarıyla tahlil edilebilir.

1970'lerin ortalarında deneyciler bu temada başka bir çeşitleme yaparak ilk ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerdeki fotonlar bir elektronla pozitronun birleşip yok olmasıyla ortaya çıkan gama ışınlarıdır. Yine bu iki fotonun kutuplanmaları bağıntılı olmalıdır ve yine artısıyla eksisiyle ortaya çıkan kanıt şu ki o kutuplanmaları ölçmeye çalıştığınızda elde ettiğiniz sonuçlar Bell eşitsizliğini ihlal eder.

Yani yedi Bell eşitsizliği testinden beşi kuantum mekaniği lehine sonuçlandı. D'Espagnat *Scientific American*'daki makalesinde bunun kuantum mekaniği lehine ilk bakışta göründüğünden daha

63. Burada bile Bohr'un kafasını uzun süre karıştırmış problemlerin ne mene bir şey olduğunu hafiften anlıyoruz. Gerçek olan tek şey deneylerimizin sonuçlarıdır ve ölçümleri yapma şeklimiz ölçümümüzün sonucunu etkiler. Şimdi bugün, 1980'lerde, fizikçiler, atomları uyarılmış duruma pompalama işlevi gören lazer demetlerini kâğıt kalem gibi kullanıyorlar. Bu aracı kullanabiliyoruz çünkü uyarılmış durumlar hakkında bilgimiz, elimizde de kuantum yemek kitabı var, fakat deneyimizin bütün amacı kuantum mekaniğinin, yani kuantum yemek kitabını yazmada kullandığımız kuramın doğruluğunu tespit etmek! Bu yüzden de deneylerin yanlış olduğunu söylemeye çalışıyor değilim. Ölçüm yapmadan önce atomları uyarmanın başka yolları düşünülebilir, ayrıca deneyin başka versiyonları da aynı sonuçları vermektedir. Fakat tıpkı önceki kuşak fizikçilerin gündelik fikir üretimleri mesela yaylı tartı cihazları ve cetvel kullanımlarının etkisinde kalmışsa, bugünkü kuşak da kuantumun temel alet edevatından bazen sandığından daha fazla etkileniyor.

Deneyi kurmak için kuantum süreçlerini kullanıyorsak Bell deneyinin gerçekten ne anlama geldiği sorusunu gündeme filozoflar getirsin. Ben Bohr'un dedikleriyle yetiniyorum – gördüğümüz neyse aldığımız odur; başka hiçbir şey gerçek değil.

güçlü bir delil olduğunu vurgulamaktadır. Deneylerin doğasından ve onları çalıştırma güçlüğünden dolayı "bir deneyin tasarımındaki çok çeşitli sistematik hatalar bu beş bağımsız deneyde yanlış bir bağıntı yaratabilirdi... öte yandan, beş bağımsız deneyde de bağıntı yaratabilecek bir deney hatasını hayal etmek güçtür. Dahası, o deneylerin sonuçları Bell eşitsizliğini sadece ihlal etmekle kalmıyor, bir de bunu tam olarak kuantum mekaniğinin öngördüğü biçimde ihlal ediyor."

1970'lerin ortalarından bu yana deney tasarımında kalan gedikleri ortadan kaldıracak biçimde tasarlanmış daha başka deneyler de gerçekleştirildi. Detektörler arasındaki, aldatıcı bir bağıntı ortaya koyabilecek herhangi bir "sinyal"in ışıktan daha hızlı gitmesi gereksin diye düzenek parçalarının birbirinden yeterince uzağa yerleştirilmesi gerekir. Bu da yapıldı, ama yine de Bell eşitsizliği ihlal edildi. Belki de bağıntının ortaya çıkmasının sebebi fotonların daha yaratılırken bile onları tuzağa düşürmek için ne tür bir deney düzeneğinin kurulduğunu "bilme"leridir. Eğer düzenek önceden kurulur da fotonu doğumunda etkileyecek bir toplam dalga fonksiyonu tesis edilirse ışıktan daha hızlı giden sinyallere ihtiyaç olmadan bu yapılabilirdi. O yüzden bugüne kadar yapılmış en büyük Bell eşitsizliği testi fotonlar uçuş halindeyken deneyin yapısını değiştirmeyi içerir, tıpkı John Wheeler'ın düşünce deneyindeki fotonların uçuşu sırasında çift yarık deneyinin değiştirilebildiği gibi. Alain Aspect ekibinin 1982'de Güney Paris Üniversitesi'nde yerel gerçekçi kuramlara karşı son önemli açığı kapattığı deney budur.

Aspect ve mesai arkadaşları eşitsizlik testlerini bir kademeli dizi sürecinden gelen fotonlar kullanarak zaten yapmışlar ve eşitsizliğin ihlal edildiğini görmüşlerdi. Şimdi geliştirdikleri şey, içinden geçen bir ışık demetinin yönünü değiştiren bir aç-kapa anahtarı kullanmalarıydı. Işık demeti iki kutuplama süzgecinin herhangi birine yönlendirilebilir ve her biri farklı bir kutuplanma yönünü ölçer ve her birinin ardında kendi detektörü vardır. Bu anahtarın içinden geçen ışık demetinin yönü sahte rasgele [*pseudo-random*] sinyal üreten otomatik bir cihazla olağanüstü bir çabuklukla, 10 nanosaniyede bir değiştirilebilir (saniyenin milyarda biri, 10×10^{-9}). Bir foto-

nun deneyin ortasında içinde doğduğu atomdan yola çıkıp detektöre ulaşması 20 nanosaniye aldığından deney kurulumuyla ilgili herhangi bir bilginin deney düzeneğinin bir ucundan ötekine gitmesi ve ölçüm sonucunu etkilemesi mümkün değildir – tabii böyle bir etki ışıktan daha hızlı seyahat etmiyorsa.

BUNUN ANLAMI NE?

Bu deney mükemmele yakındır; ışık demetinin kumandası tam olarak rasgele değilse de iki foton demeti için bağımsız olarak değişmektedir. Geriye kalan tek açık, üretilmiş olan fotonların çoğunun hiç tespit edilmemiş olmasıdır, çünkü detektörlerin kendisi çok yetersizdir. Sadece Bell eşitsizliğini ihlal eden fotonların tespit edildiğini ve diğerlerini tespit etmemiz mümkün olsaydı eşitsizliğe uymuş olduklarını göreceğimizi ileri sürmek hâlâ mümkün. Bu muhtemel görünmeyen ihtimali test edecek hiçbir deney tasarlanmamıştır ve bu savı ileri sürmek çaresizliğin had safhada olduğunu gösterir. Aspect ekibinden gelen sonuçların 1982 Noel'inden[64] hemen önce açıklanmasının ardından kimse Bell testinin kuantum kuramının öngörülerini doğruladığından ciddi olarak şüphe duymuyor. Aslında günümüzün teknikleriyle elde edilebileceklerin en iyisi olan bu deneyin sonuçları, eşitsizliği önceki bütün testlerden çok daha büyük bir ölçüde ihlal etmiş ve kuantum mekaniği öngörüleriyle de çok iyi uyuşmuştur. D'Espagnat'nın söylediği gibi, "Einstein'ın hep esas kabul ettiği bir noktada doğayı kavrayışını değiştirecek türden deneyler şu yakınlarda gerçekleştirildi ... uzay-zaman ayrılmazlığının [*non-separability*] artık fiziğin en kesin genel kavramlarından biri olduğunu rahatlıkla söyleyebiliriz."[65]

Bunun anlamı ışık hızından daha hızlı mesajların gönderilebilme ihtimalinin olduğu değildir. Bu şekilde işe yarar bilgi taşımaya yönelik ufukta bir şey görünmüyor çünkü bu süreçte başka bir ola-

64. *Physical Review Letters*, Cilt 49, s. 1804.
65. *The Physicist's Conception of Nature*, y.h. J. Mehra, s. 734.

ya *neden* olan bir olayı onun neden olduğu olayla bağlantılandırmanın bir yolu yok. Sonuç kavramının temel bir özelliği sadece *ortak* bir nedeni olan olaylar için geçerli olmasıdır – pozitron/elektron çiftinin karşılaşıp yok oluşları; elektronun temel duruma dönmesi; bir proton çiftinin tekli durumdan ayrılması. Uzayda birbirinden çok uzakta iki detektör hayal edin, merkezi bir kaynaktan ikisine doğru da uçan fotonlar olsun, foton demetinden birinin kutuplanmasını değiştirecek çok gelişmiş bir tekniğiniz olsun, öyle ki çok uzaktaki ikinci detektördeki bir gözlemci öteki demetteki değişiklikleri görebilsin. Fakat değiştirilen ne tür bir sinyaldir? Foton demetindeki parçacıkların başlangıçtaki kutuplanmaları ya da spinleri rasgele kuantum süreçlerinin bir sonucudur ve kendi içlerinde bir bilgi taşımazlar. Gözlemcinin göreceği tek şey ilk kutuplayıcının üzerinde kurnazca oynanmasa da göreceği şey olan farklı bir rasgele örüntüdür! Rasgele bir örüntüde hiçbir bilgi olmadığından bir işe yaramayacaktır. Bilgi iki rasgele örüntü arasındaki farkta bulunmaktadır, fakat ilk örüntü gerçek dünyada hiç var olmamıştır ve bu bilgiyi orada çıkarmak da mümkün değildir.

Fakat hayal kırıklığına uğramayın, zira Aspect deneyi ve sonraki deneyler bizim gündelik sağduyumuzunkinden gerçekten çok farklı bir dünya görüşü çıkarıyor ortaya. Bu deneyler bize şunu söylüyor: Bir zamanlar etkileşim içinde olan parçacıklar bir anlamda tek bir sistemin parçası olarak kalırlar ve sonraki etkileşimlere birlikte karşılık verirler. Gördüğümüz, dokunduğumuz ve hissettiğimiz hemen her şey bizim bildiğimiz haliyle evrenin meydana geldiği Büyük Patlama'dan bu yana zaman içinde başka parçacıklarla etkileşime girmiş parçacık öbeklerinden yapılmıştır. Vücudumdaki atomlar, şimdi uzaktaki bir yıldızın bir parçası olan parçacıklar ile henüz keşfedilmemiş bir gezegende yaşayan bir yaratığın bedenini oluşturan parçacıklarla bir zamanlar kozmik ateş topu içinde itişip kakışan başka parçacıklardan meydana gelmiştir. Hatta benim bedenimi oluşturan parçacıklar şimdi sizin bedeninizi oluşturan parçacıklarla bir zamanlar hoplaya zıplaya etkileşim içindeydiler. Bizler Aspect deneyinin kalbinden dışarı fırlayan o iki foton kadar tek bir sistemin parçalarıyız.

D'Espagnat ve David Bohm gibi kuramcılar her şeyin başka her şeye resmen bağlı olduğunu ve insan bilinci gibi fenomenlerin açıklanmasının sadece bütüncü bir evren yaklaşımıyla mümkün olduğunu ileri sürüyorlar.

Böylesi yeni bir bilinç ve evren tablosunu el yordamıyla araştırmaya başlamış olan fizikçi ve filozofların bu tablonun olası şekline dair tatmin edici bir taslak sunmaları için henüz çok erken, çığırtkanlığı yapılan pek çok ihtimalle ilgili spekülatif tartışmaların da yeri burası değil. Fakat içinden geldiğim katı fizik ve astronomi geleneğinden size bir örnek verebilirim. Fizikteki en büyük muammalardan biri eylemsizliktir, yani bir nesnenin harekete değil, hareketindeki *değişikliklere* direnç göstermesi. Serbest uzayda her nesne dışarıdan bir kuvvet tarafından itilmedikçe sabit hızla düz bir doğrultuda hareket etmeye devam eder – Newton'un büyük keşiflerinden biriydi bu. Nesneyi hareket ettirmek için ne kadar itilmesi gerektiği o nesnenin ne kadar madde içerdiğine bağlıdır. Fakat bir nesne düz bir doğrultuda sabit hızla hareket ettiğini nasıl "bilir" – hızını neyle kıyaslayarak ölçer? Newton'dan bu yana filozoflar eylemsizliğin kendisiyle kıyaslanarak ölçüldüğü standardın eskiden "sabit yıldızlar" denilen referans çerçevesi olduğunu gayet iyi bilirler, gerçi artık daha çok uzak galaksilerden söz ediyoruz. Uzayda dönen yerküre, pek çok bilim müzesinde görülenler gibi uzun bir Foucault sarkacı, bir astronot ya da bir atom, bunların hepsi evrendeki ortalama madde dağılımının ne olduğunu bilir.

Hiç kimse bunun nasıl işlediğini bilmiyor ve bu da boş, ama merak uyandıran spekülasyonlara yol açmış durumda. Eğer boş evrende tek bir parçacık olsaydı eylemsizliği olamazdı çünkü hareketini ya da harekete karşı direncini ölçmek için kıyaslanacak bir şey olmayacaktı. Ama sadece iki parçacık olsaydı bizim evrenimizdekiyle aynı eylemsizliğe mi sahip olurlardı? Eğer mucizevi bir şekilde evrenimizdeki maddenin yarısını ortadan kaldırabilseydik geri kalanlar aynı eylemsizliğe mi sahip olurdu yoksa yarısına mı? (Yoksa iki katı fazlasına mı?) Bu, üç yüzyıl önce olduğu kadar bugün de büyük bir muamma, ama belki yerel gerçekçi dünya görüşünün ölümü bize bir ipucu verir. Büyük Patlama'da etkileşim içinde olmuş

her şey etkileşim içinde bulunduğu her şeyle bağlantısını hâlâ koruyorsa, o zaman bizim gördüğümüz her yıldız ve her galaksideki her parçacık diğer her parçacığın varlığını "biliyor" demektir. Eylemsizlik sadece kozmologların ve görecilerin tartıştığı bir muamma değil kuantum mekaniği arenasında da sıkı bir muammadır.

Paradoks gibi mi geliyor? Richard Feynman *Lectures*'ında durumu gayet özlü bir biçimde özetlemiştir: "Buradaki 'paradoks' gerçeklikle sizin, gerçekliğin 'olması gerektiği'ni hissettiğiniz hali arasındaki çatışmadan ibarettir." Bir iğne başında dans edebilecek meleklerin sayısı hakkındaki tartışma gibi anlamsız mı geliyor size? Daha 1983'ün başlarında, Aspect ekibinin sonuçlarının yayımlanmasından sadece birkaç hafta sonra, İngiltere'deki Sussex Üniversitesi'ndeki bilim adamları meselenin kuantum seviyesindeki doğruluğunu bağımsız olarak teyit etmekle kalmayıp, aynı zamanda yeni nesil bilgisayarları içeren –transistörlü radyo, işaretleşme cihazı olarak semafora göre nasıl bir gelişmeyse bu bilgisayarlar da bugünkü katı hal teknolojisine göre öyledir– çeşitli pratik uygulamalara fırsat da sağlayan deney sonuçlarını ilan ediyorlardı.

TEYİT VE UYGULAMALAR

Terry Clark başkanlığındaki Sussex ekibi kuantum gerçekliğinin ölçümlerini öbür türlü yapma sorununu ele aldılar. Normal kuantum parçacıkları ölçeğinde –atomların ya da daha küçüklerin ölçeğinde– çalışacak deneyler kurmaya çalışmak yerine geleneksel ölçüm cihazlarının büyüklüğüne yakın "kuantum parçacıkları" kurmaya çalıştılar. Teknikleri süperiletkenlik özelliği üzerine dayalıdır ve yarım santimetre çapındaki halka biçiminde bir süperiletken malzeme kullanılır. Bu halkanın bir noktasında bir büzülme vardır, halka kesit olarak bir santimetrekarenin on milyonda biri kadar daraltılmıştır. Josephson eklemini geliştirmiş olan Brian Josephson'ın icat ettiği bu "zayıf halka", süperiletken madde halkasının bir orgun açık ağızlı borusu ya da iki ucu da çıkarılmış teneke bir kutu gibi davranmasını sağlar. Halkadaki süperiletken elektronların davranışını

tarif eden Schrödinger dalgaları sanki bir orgdaki duran ses dalgaları gibi davranırlar ve radyo frekansında değişen elektromanyetik alanlar uygulayarak "akort" edilebilirler. Aslında halkanın tamamındaki elektron dalgası tek bir kuantum parçacığını taklit eder ve bu ekip hassas bir radyo frekanslı detektör kullanarak halkadaki elektron dalgasının kuantum geçişinin sonuçlarını gözlemleyebilir. Sanki ellerinde yarım santimetre çapında tek bir kuantum parçacığı varmış gibidir – daha önce bahsedilen küçük süperakışkan helyum kovacığı örneğine benzeyen ama daha dehşetli bir şey.

Deney tek kuantum geçişlerinin doğrudan ölçümlerini sağlar ve aynı zamanda yerbilmezlik hakkında yeni açık kanıt sunar. Süperiletkendeki elektronlar tek bir bozon gibi davrandığından bir kuantum geçişi yapan Schrödinger dalgası bütün halkanın etrafına yayılır. Bütün bu sahte bozon, geçişi aynı zamanda yapar. Halkanın bir tarafının daha önce geçiş yaptığı ve öteki tarafın ancak ışık hızında giden bir sinyal halkayı dolaşacak ve "parçacığın" geri kalanını etkileyecek kadar zaman bulduğunda ona yetiştiği *gözlemlenmez*. Bazı açılardan bu deney Bell eşitsizliğinin Aspect testinden daha güçlüdür. O test matematiksel açıdan net olsa da sokaktaki adamın anlamakta zorlanacağı savlara dayalıdır. Yarım santimetre çapında olmasına rağmen tek bir kuantum parçacığı gibi davranan ve bir bütün olarak dışarıdan gelen herhangi bir dürtmeye aynı anda cevap veren tek bir "parçacık" kavramını anlamak çok daha kolaydır.

Clark ve mesai arkadaşları bir sonraki gelişme üzerinde çalışmaya çoktan başladılar. Daha büyük bir "makroatom" kurmayı umuyorlar, mesela 6 metre uzunluğunda düz bir silindir şeklinde. Eğer bu cihaz beklendiği şekilde dış uyarıya karşılık verirse o zaman gerçekten ışıktan daha hızlı iletişime açılan kapıda bir çatlak açılabilir. Silindirin bir ucunda onun kuantum seviyesini ölçen bir detektör, silindirin öteki ucundaki bir düzenek tarafından tetiklenen kuantum durumundaki bir değişikliğe anında karşılık verecek. Bu hâlâ geleneksel işaretleşmede pek bir anlam ifade etmiyor – buradan aya kadar uzanan bir makroatom yapıp da ayda çalışmakta olan astronotlarla burada, yeryüzü kontrol merkezi arasındaki haberleşmede yaşanan o can sıkıcı gecikmeyi ortadan kaldırmak için kulla-

namayız. Fakat bunun doğrudan hayata geçirilebilir uygulamaları olacaktır.

En gelişmiş modern bilgisayarlarda performansı etkileyen en sınırlayıcı etkenlerden birisi devredeki elektronların bir bileşenden ötekine geçerkenki hızlarıdır. Söz konusu zaman gecikmesi azdır, nanosaniye seviyesindedir, fakat çok önemlidir. Çok uzak mesafelerle anında haberleşme ihtimali Sussex deneyleriyle artmış değildir, fakat tek bir bileşeninin durumundaki değişikliğe bütün bileşenlerin anında tepki vereceği bilgisayarların yapılması ihtimal dahiline getirilmiştir. Terry Clark'ı "kuralları devre donanımına tercüme edildiğinde yirminci yüzyılın zaten hayret verici olan elektroniği bunun yanında semafor gibi kalacaktır" iddiasında bulunmaya sevk eden işte bu umuttur.[66]

Yani, Kopenhag yorumu deneylerle tamamen doğrulanmakla kalmamıştır. Anlaşılan o ki kuantum mekaniğinin bize klasik cihazların ötesindeki gelişmelerle zaten sağladığından daha da büyük gelişmeler var önümüzde. Ama yine de Kopenhag yorumu entelektüel bakımdan tatminkâr değil. Atomaltı bir sistemi ölçtüğümüzde dalga fonksiyonlarıyla çöken bütün o hayaletsi kuantum dünyalarına ne olmaktadır? Nasıl olur da üst üste binen bir gerçeklik, ki bizim sonunda ölçtüğümüzden daha az ya da daha çok gerçek değildir, ölçüm yapınca ortadan kaybolur? En iyi cevap alternatif gerçekliklerin ortadan kaybolmadığı ve Schrödinger'in kedisinin aynı zamanda hem ölü hem diri olduğudur, ama iki ya da daha fazla farklı dünyada. Kopenhag yorumu ve uygulamadaki öngörüleri daha eksiksiz bir gerçeklik görüşünde tamamen korunmuştur: Birçok dünya yorumu.

66. *The Guardian*, 6 Ocak 1983. Bu bölümü yazıcıdan çıkarmak için hazırlarken buna paralel benzer bir gelişme Bell Laboratuvarları'ndan geldi. Buradaki araştırmacılar bilgisayar devreleri için yeni, hızlı "anahtarlar" geliştirmek amacıyla Josephson eklemi teknolojisini kullanıyorlar. Bu anahtarlar sadece "konvansiyonel" Josephson eklemleri kullanır ve standart bilgisayar devrelerinden şimdi bile on kat hızlı çalışmaktadır. O gelişme daha manşetlerden inmeyeceğe ve yakın gelecekte pratik uygulamaları olacağa benziyor. Ama kafanız karışmasın – Clark'ın sözünü ettiği gelişmeler çok daha uzakta, belki de bu yüzyıl bitmeden uygulanamaz, fakat potansiyel olarak çok daha büyük bir ileri sıçrayış.

On Birinci Bölüm

Birçok Dünya

Şimdiye kadar bu kitapta taraf tutmamaya, kuantumun hikâyesini bütün yanlarıyla ortaya koyup hikâyeyi kendi seyrine bırakmaya çalıştım. Ama artık ayağa kalkıp fikrimizi beyan etmemizin zamanı geldi. Bu son bölümde bütün tarafsızlık numaralarını bir tarafa bırakıp benim şahsen en tatminkâr ve hoş bulduğum kuantum mekaniği yorumunu sunacağım. Bu çoğunluğun görüşü değil; böyle şeylere kafa yormaya tenezzül etmiş çoğu fizikçi Kopenhag yorumunun çöken dalga fonksiyonlarından memnundur. Fakat benim anlatacağım yorum saygı duyulan bir azınlık görüşüdür, bir de Kopenhag yorumunu da kapsama meziyeti vardır. Bu geliştirilmiş yorumun fizik dünyasında fırtınalar yaratmasını engelleyen rahatsız edici özelliği başka birçok dünyanın –muhtemelen sonsuz sayıda– bizim gerçekliğimizle bir şekilde yan yana, kendi evrenimize paralel, ama sonsuza dek ondan kopuk olarak var olduğunu ima ediyor olmasıdır.

GÖZLEMCİLERİ KİM GÖZLEMLİYOR?

Kuantum mekaniğinin bu birçok dünya yorumu 1950'lerde Princeton Üniversitesi'nde yüksek lisans öğrencisi olan Hugh Everett'in bir çalışmasından kaynaklanmıştır. Kopenhag yorumunun gerektirdiği tuhaf özellik, yani gözlem yapılınca sihirli bir şekilde dalga fonksiyonlarının çökmesi üzerine kafa yoran Everett pek çok kişiyle alternatifleri tartışmıştır. Bunlar arasında Everett'i kendi yaklaşı-

mını doktora tezi olarak geliştirmeye teşvik eden John Wheeler da vardır. Bu alternatifin çıkış noktası şudur: Ben kapalı bir odada bir deney gerçekleştirdiğimde, sonra dışarı çıkıp sonucu size söylediğimde, siz de New York'taki bir arkadaşınıza söylediğinizde, o da başka birine haber verdiğinde vs. meydana geldiği ima edilen dalga fonksiyonlarının art arda çöküşünü düşününce mantıksal olarak basit bir soru geliyor akla. Her aşamada dalga fonksiyonu daha da karmaşık bir hal alıp "gerçek dünya"yla daha iç içe giriyor. Fakat her aşamada alternatifler üst üste binmiş gerçeklikler olarak eşit derecede geçerlidirler, ta ki deneyden çıkan sonucun haberi ulaşana kadar. Koskoca evren üst üste binmiş dalga fonksiyonlarıyla, gözlemlendiği zaman çökerek tek bir dünyaya inecek alternatif gerçeklikler haline gelene kadar haberin tüm evrene bu şekilde yayıldığını düşünebiliriz. Fakat evreni kim gözlemliyor?

Evren tanım gereği müstakildir [*self-contained*]. Her şeyi o içerir, dolayısıyla evrenin varlığının farkına varan ve bu sayede onun etkileşim içindeki alternatif gerçekliklerini tek bir dalga fonksiyonuna düşüren bir dış gözlemci yoktur. Wheeler'ın bilinç kavramına –bizlere– Büyük Patlama'ya doğru ters nedensellikle geriye işleyen çok önemli gözlemci rolünü vermesi, bu ikilemden kurtulmanın bir yoludur, fakat sözde çözmeye çalıştığı muamma kadar muamma yaratan döngüsel bir argümanı da içerir. Evrende sadece tek bir gözlemcinin olduğu, onun da ben olduğum ve bütün kuantum olasılıkları ağından gerçekliği cisimleştiren şeyin en önemli unsur olan benim gözlemlerim olduğunu söyleyen tekbenci argümanı bile buna yeğlerim – fakat aşırı tekbencilik, dünyaya kendi katkısı başka insanlar tarafından okunması için kitap yazmaktan ibaret olan biri için son derece yetersiz bir felsefe.

Everett'in yorumu, tüm evrenin üst üste binen dalga fonksiyonlarının, yani etkileşim içine girerek kuantum seviyesinde ölçülebilir girişimler üreten alternatif gerçekliklerin çökmediğidir. Hepsi eşit derecede gerçektir ve hepsi "süperuzay"ın (ve süperzamanın) kendilerine ait kısımlarında var olurlar. Biz kuantum seviyesinde bir ölçüm yaptığımızda, gözlem sürecinden dolayı bu alternatiflerden birini seçmeye zorlanırız ve o da "gerçek" dünya olarak gördü-

ğümüz şeyin bir parçasına dönüşür; gözlem edimi alternatif gerçeklikleri birbirine bağlayan bağı koparır ve onları süperuzaydaki kendi ayrı yollarını izlemeye bırakır; her alternatif gerçeklik aynı gözlemi yapmış fakat farklı bir kuantum "cevabı" almış ve "dalga fonksiyonunu çökertip" tek bir kuantum alternatifine indirmiş olduğunu düşünen kendi gözlemcisini de içinde taşır.

SCHRÖDİNGER'İN KEDİLERİ

Bütün bir evrenin dalga fonksiyonunun çöküşü söz konusu olunca bütün bunların ne anlama geldiğini kavramak zor, fakat daha yalın bir örneğe bakarsak Everett'in yaklaşımının neden ileri bir adım olduğunu görmek çok daha kolay olur. Schrödinger'in paradoksal kutusu içinde saklı duran gerçek kediyi arayışımız nihayet sona erdi, çünkü o kutu benim tam da kuantum mekaniğinin birçok dünya yorumunun gücünü göstermek için ihtiyaç duyduğum örnek. Fakat buradaki sürpriz, takip ettiğimiz izin bizi tek bir gerçek kediye değil iki gerçek kediye götürdüğüdür.

Kuantum mekaniği denklemleri Schrödinger'in ünlü düşünce deneyindeki kutunun içerisinde eşit derecede gerçek bir "canlı kedi" bir de "ölü kedi" dalga fonksiyonu versiyonlarının olduğunu söyler. Geleneksel Kopenhag yorumu bu olasılıklara farklı bir perspektiften bakar ve der ki iki dalga fonksiyonu da eşit derecede *gerçekdışıdır* ve biz kutunun içine baktığımız zaman onlardan sadece biri gerçeklik olarak cisimleşir. Everett'in yorumu kuantum denklemlerini düzanlamıyla kabul eder ve her iki kedinin de gerçek olduğunu söyler. Bir canlı kedi vardır, bir de ölü kedi; fakat bunlar farklı dünyalarda bulunmaktadır. Mesele, kutunun içindeki radyoaktif atomun bozunup bozunmaması meselesi değildir, çünkü iki durum da gerçekleşmiştir. Bir karar vermek durumunda kalınca bütün dünya –evren– kendini iki versiyonuna ayırır, her bakımdan aynıdır, farklı olan tek şey bir versiyonda atom bozunmuş ve kedi ölmüştür, ötekindeyse atom bozunmamış ve kedi hayatta kalmıştır. Bilimkurgu gibi geliyor, fakat bütün bilimkurgulardan çok daha de-

rine iner ve kusursuz matematik denklemleri üzerine kuruludur, kuantum mekaniğini harfiyen kabul etmenin tutarlı ve mantıksal bir sonucudur.

BİLİMKURGUNUN ÖTESİNDE

Everett'in 1957'de yayımlanan çalışmasının önemi, bu görünüşte çılgın fikri alıp kuantum mekaniğinin kanıtlanmış kurallarını kullanarak onu güvenli matematiksel bir temele oturtmasındadır. Evrenin doğası hakkında spekülasyon yapmak başka şeydir, o spekülasyonları tam, kendi içinde tutarlı bir gerçeklik kuramı haline getirmek başka bir şeydir. Aslında bu şekilde spekülasyon yapan ilk kişi Everett değildi, ne var ki fikirlerini çoğul gerçeklikler ve paralel dünyalar hakkındaki önceki önerilerden tamamen bağımsız üretmişe benziyor. Önceki spekülasyonların çoğu –ve 1957'den bu yana olanların pek çoğu da– gerçekten bilimkurgu sayfalarında çıkmıştır. Benim izini sürebildiğim en eski versiyon Jack Williamson'ın *The Legion of Time* eseridir, ilk defa 1938'de bir dergide tefrikalar halinde çıkmıştı.[67]

Pek çok bilimkurgu hikâyesi "paralel" gerçekliklerde kurulur, mesela Amerika İç Savaşı'nı Güneyliler kazanmıştır ya da İspanyol Donanması İngiltere'yi işgal etmeyi başarmıştır ve bu gibi şeyler. Bazıları bir gerçeklikten ötekine zaman içinde yana doğru yolculuk eden bir kahramanın serüvenlerini anlatır; birkaçı da böyle bir alternatif dünyanın bizimkinden nasıl dallara ayrılarak oluşacağını uygun bir uydurma dille anlatır. Williamson'ın özgün hikâyesi iki alternatif dünyayı ele alır, bunların ikisi de geçmişteki kritik bir zamanda bu iki dünyanın gidişatının ayrıldığı kilit bir adım atılmasına kadar somut gerçekliğe kavuşamazlar (hikâyede bir de "geleneksel" zaman yolculuğu var ve buradaki olay argüman kadar döngüsel bir şey). Buradaki fikirde geleneksel Kopenhag yorumunun tarif ettiği bir dalga fonksiyonu çöküşünün yansımaları var ve Will-

67. Önceki kitaplarımdan biri olan *Timewarps*, tamamen paralel dünyalar üzerinedir, fakat kuantum kuramı sadece gerekli olduğu kadar geçer.

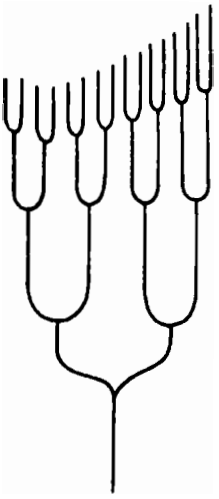
iamson'ın 1930'ların yeni fikirlerine olan aşinalığı bir karakterin neler olup bittiğini açıkladığı şu pasajdan açıkça anlaşılıyor:

> Somut parçacıkların yerini olasılık dalgalarının almasıyla, nesnelerin evren hatları artık bir zamanlarki gibi sabit ve basit güzergâhlar olmaktan çıkmıştır. Geodezikler atomaltı belirlenemezciliğin kaprisiyle sonsuz olası dallara ayrılmıştır.

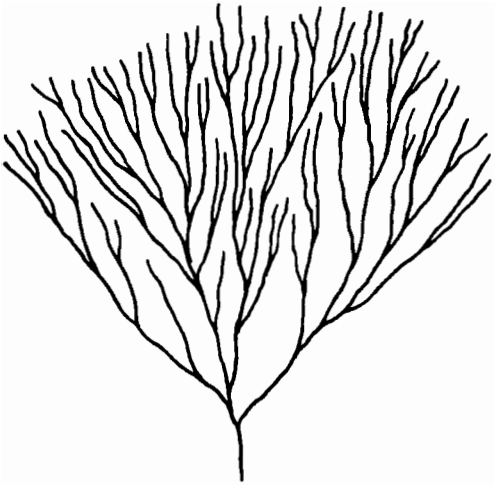
Williamson'ın dünyası hayalet gerçekliklerin dünyasıdır, burada destansı olaylar meydana gelir, bir tanesi kritik karar verildiğinde çöker ve ortadan kaybolur ve hayaletlerden başka birisi somut gerçeklik olması için seçilir. Everett'in dünyası pek çok *somut* gerçeklikten bir tanesidir. Buradaki bütün dünyalar eşit şekilde gerçektir ve ne yazık ki kahramanlar bile bir gerçeklikten komşusuna geçemezler. Fakat Everett'in versiyonu bilimsel olgudur, bilimkurgu değil.

Şimdi kuantum fiziğindeki temel deneye, iki delik deneyine geri dönelim. Geleneksel Kopenhag yorumu çerçevesinde bile, çok az kuantum aşçısı bunun farkında olsa da, düzenekten tek bir parçacık geçtiğinde o deneyin perdesinde oluşan girişim örüntüsü iki alternatif gerçeklikten kaynaklanan bir girişim olarak açıklanır. Birinde parçacık A deliğinden geçer, ötekinde B deliğinden. Deliklere baktığımızda parçacığın sadece birinden geçtiğini görürüz ve girişim de yoktur. Fakat parçacık hangi delikten geçeceğini nasıl seçer? Kopenhag yorumunda kuantum olasılıklarına uygun olarak rasgele seçer – Tanrı evren için zar *atar* yani. Birçok dünya yorumundaysa seçmez. Kuantum seviyesinde bir seçimle karşı karşıya kaldığında sadece parçacığın kendisi değil evrenin tamamı iki versiyona ayrılır. Bir evrende parçacık A deliğinden geçer, ötekinde B deliğinden. Her iki evrende de parçacığın tek bir delikten geçtiğini gören bir gözlemci vardır. Bundan sonra sonsuza dek iki evren ayrıdır ve etkileşime girmez – bu yüzden deneyin perdesinde girişim yoktur.

Evrenin her bölgesinde sürekli meydana gelen kuantum olaylarının sayısıyla bu resmi çarpın, o zaman geleneksel fizikçilerin bu fikirde neden duraksadıklarını anlarsınız. Fakat Everett'in yirmi beş yıl önce kanıtladığı gibi, hiçbir deneysel ya da gözlemsel kanıtla çelişmeyen mantıklı, kendi içinde tutarlı bir kuantum gerçekliği tarifidir bu.



Şekil 11.1 "Paralel dünyalar" sözü "süperuzay-zaman"da yan yana uzanan alternatif gerçeklikleri ifade eder. Bu yanlış bir resimdir.



Şekil 11.2 Daha iyi bir resim, evreni dalları açan bir ağaç gibi durmadan ayrılan bir şey olarak görür. Fakat bu da yine yanlış bir resimdir.

Kusursuz matematiğine rağmen Everett'in yeni kuantum mekaniği yorumunun 1957'de bilimsel bilgi havuzuna düştüğünde ciddi bir çalkantı yarattığı söylenemez. Çalışmanın bir versiyonu *Reviews of Modern Physics*'de çıktı[68] ve onun yanı sıra Wheeler'ın Everett'in çalışmasının önemine dikkat çeken bir makalesi de vardı.[69] Fakat bu fikir on yıldan fazla bir süre sonra Kuzey Karolina Üniversitesi'nden Bryce DeWitt ele alıncaya kadar genel olarak göz ardı edilmiştir.

Bu fikrin tutulması için neden bu kadar zaman geçtiği belli değil, üstelik 1970'lerde bile kazandığı başarı oldukça mütevazı kalmıştır. Ağır matematiği bir yana bırakıldığında Everett *Reviews of Modern Physics*'deki makalesinde özenle şunu açıklamıştır: Evrenin bölünerek birçok dünyaya ayrılmasının, bizim böyle bir deneyimimiz olmadığı için gerçek olamayacağı geçerli bir argüman değildir. Durumların üst üste binmesinin bütün ayrı unsurları başka unsurların gerçekliklerine tamamen kayıtsız biçimde dalga denklemine uyarlar ve bir dalın öteki dal üzerinde hiçbir etkisinin olmaması hiçbir gözlemcinin bu bölünme sürecinin farkında olamayacağını ima eder. Tersini savunmak, dünyanın güneşin yörüngesinde olamayacağını, çünkü eğer olsaydı hareketini hissetmemiz gerektiğini söylemek gibi olur. "Her iki durumda da," diyor Everett, "kuramın kendisi, bizim tecrübemizin aslında neyse o olacağını öngörür."

EINSTEIN'DAN SONRA?

Birçok dünya yorumunda kuram kavramsal olarak basittir, nedensellik içerir ve tecrübeyle bağdaşan tahminler verir. Wheeler insanların bu yeni fikri fark etmesi için elinden geleni yapmış.

"Göreli durum" formülünün klasik kavramları hangi kesinlikle bertaraf edeceğini açıklığa kavuşturmak kolay değil. İnsanın bu ilk aşamadaki mutsuzluğuna tarihte sadece birkaç defa rastlanmıştır: Newton kütle çekimini

68. 29. cilt, s. 454. 69. 29. cilt, s. 463.

uzaktan etki gibi saçma sapan bir şeyle açıkladığı zaman; Maxwell uzaktan etki gibi doğal bir şeyi alan kuramı gibi doğal olmayan bir şeyle açıkladığı zaman; Einstein bütün koordinat sistemlerini ayrıcalıklı bir karakterden mahrum ettiği zaman... genel görelilikteki bütün düzenli koordinat sistemlerinin eşit ölçüde geçerli olduğu ilkesi dışında fiziğin geri kalan kısmında bunlarla kıyaslanabilecek hiçbir şeyden söz edilemez.[70]

Wheeler şöyle bitiriyordu: "Everett'in kavramı dışında elimizde, genel görelilik evreni gibi kapalı bir sistemi kuantalamayla ne kastedildiğini açıklayacak kendi içinde tutarlı bir fikirler sistemi mevcut değil." Gerçekten iddialı sözler; fakat Everett yorumunun Kopenhag yorumunu fizikteki kurulu yerinden indirme gayretinin büyük bir kusuru var. Kuantum mekaniğinin birçok dünya versiyonu herhangi bir deneyin ya da gözlemin olası sonucunu değerlendirirken Kopenhag görüşüyle *tamamen aynı öngörülerde* bulunur. Bu hem üstünlük hem de zayıflıktır. Kopenhag yorumunun bu açıdan bugüne kadar bir eksikliğine rastlanmadığı için, bütün yeni yorumların nerede test edilirse edilsin Kopenhag yorumuyla aynı "cevaplar"ı vermesi gerekir; yani Everett'in yorumu ilk sınavını geçmiştir. Fakat sadece çift yarık deneyindeki ya da Einstein, Podolsky ve Rosen tarafından icat edilmiş testlerdeki görünüşte paradoksal özellikleri ortadan kaldırması bakımından Kopenhag görüşüne göre daha ileride sayılabilir. Bütün kuantum aşçılarının görüşüne göre iki yorum arasındaki farkı görmek zor ve doğal eğilim bildik olana sadık kalmak. EPR düşünce deneylerini ve şimdiki Bell eşitsizliğinin çeşitli testlerini incelemiş olan herkese Everett yorumu çok daha çekici geliyor. Everett yorumunda, hangi spin bileşenini ölçmeyi seçtiğimiz evrenin ta bir ucundaki başka bir parçacığın spin bileşenini sihirli bir şekilde tamamlayıcı bir duruma geçmeye zorlamıyor. Hangi spin bileşenini ölçmeyi seçerek hangi gerçeklik dalında yaşadığımızı seçiyoruz. Süperuzayın o dalında öteki parçacığın spin'i bizim seçtiğimizin daima tamamlayıcısıdır. Deneylerimizde hangi kuantum dünyasını seçtiğimize, dolayısıyla hangisinde bulunduğumuza karar veren şey *seçimdir*, tesadüf değil. Bir deneyin bütün olası so-

70. *A.g.y.*, s. 464.

nuçları fiilen ortaya çıktığında ve her olası sonuç kendi gözlemci gruplarıyla gözlemlendiğinde, bizim gözlemlediğimiz şeyin deneyin olası sonuçlarından biri olduğunu öğrenmek şaşırtıcı olmaz.

İKİNCİ BAKIŞ

DeWitt 1960'ların sonunda bu fikri ele alıp hem bu kavram hakkında yazarak hem de öğrencisi Neill Graham'ı Everett'in çalışmasının bir uzantısını kendi doktora tezi olarak geliştirmesine teşvik edene kadar kuantum mekaniğinin birçok dünya yorumu fizik camiasınca neredeyse özel bir çabayla göz ardı edilmiştir. DeWitt'in 1970'te *Physics Today*'deki[71] bir makalede açıkladığı gibi Everett yorumunu Schrödinger'in kedisi paradoksuna uyguladığınızda hemen cazibesini ortaya koyuyor. Artık hem ölü hem canlı, ne ölü ne canlı bir kedi muammasıyla uğraşmamız gerekmiyor. Onun yerine biliyoruz ki bizim dünyamızda kutu ya canlı ya da ölü bir kediyi taşıyor ve kapı komşu dünyada ya ölü ya canlı bir kedi taşıyan aynı kutuya sahip başka bir gözlemci var. Fakat eğer evren "sürekli muazzam sayıda dallara ayrılıyorsa" o zaman "evrenin her uzak köşesinde, her galakside, her yıldızın üzerinde meydana gelen her kuantum geçişi yerküredeki yerel dünyamızın binlerce kopyasını çıkarıyor demektir."

DeWitt bu kavramla, yani "İnsanın hafif kusurlu 10^{100} kopyasının sürekli yeni kopyalara bölünmesi fikri"yle ilk karşılaştığındaki şoku hatırlıyor. Fakat kendi çalışması, Everett'in tezi ve Graham'ın teziyle ikna olmuş. Hatta bu bölünmelerin nereye kadar devam edebileceğini bile ele alıyor. Sonlu bir evrende –genel görelilik, gerçekliğin iyi bir tarifiyse evrenin sonlu olduğuna inanmak için iyi sebepler var[72]– kuantum ağacı üzerinde sadece sonlu sayıda "dallar"

71. Cilt 23, sayı 9 (Eylül 1970), s. 30.

72. Genel görelilik, kapalı sistemleri tarif eden bir kuramdır ve Einstein başlangıçta evreni kapalı, sonlu bir sistem olarak tahayyül etmiştir. İnsanlar açık, sonsuz evrenler hakkında konuşsa da, işin doğrusu görelilik kuramı böyle tarifle-

olmalıdır ve süperuzayın daha tuhaf olasılıklara, DeWitt'in "başına buyruk dünyalar" dediği tuhaf biçimde bozuk davranış örüntülerine sahip gerçekliklere yeri olmayabilir. Her halükarda, katı Everett yorumu *mümkün* olan her şeyin gerçekliğin bir versiyonunda, süperuzayda bir yerlerde mutlaka meydana geldiğini söylese de bu, *hayal edilebilen* her şeyin meydana gelebileceğini söylemekle aynı şey değil. İmkânsız şeyleri hayal edebiliriz ve gerçek dünyalar onları barındıramaz. Başka türlü bizimkiyle aynı olan bir dünyada domuzların kanatları olsa bile, bunun dışında bizim domuzların tıpatıp aynısı olan bu domuzlar *uçamazlardı*; kahramanlar, ne kadar süper olurlarsa olsunlar alternatif gerçeklikleri görmek için zamandaki çatlaklardan yana kayamazlar, bilimkurgu yazarları bu ve benzeri olayların sonuçları hakkında spekülasyonlar yapsalar da bu böyle.

DeWitt'in vardığı sonuç Wheeler'ın daha önceki sonucu kadar etkileyici.

> Everett, Wheeler ve Graham'ın oturdukları yerden görünen manzara gerçekten etkileyici. Ne var ki tamamen nedensel bir manzara, öyle ki Einstein bile bunu kabul edebilirdi... Heisenberg tarafından 1925'te başlatılan yorumlama programının doğal son ürünü olmayı çoğundan daha fazla hak ediyor.

Belki bu noktada Wheeler'ın kendisinin de yakınlarda bütün bu işlerden kuşku duyduğunu belirtmek yerinde olur. Einstein'ın yüzüncü doğum yıldönümünü kutlamak için yapılan bir sempozyumdaki bir ankete verdiği cevapta birçok dünya kuramıyla ilgili şöyle söylüyor: "İstemeye istemeye sonunda o görüşü bırakmak zorunda kaldığımı itiraf ediyorum –başlarda çok savunsam da– çünkü bera-

ri gereğince kapsamaz. Evrenimizin kapalı olmasının yolu kütle çekiminin uzay-zamanı evrenin etrafında bükeceği kadar madde bulundurmasıdır, tıpkı uzay-zamanın bir kara delik etrafında bükülmesi gibi. Bu da bizim galaksilerde görebildiğimizden daha fazla maddeyi gerektirir, fakat evren dinamikleriyle ilgili çoğu gözlem, evrenin gerçekten kapalı olmaya çok yakın olduğuna işaret ediyor – ya "hemen hemen kapalı" ya da "hemen hemen açık". Bu durumda evrenin kapalı ve sonlu olduğunu söyleyen temel göreci içerimleri reddetmeyi haklı çıkaracak, gözleme dayalı bir gerekçe yok, ama evreni kütle çekimsel olarak bir arada tutan kara maddeyi aramak için her tür sebep var. Bu fikirlerin bazı temelleri Wheeler'ın *Some Strangeness in the Proportion*'daki yazısında bulunabilir.

berinde haddinden fazla metafizik yük taşıyor.[73] Bunu Everett yorumunun ayağını kaydırmak gibi görmemek lazım; Einstein'ın kuantum mekaniğinin istatistiksel temeli hakkındaki fikrini değiştirmiş olması bu yorumun ayağını kaydırmamıştır. Wheeler'ın 1957'de söylediğinin artık doğru olmadığı anlamına da gelmez. Bugün 1983'te, Everett'in kuramı dışında evreni kuantalamayla ne kastedildiğini açıklayacak kendi içinde tutarlı bir fikirler sisteminin olmadığı hâlâ doğrudur. Fakat Wheeler'ın kararını değiştirmesi insanların birçok dünya kuramını kabullenmesinin ne kadar zor olduğunu gösteriyor. Ben şahsen bu yorumun getirdiği metafizik yükü Schrödinger'in kedili deneyinin Kopenhag yorumundan ya da evrendeki parçacık sayısının üç katı "faz uzayı" boyutu olması gerekliliğinden çok daha az rahatsız edici buluyorum. Bu kavramlar sırf yaygın biçimde tartışıldığı için aşina gelen öteki kavramlardan daha garip değil ve birçok dünya yorumu, içinde yaşadığımız evrenin neden böyle olduğuna dair yeni kavrayışlar sunuyor. Bu kuramın kesinlikle daha işi bitmiş değil, hâlâ ciddi dikkati hak ediyor.

EVERETT'TEN SONRA

Kozmologlar bugün, bir Büyük Patlama'yla evrenin doğmasından hemen sonra meydana gelmiş olaylar hakkında keyifli keyifli konuşuyorlar ve evrenin yaşı 10^{-35} saniye ya da azken meydana gelen tepkimeleri hesaplıyorlar. Bu tepkimeler parçacık ve ışıma girdaplarını, çift oluşumlarını ve yok oluşları içerir. Bu tepkimelerin nasıl meydana geldiğine dair varsayımlar, Cenevre'deki CERN'in çalıştırdığı gibi dev hızlandırıcılardaki parçacıkların etkileşim biçimlerinin gözlemlenmesinden elde edilen sonuçlarla kuramın harmanlanmasından gelmektedir. Bu hesaplara göre burada, dünya üzerindeki kıyıtık deneylerimizin belirlediği fizik kuralları evrenin bir zamanlar neredeyse sonsuz yoğunluk durumundan bugün gördüğümüz hale nasıl geldiğini mantıklı ve kendi içinde tutarlı bir biçimde açık-

73. *Some Strangeness in the Proportion*, y.h. Harry Woolf, s. 385-6.

layabilir. Hatta kuramlar evrendeki madde ile karşı-madde ve madde ile ışıma dengesini tahmine bile yeltenebilir.[74] Bilimle ilgilenen herkes, ilgileri ne kadar az ya da geçici olursa olsun, evrenin kökeniyle ilgili Büyük Patlama kuramını duymuştur. Kuramcılar 15 milyar kadar yıl önce saniyenin bilmem kaçta birinde meydana geldiği söylenen olaylara ilişkin rakamlarla bir güzel oynamaktadır. Fakat bu fikirlerin gerçekten ne anlama geldiğini kim durup düşünüyor? Bu fikirlerin nereye vardığını anlamaya çalışmak kesinlikle akıllara durgunluk veren bir şeydir. Bırakın evrenin 10^{-35} saniye yaşındayken doğasını kavramayı, saniyenin 10^{-35}'i gibi bir rakamın gerçekten ne anlama geldiğini kim kavrayabilir? Doğanın böyle uç nokta tuhaflıklarıyla uğraşan bilim adamlarının paralel dünyalar kavramına yer ayırmak için kafalarını esnetmeleri gerçekten zor olmasa gerek.

Aslında, bilimkurgudan alınmış olan ve yerinde bir seçim gibi görünen bu terim pek isabetli değil. Alternatif gerçekliklerin doğal imgesi karmaşık bir tren yolu kavşağında dallara ayrılan hatlar gibi, bir ana gövdeden çıkıp süperuzayda yan yana giden alternatif dallara benzer. Bilimkurgu yazarları bütün dünyaları, milyonlarca paralel şeridi olan bir süper-süper-otoyol gibi zaman içinde yan yana ilerliyorlar gibi hayal ediyor, bize yakın komşumuz neredeyse bizim dünyamızın tıpkısı, fakat "zamanda yan yana" gittikçe farklılıklarımız daha açık ve seçik olmakta. Süper otoyolda yan komşu dünyaya kayarak şerit değiştirme olasılığı hakkında doğal olarak spekülasyona yol açan imge işte budur.

Matematikçiler gündelik hayatımızdaki o çok önemli bildik üç uzay boyutundan daha fazla boyutla uğraşma konusunda hiç sıkıntı çekmezler. Dünyamızın tamamı, Everett'in birçok dünyasından bir tanesi, matematiksel olarak dört boyutlu tarif edilir, üçü uzay, biri de zaman boyutu, hepsi birbiriyle dik açı yapar. Birbiriyle ve bizim dört boyutumuzla dik açı yapan daha fazla boyutu tarif eden matematik sıradan sayı cambazlığıdır. Alternatif gerçekliğin gerçekten yattığı yer burasıdır, bizim kendi dünyamıza paralel değil

74. Bütün bu fikirler benim *Spacewarps* kitabımda ele alınmıştır.

dik açılıdır, süperuzay içinde "yana doğru" dallara açılan *birbirlerine dik* dünyalar. Gözde canlandırmak zor[75] fakat yana, alternatif bir dünyaya kaymanın neden imkânsız olduğunu anlamayı kolaylaştırıyor. Eğer dünyamıza dik açıyla dursaydınız –yana doğru– kendi dünyanızı yaratmış olurdunuz. Aslında birçok dünya kuramına göre, evrenin kuantum seçimiyle karşı karşıya kaldığı her an olan budur. Kutu-içindeki-kedi deneyinin ya da iki delik deneyinin sonucunda evrenin bu şekilde bölünmesiyle yaratılmış alternatif gerçekliklerden biri içine girmenin tek yolu kendi dört boyutlu gerçekliğimizde zamanda geriye, deneyin zamanına gidip sonra da bizim dört boyutlu dünyamıza dik açıyla alternatif bir dalda zamanda ileriye gitmek olurdu.

Bu imkânsız olabilir. Genel sağduyu gerçek zaman yolculuğunun bazı paradokslardan dolayı imkânsız olması gerektiğini söylüyor. Mesela, zamanda geriye gidip kendi babanız daha dünyaya gelmeden büyükbabanızı öldürmek gibi. Öte yandan parçacıklar kuantum seviyesinde her "zaman" zaman yolculuğu yapıyor gibiler, ayrıca Frank Tipler genel görelilik denklemlerinin de zaman yolculuğunu mümkün kıldığını göstermiştir. Zamanda bir tür ileri ve geri hakiki bir yolculuğu düşünmek mümkün ve bu tür bir zaman yolculuğu alternatif evrenler gerçekliğine dayanır. David Gerrold bu olasılıkları eğlendirici bir bilimkurgu kitabı olan *The Man Who Folded Himself*'de incelemiştir. Birçok dünya gerçekliğinin karmaşıklıkla-

75. Eğer buna inanmakta güçlük çekiyorsanız şu bizim eski Schrödinger denklemini daha sıcak, daha aşina bulmaya başlayabilirsiniz. Hiç ilgisi yok. Kuantum mekaniğin dalga yorumu, fiziğin başka alanlarından aşina olunan basit bir dalga denklemiyle başlar ve tek bir parçacık için doğru kuantum mekaniksel tarif üç boyutlu bir dalgayı içerir, gerçi bu gündelik hayattaki uzayda değil, "konfigürasyon uzayı" denilen bir şeyin içinde. Ne yazık ki tarifte yer alan her parçacık için söz konusu olan dalga için üç *farklı* boyuta ihtiyacınız var. Etkileşimde olan iki parçacığı tarif için altı boyuta ihtiyacınız var; üç parçacıklı bir sistemi tarif etmek için dokuz boyuta ihtiyaç var ve bu böyle devam etmekte. Bütün evrenin dalga fonksiyonu, her ne demekse, evrendeki parçacık sayısının üç katı sayıda boyutu içeren bir dalga fonksiyonudur. Everett'in gerçeklik yorumunu yük fazlası var diye kenara atan fizikçiler, her gün kullandıkları dalga denklemlerinin ancak eşit ölçüde akıllara durgunluk veren fazla yük sayesinde iyi bir tarif olabileceğini çok rahat unutuyorlar.

rı ve inceliklerine kılavuz olarak okumaya değer bir kitaptır bu. Burada önemli olan şey, klasik örneği alırsak, zamanda geriye gidip büyükbabanızı öldürürseniz, sizin başladığınız dünyaya dik açılı olarak dallara ayrılan bir alternatif dünya yaratıyorsunuz ya da o dünyaya giriyorsunuz (bakış açınıza göre değişir) demektir. O "yeni" gerçeklikte babanız ve siz hiç doğmamışsınızdır, fakat burada paradoks yoktur çünkü siz "orijinal" gerçeklikte hâlâ doğmuş durumdasınız ve zamanda geriye yolculuk yapıp alternatif bir gerçekliğe giriyorsunuz. Yaptığınız muzırlığı değiştirmek için şimdi tekrar geri gidip sonra orijinal gerçeklik dalına ya da en azından ona çok benzeyen bir tanesine yeniden girersiniz.

Fakat Gerrold bile dikey gerçeklikler konusunda ana karakterinin başına gelen tuhaf olayları "açıklamıyor" ve bildiğim kadarıyla Everett yorumundaki matematiğin bu fiziksel açıklaması gayet özgün – bizlere zaman yolculuğu destanına dair, bilimkurgu yazarlarının henüz benimsemediği yeni bir bakış kazandırdığı kesin. İşte burada bu bakışı onların dikkatine sunuyorum.[76] Vurgulanması gereken nokta, bu tablodaki alternatif gerçekliklerin az bir çabayla içeri girip çıkabilecekleri şekilde bizim gerçekliğimiz "boyunca" uzanmadığıdır. Her gerçeklik dalı diğer bütün dallara diktir. Bonaparte'ın ilk adının Napolyon değil de Pierre olduğu fakat bunun dışında tarihin esas olarak aynı aktığı bir dünya olabilir; o Bonaparte'ın hiç var olmadığı bir dünya olabilir. İkisi de bizim dünyamızdan eşit ölçüde uzak ve ulaşılmazdır. İkisine de ancak kendi dünyamızda zamanda geriye yolculuk yapıp dallara ayrıldığı uygun noktaya giderek ulaşılabilir ve sonra dik açıyla (pek çok dik açıdan bir tanesi) zamanda tekrar ileri gidip kendi dünyamıza gelebiliriz.

Bu kavram bilimkurgu yazarları ve okurlarınca pek sevilen ve filozofların uzun uzun tartıştığı bütün zaman yolculuğu paradokslarının paradoksal doğasını ortadan kaldıracak biçimde genişletilebilir. Bütün *olası* şeyler gerçekliğin bir kolunda mutlaka meydana gelir. O olası gerçekliklere girmenin anahtarı zamanda yan yolculuk

76. Bu kitap matbaa yolundayken *Analog* için bu temayı işleyen "Dikey Dünyalar" diye bir öykü yazdım.

etmek değil, geriye gidip sonra başka bir dalda ileriye gitmektir. Muhtemelen bugüne kadar yazılmış en iyi bilimkurgu romanı birçok dünya yorumunu kullanır, fakat yazarı Gregory Benford'ın bunu bilinçli olarak yaptığından emin değilim. Kitabı *Timescape*'de bir dünyanın kaderi 1990'lardan 1960'lara gönderilen mesajların sonucunda köklü olarak değişir. Hikâye ustalıkla çok güzel işlenmiş, sürükleyici ve bilimkurgu teması olmasa bile kendi başına ayakta duruyor. Fakat burada ele almak istediğim tek nokta şu: Dünya, gelecekten gelen mesajları alan insanların eylemleri sonucu değiştiğinden, o mesajların geldiği gelecek onlar için varlığını korumuyor. O halde mesaj nereden geldi? Belki eski Kopenhag yorumuna dayanarak hayalet bir dünyanın dalga fonksiyonlarının çöküş biçimini etkileyecek hayalet mesajları geriye gönderdiğini ileri sürebilirsiniz, ama bu görüşü savunmakta bayağı zorlanırsınız. Öte yandan birçok dünya yorumunda mesajların bir gerçeklikten zamanda geriye, dalların çatallandığı noktaya gitmesini ve oradaki insanlar tarafından alınıp insanların zamanda ileri doğru hareket ederek kendi farklı gerçeklik dallarına yolculuk etmelerini gözde canlandırmak çok basittir. İki alternatif dünya da vardır ve geleceği etkileyen o kritik kararlar alındıktan sonra aralarındaki iletişim kopar.[77] *Timescape* okunması hoş bir kitap olmasının yanı sıra kuantum mekaniğindeki EPR deneyi ya da Schrödinger'in kedisi tartışmalarıyla ilgili aynı ölçüde merak uyandırıcı bir "düşünce deneyi" de içeriyor. Everett'in kendisi farkında olmamış olabilir fakat birçok dünya gerçekliği tam da zaman yolculuğuna izin verecek türden bir gerçekliktir. Aynı zamanda bizim burada bu meseleleri neden tartıştığımızı açıklayan türde bir gerçeklik.

77. Burada vurgulanmaya değer başka bir unsur daha var. Zaman yolculuğu kuramsal olarak mümkünse de bizim zaman yolculuğunda maddi nesneleri göndermemize engel olacak aşılmaz güçlükler çıkabilir. Fakat Feynman'ın gerçeklik yorumunda zamanda geriye yolculuk yapan parçacıkları kullanabilirsek zamanda mesaj gönderme nispeten kolay bir mesele olabilir.

ÖZEL YERİMİZ

Benim birçok dünya kuramı yorumuma göre bizim dünyayı bilinçli algılayışımız bakımından gelecek belirlenmiş değildir, fakat geçmiş belirlenmiştir. Gözlem edimiyle pek çok gerçeklikten "gerçek" bir tarih seçmişizdir ve bizim dünyamızda biri bir ağaç gördüğü zaman kimse ona bakmasa da o orada kalır. Bu geriye doğru ta Büyük Patlama'ya kadar geçerlidir. Kuantum otoyolundaki her kavşakta pek çok yeni gerçeklikler yaratılmış olabilir, fakat bize doğru gelen yol açık ve nettir. Geleceğe ise pek çok yol gider ve "bizler"in bazı versiyonları onlardan birini takip edecektir. Bizlerin her bir versiyonu emsalsiz bir yol takip ettiğini, geriye emsalsiz bir geçmişe baktığını düşünecektir, fakat geleceği bilmek imkânsızdır, zira onlardan çok fazla vardır. Hatta gelecekten mesaj da alabiliriz, *Timescape*'deki gibi mekanik araçlarla ya da bu ihtimali düşünmek isterseniz rüya ve duyuötesi algılama yoluyla. Fakat o mesajların bize faydasının dokunması pek muhtemel değil. Gelecek dünyaların çoğulluğundan dolayı bütün bu mesajların karmaşık ve çelişik olması beklenmelidir. Onlara göre hareket edersek kendimizi "mesajlar"ın geldiği bir gerçeklik dalından başka birine göndermemiz daha büyük ihtimal, o yüzden bu mesajların "gerçek çıkması" pek olası değil. Kuantum kuramının uygulanabilir duyuötesi algılama, telepati vb. gibi şeylere kapı açtığını ileri süren insanlar sadece kendilerini kandırıyorlar.

Evreni "şimdi"ki anın sabit bir oranda hareket ettiği bir Feynman diyagramı olarak gösteren tablo aşırı basite indirgemedir. Gerçek tablo çok boyutlu bir Feynman diyagramıdır, bütün olası dünyalar ve "şimdi" bütün hepsi üzerinde açılmaktadır, bütün dallardan yukarı çıkıp dolambaçlı yollara sapmaktadır. Bu çerçevede cevaplanmadan kalan en büyük soru bizim algılayışımızın neden böyle olduğudur – Büyük Patlama'yla başlamış olan ve bize doğru gelen kuantum labirenti içinden geçen yolların seçimi neden evrende aklın ortaya çıkması için gerekli tam doğru yol olsun?

Bunun cevabı çoğunlukla "antropik ilke" diye anılan fikirde bulunmaktadır. Buna göre evrenimizdeki şartlar, küçük farklılıklar dışında, bizimki gibi bir hayatın oluşup gelişebilmesine izin veren tek şartlardır, o yüzden bizim gibi herhangi akıllı bir türün çevremizde gördüğümüz gibi bir evreni gözlemlemesi kaçınılmazdır.[78] Eğer evren şimdi olduğu gibi olmasaydı biz burada onu gözlemliyor olmayacaktık. Evrenin Büyük Patlama'dan ileriye doğru pek çok kuantum yolundan geçtiğini hayal edebiliriz. O dünyaların bazılarında evrenin genişlemesinin başlangıcına yakın alınmış kuantum kararlarındaki farklılıklardan dolayı yıldızlar ve gezegenler asla meydana gelmez ve bizim bildiğimiz anlamdaki hayat hiç yoktur. Belirgin bir örnek verecek olursak görünüşe göre bizim evrenimizde madde parçacıkları ağır basar, karşı-parçacıklarsa ya çok az ya da hiç yoktur. Bunun için temel bir sebep olmayabilir – Büyük Patlama'nın ateş topu aşamasında meydana gelen tepkimelerdeki bir kaza sonucu da olabilir. Evren boş da olabilirdi ya da esas olarak çok az ya da hiç madde olmaksızın bizim karşı-madde dediğimiz şeyden meydana gelebilirdi. Boş evrende bizim bildiğimiz anlamda bir hayat olmazdı; karşı-madde evreninde tıpkı bizimki gibi bir hayat olabilirdi, adeta aynadaki dünyanın gerçeğe dönüşmüş hali gibi. Asıl muamma Büyük Patlama'dan hayat için ideal olan bir dünyanın neden çıkmış olduğudur.

Antropik ilke der ki pek çok olası dünya var olabilir ve biz de kendi evren türümüzün kaçınılmaz bir ürünüyüz. Peki öteki dünyalar nerede? Kopenhag yorumunun etkileşim içindeki dünyaları gibi hayalet midirler? Bütün evrenin Büyük Patlama'dan önce bildiğimiz haliyle zaman ve uzayı başlatan farklı hayat dönemlerine mi karşılık gelmekteler? Yoksa bunlar Everett'in, hepsi bizim dünyamıza dik açıyla var olan birçok dünyası olabilir mi? Bence bugün bu, mevcut en iyi açıklamadır ve evrenin neden bizim gördüğümüz gibi olduğu temel muammasının çözümü Everett yorumunun taşı-

78. *Spacewarps* kitabımda antropik ilkeyi kısaca ele aldım; daha fazla ayrıntı için Paul Davies'in *The Accidental Universe* kitabına bakabilirsiniz. Benim kitabım *Genesis* evrenin Büyük Patlama'yla doğumunu ayrıntılı biçimde açıklıyor.

dığı fazla yükü fazlasıyla telafi etmektedir. Alternatif kuantum gerçekliklerinin çoğu hayat için elverişsizdir ve boştur. Hayat için tam uygun olan şartlar özeldir, yani canlı varlıklar geriye dönüp kendilerini üretmiş olan kuantum yoluna bakınca özel olaylar, kuantum yolu üzerinde belki istatistiksel bakımdan bile çok muhtemel olmayan ama akıllı hayata çıkmış olan dallar görürler. Bizim dünyamız gibi, ama farklı tarihlere sahip –Britanya'nın hâlâ bütün Kuzey Amerika kolonilerinde hüküm sürdüğü; ya da Kuzey Amerikalı yerlilerin Avrupa'yı kolonileştirdiği tarihler– dünyaların çoğulluğu hep birlikte çok daha muazzam büyüklükteki bir gerçekliğin sadece tek bir küçük köşesini oluşturur. Kuantum olasılıkları dizisinden hayata elverişli özel şartları seçen tesadüf değil, seçimdir. Bütün dünyalar eşit ölçüde gerçektir, fakat sadece uygun dünyalarda gözlemciler vardır.

Aspect ekibinin deneylerinin Bell eşitsizliğini test etmedeki başarısı kuantum mekaniğinin bugüne kadar ileri sürülmüş bütün yorumlarından ikisi dışında hepsini elemiştir. Ya o hayalet gerçeklikler ve yarı-ölü kediler barındıran Kopenhag yorumunu kabul etmek zorundayız ya da birçok dünyalı Everett yorumunu. Tabii bilim pazarındaki bu iki "en hesaplı" üründen ikisinin de doğru olmayıp, bu iki alternatifin de yanlış olduğu düşünülebilir. Kuantum mekaniksel gerçekliğin Kopenhag yorumunun ve Everett yorumunun Bell testi de dahil çözdüğü bütün muammaları çözen ve bizim şu anki kavrayışımızın ötesine geçen başka bir yorumu daha olabilir – belki de genel göreliliğin özel göreliliği aşıp içine dahil etmesinde olduğu gibi. Ama bunun zayıf bir ihtimal olduğunu, işin kolayına kaçmak olduğunu düşünüyorsanız, şunu unutmayın ki bu tür her "yeni" yorumun Planck'ın karanlıktaki büyük sıçramasından bu yana öğrendiğimiz *her şeyi* açıklaması şarttır ve de en az mevcut iki yorum kadar iyi ya da *daha iyi* açıklamak zorundadır. Bu da öyle kolay bir iş değildir gerçekten, ayrıca aylak aylak oturup birinin sorunlarımıza "daha iyi" bir açıklamayla çıkageleceğini ummak bilimin tarzı değildir. Daha iyi bir cevabın yokluğu durumunda elimizdeki en iyi cevapların içerimleriyle yüzleşmek zorundayız. Yirminci yüzyılın en iyi beyinleri tarafından kuantum bilmecesine feda edilmiş yarım

asırdan fazla süren yoğun çabaların ardından 1980'lerde yazarken dünyanın nasıl kurulduğu konusunda şu an için bilimin sadece bu iki alternatif açıklamayı sunduğunu kabul etmemiz gerekiyor. İlk bakışta ikisi de kabul edilir cinsten görünmüyor. Basit bir dille ifade edersek ya hiçbir şey gerçek değil ya da her şey gerçek.

Bu mesele asla çözüme kavuşmayabilir, çünkü iki yorumu ayırt edecek bir deneyin kurulması, zaman yolculuğu da yapılamadığına göre, imkânsız olabilir. Fakat kuantum filozoflarının en yetkinlerinden Max Jammer'ın, "çoklu evren [*multiuniverse*] kuramı şüphesiz bilim tarihinde bugüne kadar inşa edilmiş en cüretkâr ve en tutkulu kuramlardan biridir,"[79] derken hiç abartmadığı gayet açık. Kelimenin tam anlamıyla her şeyi açıklıyor, kedilerin yaşam ve ölümleri de dahil. İflah olmaz bir iyimser olarak bana en çok hitap eden kuantum mekaniği yorumu budur. Her şey mümkün, kendi edimlerimizle kuantumun birçok dünyası içinde kendi yollarımızı seçeriz. Yaşadığımız dünyada ne görüyorsanız onu alırsınız; gizli değişkenler yoktur; Tanrı zar atmaz; her şey gerçektir. Niels Bohr hakkında tekrar tekrar anlatılan anekdotlardan biri şöyle: Adamın biri 1920'lerdeki kuantum kuramının bilmecelerinden birini çözme iddiasıyla olmadık bir fikirle yanına geldiğinde onu şöyle cevaplamış: "Kuramınız çılgın, ama doğru olacak kadar çılgın değil."[80] Bence Everett'in kuramı doğru olacak kadar çılgın ve Schrödinger'in kedisini arayışımızı noktalamak için de uygun bir nota gibi görünüyor.

79. *The Philosophy of Quantum Mechanics*, s. 517.
80. Aktaran, sözgelimi, Robert Wilson, *The Universe Next Door*, s. 156.

Sonsöz

Bitmemiş İş

Burada anlattığım haliyle kuantumun hikâyesi derli toplu görünüyor, tabii o yarı-felsefi soru, Kopenhag yorumunu mu yoksa birçok dünya yorumunu mu tercih edersiniz sorusu hariç. Bu hikâyeyi bir kitapta sunmanın en iyi yolu bu, fakat bütün gerçek bu değil. Kuantumun hikâyesi daha bitmedi, bugünün kuramcıları Bohr'un atomu kuantalamayla ileri attığı adım kadar temel bir ileri adım atılmasını sağlayabilecek sorunlarla boğuşuyorlar. Bu bitmemiş iş hakkında yazmaya çalışmak çetrefil ve insana hiç keyif vermeyen bir çaba; neyin önemli olduğu ve neyin güvenle göz ardı edilebileceğine dair kabul edilmiş görüşler kitap baskıya gidene kadar tümden değişebilir. Fakat size işlerin nasıl gelişebileceğine dair bir fikir vermek için bu sonsöze kuantum hikâyesinin bitmemiş yanlarını ve gelecekte gözünüzü nelere açmanız gerektiği hakkında bazı ipuçları ekledim.

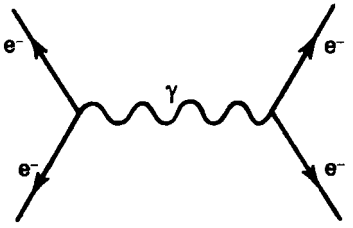
Kuantum kuramı hakkında göze görünenden daha fazla şeyin olduğuna dair en açık işaret kuantum kuramının genelde baştacı olarak görülen, kuramın en büyük zaferi olan dalından geliyor. Bu dala da kuantum elektrodinamiği ya da kısaca KED [QED] deniyor. Bu, elektromanyetik etkileşimi kuantum diliyle açıklayan kuramdır. KED 1940'larda gelişmeye başladı ve o kadar başarılı oldu ki güçlü çekirdek tepkimesi kuramına model olarak kullanıldı. Bu da kuantum kromodinamiği terimini, yani KKD'yi [QCD] ortaya çıkaran kuramdır, çünkü kuark denilen parçacıkların etkileşimlerini içerir. Bu parçacıkların kuramcıların keyfi biçimde renk adları vererek ayırt ettikleri özellikleri vardır. Fakat KED'in kendisinde temel bir kusur

vardır. Kuram iş görüyor fakat bizim dünyadaki gözlemlerimize uydurmak için matematiğiyle oynamak gerekiyor.

Sorunlar kuantum kuramındaki bir elektronun klasik kuramdaki çıplak parçacık olmayıp bir sanal parçacık bulutuyla çevrili olmasıyla ilgili. Bu parçacık bulutu elektronun kütlesini etkilemek zorunda. Bir "elektron + bulut"a karşılık gelecek kuantum denklemlerini kurmak mümkün, fakat bu denklemler matematiksel olarak ne zaman çözülse sonsuz büyüklükte "cevaplar" veriyor. Kuantum aşçılığının temel taşı Schrödinger denkleminden başlayarak elektronun doğru matematiksel işlemi sonsuz kütle, sonsuz enerji ve sonsuz yük sonucu vermektedir. Sonsuzluklardan kurtulmanın matematik kurallarına uygun bir yolu yok, fakat hile yaparsanız kurtulabilirsiniz. Doğrudan ölçümle bir elektronun kütlesinin ne olduğunu biliyoruz ve kuramın "elektron + bulut"un kütlesi olarak bize vermesi gereken cevabın bu olduğunu da biliyoruz. Bu yüzden kuramcılar sonsuzlukları denklemlerden kaldırıyorlar, aslında sonsuzu sonsuza bölüyorlar.

Matematikte sonsuzu sonsuza bölerseniz her tür cevabı elde edebilirsiniz, bu yüzden onlar da cevabın bizim istediğimiz cevap, yani elektronun ölçülmüş kütlesi olması gerektiğini söylüyorlar. Bu hileye yeniden normalleştirme denir.

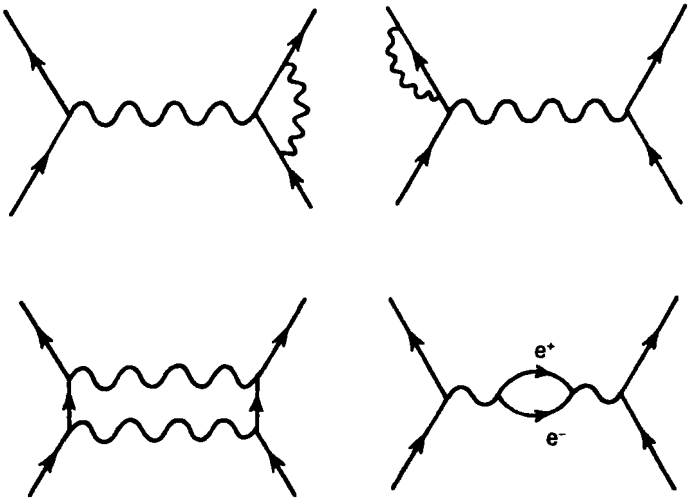
Neler olup bittiğini anlamak için 60 kilo ağırlığındaki birinin aya gittiğini hayal edin, orada yüzeydeki kütle çekim kuvveti dünya yüzeyindeki kütle çekim kuvvetinin sadece altıda biridir. Bildiğimiz tartı aletini de bu seyahatte yanımızda getirsek yolcunun ağır-



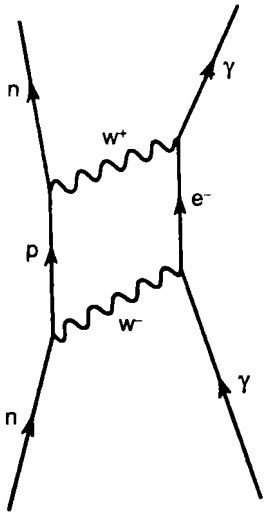
Şekil S.1 Parçacık etkileşimlerinin klasik Feynman diyagramı.

lığı hiç kütle kaybetmemesine rağmen sadece 10 kilo olarak ölçülür. Böyle durumlarda ölçülen ağırlık 60 kiloyu gösterene kadar ayarlarla oynayıp tartıyı "yeniden normalleştirmek" belki akıllıca olurdu. Fakat buradaki hile bizim yolcunun gerçek ağırlığını dünya diliyle bilmemiz sayesinde işe yarıyor ve biz kayıtlarımızı dünya diliyle tutmak istiyoruz. Eğer tartı sonsuz ağırlık gösterseydi o zaman sonsuz bir düzeltme yaparak gerçekliğe ayarlayabilirdik, işte kuantum kuramcılarının da KED'de yaptıkları budur. Ne yazık ki 60'ı 6'ya böldüğünüzde net 10 sonucunu almanıza rağmen, "10 x sonsuz"u sonsuza bölünce net olarak 10 sonucu *çıkmaz*. Sonuç her şey olabilir.

Öyle de olsa hile müthiş iş gördü. Sonsuzlar birbirini götürünce Schrödinger denkleminin çözümleri fizikçilerin istediği her şeyi yapıyor, hatta atom tayflarındaki elektromanyetik etkileşimlerin en



Şekil S.2 Elektrodinamik yasalarında yapılan kuantum düzeltmeleri sanal parçacıklar yüzünden ortaya çıkıyor – döngülü diyagramlar. Bunlar ancak içe sinmeyen yeniden normalleştirme hilesiyle kaldırılabilecek sonsuz değerlere yol açan durumlardır.



Şekil S.3 Bir nötrinoyla bir nötron arasında değişilen iki W bozonu tek bir bozon alışverişiyle kıyaslandığında hesapta *sonsuz* bir düzeltme yapılmasını gerektirmeye yeterli.

incelikli etkilerini bile kusursuz bir biçimde tarif ediyor. Sonuçlar mükemmel, bu yüzden çoğu kuramcı KED'i iyi bir kuram olarak kabul ediyor ve sonsuzları da dert etmiyor, tıpkı kuantum aşçılarının Kopenhag yorumunu ya da belirsizlik ilkesini dert etmedikleri gibi. Fakat hilenin işe yaraması onun hile olmasını değiştirmiyor ve kuantum kuramıyla ilgili görüşüne en çok saygı duyulması gereken bir kişi bu konuda derin rahatsızlık duyuyor. Yeni Zelanda'da daha 1975'te[81] verdiği bir konferansta Paul Dirac şu yorumu yapıyordu:

81. *Directions in Physics*, İkinci Bölüm. Dirac bu kaygısında yalnız değil; Banesh Hoffmann *The Strange Story of The Quantum*, s 213'te yeniden normalleştirmenin fiziği çıkmaz yola götürdüğünü anlatıyor. "Sonsuzlarla yapılan cüretli cambazlık olağanüstü parlak bir fikir. Fakat parlaklığı sadece çıkmaz bir sokağı ışıtıyor."

Bu durumdan hiç hoşnut olmadığımı ifade etmeliyim, çünkü bu "iyi kuram" denilen şey denklemlerinde ortaya çıkan sonsuzları göz ardı ediyor, hem de gelişigüzel bir biçimde göz ardı ediyor. Böyle mantıksız matematik olmaz. Mantıklı matematikte bir nicelik küçük çıkarsa göz ardı edilebilir – sırf sonsuz büyüklükte çıktı, siz de böyle bir şey istemiyorsunuz diye göz ardı edilmez!

"Bu Schrödinger denkleminin çözümü yok" diye görüşünü belirttikten sonra Dirac kuramın matematik açısından mantıklı olabilmesi için kuramda *köklü* bir değişiklik olması gerektiğini vurgulayarak sözünü bitiriyor. "Basit değişiklikler işe yaramaz... gerekli değişikliğin Bohr'un kuramından kuantum mekaniğine geçişteki kadar çarpıcı bir değişiklik olacağını hissediyorum." Böyle yeni bir kuramı nerede arayabiliriz? Eğer bu soruya bir cevabım olsaydı şimdi kendi Nobel Ödülümü alıyor olurdum; fakat size bugünkü fizikteki ilginç gelişmelerden, zamanla Dirac'ın iyi bir kuramı oluşturan şeyi sorgulamalarını bile tatmin edebilecek bazılarını gösterebilirim.

BURULMUŞ UZAY ZAMAN

Evrenin doğasını daha iyi anlamaya giden yol belki de fiziksel dünyanın kuantum kuramında bugüne kadar büyük ölçüde ihmal edilmiş kısmında yatıyor. Kuantum mekaniği madde parçacıkları hakkında bize çok şey söylüyor; boş uzay hakkında pek bir şey söylemiyor. Fakat Eddington'ın elli yılı aşkın süre önce *The Nature of The Physical World*'de işaret ettiği gibi bizim katı maddeyi büyük oranda boş uzay olarak gördüğümüz tabloyu yaratan devrim görelilik kuramının getirdiği devrimden daha köklüdür. Benim çalışma masam ya da bu kitap gibi bir katı nesne bile aslında neredeyse hep boşluktan ibaret. Maddenin boşluğa oranı bir kum taneciğinin Albert Hall'a oranından daha da küçüktür. Kuantum kuramının evrenin bu göz ardı edilmiş yüzde 99.99999...'u hakkında söylediği tek şey bunun etkinliklerle, sanal parçacık girdaplarıyla kaynayıp taşan bir şey olduğudur. Ne yazık ki, KED'de sonsuz çözümler ortaya çı-

karan aynı kuantum denklemleri boşluktaki enerji yoğunluğunun da sonsuz olduğunu ve yeniden normalleştirmenin boşluğa bile uygulanması gerektiğini de söylüyor. Daha iyi bir gerçeklik tarifi elde etmek için standart kuantum denklemleri genel görelilik denklemleriyle birleştirildiğinde durum daha da kötüleşir – sonsuzlar yine çıkar, fakat bunlar artık yeniden normalleştirme bile kabul etmez. Belli ki yanlış kapıyı çalıyoruz. Peki ama hangi kapıyı çalmalıyız?

Oxford Üniversitesi'nden Roger Penrose ilerleme kaydetme amacıyla temel noktalara geri döndü. Boşluğun ve boşluktaki parçacıkların ve bizim parçacık olarak algıladığımız bükülmüş uzay-zaman ve burulmuş uzay-zaman parçalarının geometrik bir tarifini çizmenin farklı yollarını araştırdı. Oluşturduğu kurama malum sebeplerden "burulma" [*twistor*] kuramı denir; ne yazık ki sadece matematiği çoğu insan için ulaşılmaz değil, kuramın kendisi de daha çok eksik. Fakat kavram önemli – Penrose bir kuram kullanarak hem minik parçacıkları hem de bu kitap gibi bir katı maddenin içindeki uçsuz bucaksız boşluğu açıklamaya çalışıyor. Yanlış kuram olabilir, fakat büyük ölçüde göz ardı edilmiş bir sorunla bodoslamadan uğraşmak standart kuramın başarısızlıklarının olası bir sebebine ışık tutmaktadır.

Kuantum seviyesindeki uzay-zaman bükülmelerini hayal etmenin başka yolları var. Kütle çekim sabitini, Planck sabitini ve ışık hızını (fiziğin üç temel sabiti) birleştirerek emsalsiz, temel bir uzunluk birimi elde etmek mümkün. Bu da anlamlı olarak tarif edilebilecek en küçük uzay bölgesini temsil eden uzunluğun kuantumu olarak düşünülebilir. Gerçekten de çok küçüktür, yaklaşık 10^{-35} metre ve buna Planck uzunluğu denir. Aynı şekilde temel sabitlerle başka türlü bir oyun oynarsanız sadece bir temel zaman birimi bulabilirsiniz; Planck zamanı, yaklaşık 10^{-43} saniye.[82] Bundan daha kısa herhangi bir zaman aralığından ya da Planck uzunluğundan daha küçük bir uzay boyutundan söz etmek anlamsızdır.

Uzay geometrisindeki kuantum dalgalanmaları atom ölçeklerin-

82. Belki bilmek istersiniz, Planck uzunluğu $G\hbar/c^3$'ün karekökü, Planck zamanı da $G\hbar/c^5$'in karekökü olarak verilir.

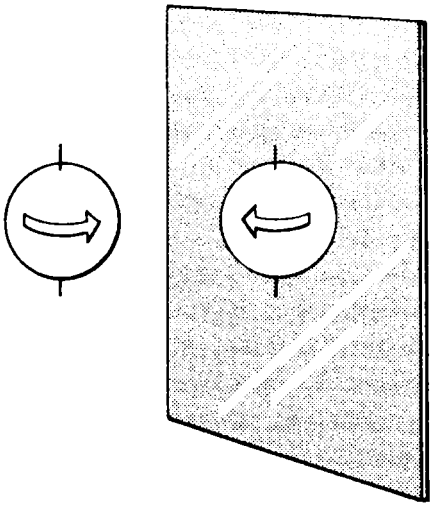
de tamamen göz ardı edilebilir, fakat bu en temel seviyede uzayın kendisi bir kuantum dalgalanmaları köpüğü gibi düşünülebilir – bu fikri geliştirmiş olan John Wheeler bunu çok yükseklerde uçan bir havacıya durgun görünen bir okyanusa benzetiyor, fakat okyanusun fırtınalı, sürekli değişen yüzeyinde oradan oraya çalkalanan bir can-kurtaran sandalı üzerindeki insanlar için durum çok farklıdır.[83] Kuantum seviyesinde uzay-zamanın kendisi uzayın farklı bölgelerini birbirine bağlayan "kurt delikleri" "köprüler"le topolojik bakımdan çok karmaşık olabilir; ya da bu tema üzerine bir çeşitlemeye göre boşluk Planck uzunluğu büyüklüğünde birbirlerine sıkı sıkıya bağlanmış kara deliklerden meydana gelmiş olabilir.

Bunların hepsi belirsiz, yetersiz ve kafa karıştıran fikirler. Burada henüz temel cevaplar yok, bizim "boş uzay"ı anlayışımızın gerçekten karışık, belirsiz ve yetersiz olduğunu fark etmenin bir zararı olmaz. Bütün maddi parçacıkların belki de burulmuş boşluk kırıntılarından ibaret olduğunu düşünmek zihnimizi açar. Eğer bizim "anladığımız" kuramlar çökerse o zaman ilerlemenin henüz anlamadığımız şeylerden gelme ihtimalinin olduğunu varsayarak kuantum geometricilerinin önümüzdeki yıllarda neyle çıkageleceklerine dikkat kesilmemiz ilginç olabilir. Ne var ki 1983'te bilimsel haber bültenlerindeki başlıklar, şu bizim eski bildik parçacık yaklaşımının iki yanıyla ilgiliydi.

KIRILAN SİMETRİ

Simetri fizikte temel bir kavramdır. Örneğin temel denklemlerde zaman simetrisi vardır ve zamanda hem ileriye hem de geriye eşit ölçüde iyi işler. Başka simetriler geometrik anlamda anlaşılabilir. Sözgelişi dönen bir küre bir aynada yansıtılabilir. Kürenin tepesinden aşağıya bakarsanız saatin ters yönünde dönüyormuş gibi görünebilir, bu durumda aynadaki görüntü saat yönünde dönecektir. Fa-

83. Mesela Mehra'nın *The Physicist's Conception of Nature*'ında Wheeler'ın yazısına bkz.



Şekil S.4 Yansıma simetrisi. Kürenin aynadaki dünyadaki dönüşü gerçek dünyadaki dönüşünün zamanı ters çevrilmiş halidir.

kat gerçek küre ve aynadaki görüntü fizik yasalarının izin verdiği biçimlerde hareket eder ki bu anlamda simetriktirler (ve tabii aynadaki küre gerçek kürenin zamanda geriye gitmiş olsa döneceği şekilde dönmektedir. Eğer zaman geriye çevrilse *ve* aynada yansıma yapılsa başladığımız yere döneriz). Doğada başka pek çok simetri vardır. Bunların bazısını gündelik dille anlamak kolaydır – örneğin elektron ve pozitron birbirinin aynadaki yansıması olarak görülebilir, tıpkı zaman tersine döndüğündeki ikisini de birbirlerinin karşılıkları olarak düşünmek gibi. Ters pozitif yük negatif bir yüktür. Uzaydaki bu yansıma fikirleri (parite değişikliği denir, çünkü solu sağla değiştirir), zamandaki yansıma ve yük yansıması hep birlikte fizikteki en güçlü temel ilkeleri meydana getirir. Buna PCT [*Parity, Charge conjugation, Time reversal* – parite, yük eşleniği, zaman tersinirliği] teoremi denir, buna göre *bunların üçünün* de aynı zamanda yansımış karşılıklarına dönüştürülmesi durumunda fizik yasalarının *etkilenmemesi* gerekir. Bir parçacık yayımının onun karşı-

parçacık eşinin soğrulmasına tamamen denk olduğu varsayımının temeli bu PCT teoremidir.

Fakat öteki simetrilerin gündelik dille kavranması çok daha zordur ve tam olarak anlamak için matematik dili gerektirir. Ne var ki parçacık cephesinden gelen son haberleri anlamak için bu simetriler hayati önem taşır, o yüzden şu basit fiziksel örneği düşünün: Bir merdivende dengede duran bir top hayal edin. Topu başka bir basamağa hareket ettirirsek, içinde oturduğu kütle çekim alanındaki potansiyel enerjisini değiştiririz. Topu nasıl hareket ettirirsek ettirelim fark etmez – tekrar yerine koymadan önce onu dünya turuna çıkarabiliriz ya da roketle Mars'a gönderebiliriz. Potansiyel enerjideki değişikliği belirleyen tek şey iki basamağın yükseklikleridir, topun başladığı ve en son koyulduğu iki basamak. Potansiyel enerjiyi nerede ölçmeyi tercih edeceğimizin de önemi yoktur. Ölçümlerimizi zemin katta yapıp her basamağa büyük bir potansiyel enerji verebiliriz ya da iki basamağın alçak olanından ölçebiliriz ki bu durumda o basamak sıfır potansiyel enerjili bir duruma karşılık gelir.[84] İki durum arasındaki potansiyel enerji *farkı* hâlâ aynıdır. Bu bir tür simetridir, ölçüm yaptığımız taban hattını "yeniden ayarlamak" mümkün olduğu için bu tür simetriye "ayar simetrisi" denir.

Aynı şey elektrik kuvvetlerinde de olur. Maxwell'in elektromanyetizması sonuç olarak zaman değişimsizdir ve KED de bir ayar kuramıdır, tıpkı KED'e göre modellenmiş KKD gibi. Sorunlar kuantum seviyesinde madde alanlarıyla ilgilenirken çıkıyor, fakat bütün bunlar ayar simetrisi gösteren bir kuramla tatmin edici biçimde açıklanabilir. Fakat KED'in en önemli özelliklerinden biri fotonun kütlesinin sıfır olmasından dolayı sadece ayar simetrisine sahip olmasıdır. Eğer fotonun bir kütlesi olsaydı, öyle anlaşılıyor ki kuramı yeniden normalleştirmek imkânsız olurdu ve sonsuzlarla kalakalırdık. Bu, fizikçiler elektromanyetik etkileşimin başarılı ayar kuramını, zayıf çekirdek etkileşiminin –başka şeylerin yanı sıra radyoaktif bozunma ve radyoaktif çekirdeklerden beta parçacıklarının (elektronlar)

84. Bu büyük oranda Paul Davies'in kitabında kullandığı yaklaşımdan alınmıştır (*The Forces of Nature*, Cambridge University Press, 1979).

yayımından sorumlu süreç– benzer bir kuramını kurmada model olarak kullanmaya çalıştıkları zaman bir sorun oluyor. Tıpkı elektrik kuvvetinin foton tarafından taşınması ya da aracılık edilmesi gibi öyle görünüyor ki zayıf kuvvet de kendi bozonlarının aracılığına ihtiyaç duyuyor. Fakat durum daha karışık çünkü zayıf etkileşimler sırasında elektrik yükünün nakledilebilmesi için zayıf bozonun (zayıf alanın "fotonu") yük taşıması gerekir. Yani aslında bu parçacıklardan en az iki tane olması şarttır, bunlara W^+ ve W^- adları verilir ve zayıf etkileşimler yük aktarma işine her zaman karışmadığı için kuramcıların üçüncü bir aracıyı yardıma çağırıp zayıf foton grubunu tamamlaması gerekmiştir. Bu da yüksüz Z bozonudur.

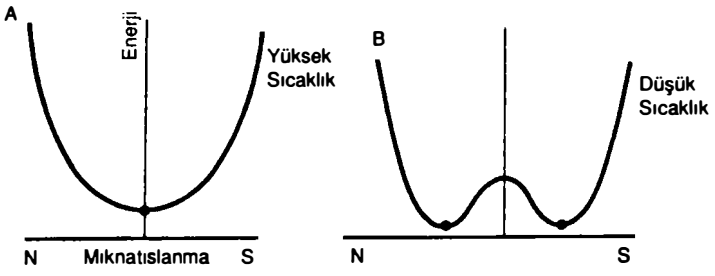
Zayıf etkileşim, iki W parçacığı[85] ve yüksüz Z ile ilgili doğru matematiksel simetriler ilk defa Harvard Üniversitesi'nden Sheldon Glashow tarafından 1960'ta çözülmüş ve 1961'de yayımlanmıştır. Glashow'un kuramı tamamlanmış değildi, fakat bir kuramın ileride hem zayıf hem de elektromanyetik etkileşimleri birleştirme ihtimaline bir ışık yakıyordu. Asıl sorun şu ki, kuram fotonun aksine W parçacıklarının sadece yük taşımalarını değil kütleye de sahip olmalarını gerektiriyor, ki bu da kuramın yeniden normalleştirilmesini imkânsız kılıyor ve aynı zamanda fotonun kütlesiz olduğu elektromanyetizmayla olan analojiyi de ortadan kaldırıyor. Bu parçacıkların kütleleri olmak zorunda çünkü zayıf etkileşimin çok kısa bir erimi var – eğer kütlesiz olsalardı erim sonsuz olurdu, tıpkı elektromanyetik etkileşim erimi gibi. Ne var ki, kütlenin kendisi parçacıkların spin'leri kadar sorun yaratmıyor. Foton gibi kütlesiz bütün parçacıklar kuantum kurallarından dolayı spin'lerini sadece hareket yönlerine paralel ya da zıt yönde taşıyabilirler. Kütleli bir parçacık, mesela W da spin'ini hareket yönüne dik taşıyabilir, işte bütün sorunlara sebep olan da bu fazladan spin durumudur. W parçacıkları kütlesiz olsalardı o zaman fotonla W parçacığı arasında bir tür simetri olurdu, dolayısıyla zayıf etkileşim ile elektromanyetik etkile-

85. W^+ ve W^- tabii bir parçacıkla karşı-parçacığı olarak da düşünülebilir, tıpkı elektron (e^-) ve pozitron (e^+) gibi. Kafanız yeterince karışmadıysa W'nun başka bir adı daha var: Ara vektör bozonu.

şim arasında da. O zaman onları birleştirip iki kuvveti de açıklayan yeniden normalleştirilebilir tek bir kuram haline getirmek mümkün olurdu. Sorunların çıkması bu simetrinin "kırılması"ndan dolayıdır.

Matematiksel bir simetri nasıl kırılır? En iyi örnek manyetizmadan verilebilir. Manyetik bir metal parçasını, her biri tek tek atomlara karşılık gelen muazzam sayıdaki minicik iç mıknatıslardan oluşuyormuş gibi düşünebiliriz. Manyetik madde sıcakken bu minik iç mıknatıslar etrafta rasgele dönüp birbirlerine çarparlar ve her yöndedirler ve manyetik çubukta bir toplam manyetik alan söz konusu değildir – manyetik simetri yoktur. Fakat çubuk Curie sıcaklığı denen belli bir sıcaklığın altına kadar soğutulduğunda birden manyetiklenmiş duruma geçer, içerideki bütün mıknatıslar birbirleriyle hizaya gelir. Yüksek sıcaklıkta en düşük mevcut enerji durumu sıfır manyetikleşmeye karşılık gelir; düşük sıcaklıkta en düşük enerji durumu içteki mıknatısların hizaya gelmesiyle olur (ne tarafa doğru hizada olduklarının önemi yok). Simetri kırılmıştır ve değişikliğin olmasının sebebi yüksek sıcaklıklarda atomların ısıl enerjilerinin manyetik kuvvetlere üstün gelmesidir, düşük sıcaklıklardaysa manyetik alanlar atomların ısıl çalkalanmalarının üstesinden gelir.

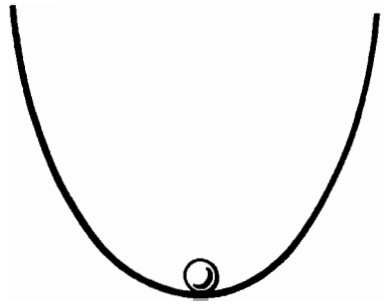
1960'ların sonlarında Londra Imperial College'da çalışan Abdus Salam ve Harvard'da Steven Weinberg birbirinden bağımsız olarak birer zayıf etkileşim modeliyle çıkageldiler; bu modeli 1960'ların başlarında Glashow'un ve birkaç yıl sonra da ondan bağımsız olarak Salam'ın kurduğu matematiksel simetriden geliştirmişlerdi. Yeni kuramda simetri kırmak, yeni bir alan, Higgs alanı gerektiriyor, bir de bununla bağlantılı parçacıkları, yine Higgs parçacıklarını. Elektromanyetik ve zayıf etkileşimler tek bir simetrik ayar alanında birleşirler ve ortaya kütlesiz aracı bozonlu elektrozayıf etkileşim çıkar. Daha sonra 1971'de Hollandalı fizikçi Gerard t'Hooft'un çalışmasıyla bunun yeniden normalleştirilebilir bir kuram olduğu gösterilmiştir ve bu noktada insanlar kuramı ciddiye almaya başlamışlardır. Z parçacığının kanıtlarının 1973'te ortaya çıkmasıyla elektrozayıf kuram kesin biçimde tesis edilmiş oldu. Birleşik etkileşim sadece çok yüksek enerji yoğunluğu şartlarında "işler", mesela Büyük Patlama şartlarında ve düşük sıcaklıklarda kendiliğinden öyle bir



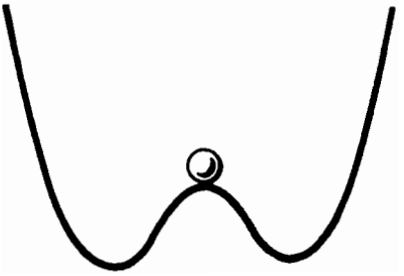
Şekil S.5 Bir manyetik çubuk soğutulunca simetri kırılması meydana gelir.

kopar ki devasa W ve Z parçacıkları ortaya çıkar ve elektromanyetik ve zayıf etkileşimler kendi yollarına giderler.

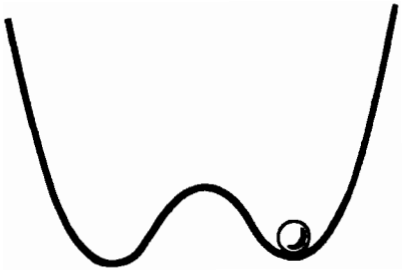
Bu yeni kuramın önemi Glashow, Salam ve Weinberg'in bundan dolayı 1979'da Nobel Fizik Ödülü'nü paylaşmalarından anlaşılabilir, hatta o sıralarda fikirlerinin doğru olduğuna dair doğrudan bir deneysel kanıt da yoktu. Fakat 1983'ün başlarında Cenevre'deki CERN ekibi, en iyi, sırasıyla yaklaşık 80 GeV ve 90 GeV kütlelerine sahip W ve Z parçacıklarıyla ifade edilebilecek çok yüksek enerjilerdeki (yüksek enerjili bir proton demetinin yüksek enerjili karşıproton demetiyle kafa kafaya çarpıştırılmasıyla elde edilmiş) parçacık deneylerinin sonuçlarını duyurdular. Bu sonuçlar, kuramın öngörülerine gayet güzel uyuyordu. Glashow-Salam-Weinberg kuramı "iyi" bir kuramdır çünkü test edilebilen öngörülerde bulunur, oysa Glashow'un önceki kuramı bulunmuyordu. Bu arada kuramcılar boş durmuyorlardı. Eğer iki etkileşim tek bir kuramda birleşebilirse, neden bütün temel etkileşimleri içerecek bir büyük birleşik kuram olmasındı? Einstein'ın rüyası gerçekleşmeye her zamankinden daha yakın, sadece simetri bakımından değil, süpersimetri ve süper kütle çekimi bakımından da.



Kararlı
Simetri



Kararsız
Simetri



Kırılmış
Simetri

Şekil S.6 Şekil S.5'teki manyetik simetrinin kırılışı bir vadideki top örneğiyle anlaşılabilir. Tek bir vadi varken top kararlı, simetrik bir durumdadır. İki vadi varsa simetrik durum kararsızdır ve top pek de gecikmeden vadilerden birine ya da ötekine düşüp simetriyi kıracaktır.

SÜPER KÜTLE ÇEKİMİ

Ayar kuramlarının sorunu, yeniden normalleştirme zorluğu dışında, bunların emsalsiz olmamalarıdır. Tıpkı sonsuzlar içeren belli bir ayar kuramının gerçekliğe uyması için yeniden normalleştirme yoluyla kesilip biçilmesi gerektiği gibi, sonsuz sayıda olası ayar kuramı vardır ve fizik etkileşimlerini tarif etmek için seçilenler gerçek dünyadaki gözlemlenişine uyması için aynı şekilde, eşit ölçüde *ad hoc* olarak kesilip biçilmek zorundadır. Daha kötüsü, ayar kuramlarında kaç tür farklı parçacık olması gerektiğini söyleyen bir şey yoktur – kaç tane baryon ya da lepton (elektronla aynı parçacık ailesinden) ya da ayar bozonu ya da her ne ise. İdealde fizikçiler fiziksel dünyayı açıklamak için sadece belli sayıdaki belli tür parçacıkları gerektiren emsalsiz bir kuram bulmak isterler. Böyle bir kurama doğru atılan ilk adım 1974'te süpersimetrinin icadıyla geldi.

Bu fikir Karlsruhe Üniversitesi'nden Julius Wess ile Berkeley' deki Kaliforniya Üniversitesi'nden Bruno Zumino'nun çalışmasından gelmiştir. İkisi de ideal biçimde simetrik olan bir dünyanın nasıl olması gerektiğiyle ilgili bir tahminden –her fermiyonun aynı kütleye sahip bir eş bozonu olması gerektiği tahmininden– yola çıkmıştı. Gerçekten doğada böyle bir simetri görmeyiz, fakat bunun açıklaması simetrinin kırılmış olması olabilir, tıpkı elektromanyetik ve zayıf etkileşimleri içeren simetride olduğu gibi. Tabii buradaki matematiği sonuna kadar götürürseniz Büyük Patlama sırasında var olan fakat sonra gündelik fizik parçacıklarının süper eşleri çok büyük kütlelerle kalmışken kendilerinin küçük kütle kazanacakları biçimde bozulan süpersimetrileri tarif etmenin yolları olduğunu öğrenirsiniz. O zaman süper parçacıklar sadece çok kısa süreliğine var olup sonra parçalanarak daha az kütleli bir parçacık yağmuruna döner; bugün süper parçacık yaratmak için Büyük Patlama'daki gibi şartlar oluşturmamız gerekir ki gerçekten çok yüksek enerjilerdir bunlar ve CERN'deki proton/karşı-proton demetlerinin çarpışması bile bunları oluşturamazsa şaşmamak gerek.

Bütün bunlar pek bir "karanlık". Fakat büyük bir artısı var. Hâlâ temanın çeşitlemeleri kabilinden farklı türde süpersimetrik alan kuramları var, fakat simetrinin sınırlandırılması kuramın her bir versiyonunun sadece belli sayıda farklı tür parçacıkların var olmasına izin veriyor demektir. Bazı versiyonlar yüzlerce farklı temel parçacık içerir, ki yıldırıcı bir durum, bazılarının da çok daha azına yeri vardır ve kuramlardan hiçbiri sonsuz sayıda bir "temel" parçacık ihtimalini öngörmez. Hatta parçacıklar her bir süpersimetri kuramında derli toplu bir şekilde aile gruplarına göre toplanırlar. En basit versiyonda sıfır spin'li sadece tek bir bozon ve spin-1/2 eşi vardır; daha karmaşık bir versiyonda iki spin-1 bozon, bir spin-1/2 fermiyon ve spin 3/2'li bir fermiyon vardır ve bu böyle devam eder. Fakat daha en iyi haberi vermedim. Süpersimetrilerde yeniden normalleştirmeyi her zaman dert etmek zorunda değilsiniz. Bu kuramlardan bazılarında sonsuzlar matematik kurallarına doğru dürüst uyarak ve geriye mantıklı sonlu sayılar bırakarak otomatik olarak birbirini götürür, *ad hoc* olarak değil.

Süpersimetri iyi görünüyor, fakat daha nihai cevap değil. Hâlâ eksik bir şeyler var ve fizikçiler bunun ne olduğunu bilmiyor. Farklı kuramlar gerçek dünyanın farklı özelliklerine gayet iyi uyuyorlar, fakat hiçbir tek süpersimetri kuram gerçek dünyanın tamamını açıklayamıyor. Yine de, özellikle sözünü etmeye değer belli bir süpersimetri var. Buna $N = 8$ süper kütle çekimi deniyor.

Bu süper kütle çekimi, kütle çekim alanını taşıyan ve graviton denen varsayımsal bir parçacıkla başlar. Onun yanı sıra gravitino denilen sekiz parçacık daha ("$N = 8$" işte buradan geliyor), kuarklar ve elektronlar gibi 56 tane "gerçek" parçacık ve etkileşime aracılık yapan 98 parçacık (fotonlar, W'lar ve çok daha fazla gluonlar) vardır. Bu kayda değer sayıda parçacık demektir, fakat bu tamı tamına kuram tarafından belirleniyor, başka hiçbirine yer yok. Kuramı test ederken fizikçilerin karşı karşıya kaldıkları güçlükler gravitinoları düşünerek görülebilir. Bunlar hiç tespit edilmemiştir ve bunun neden böyle olması gerektiğine dair iki tane taban tabana zıt sebep var. Gravitinolar belki de hiçbir şeyle etkileşmeyen çok az kütleli ele avuca gelmeyen, hayaletvari parçacıklardır. Ya da belki o kadar

büyük kütleleri vardır ki bugünkü parçacık makineleri onların yaratılıp gözlemlenmesi için gerekli enerjiyi sağlamaya yetmemektedir.

Sorunların sonu gelmez, fakat süper kütle çekimi gibi kuramlar en azından tutarlı, sonludur ve yeniden normalleştirilmeye gerek duymazlar. Fizikçilerin doğru yolda olduğuna dair bir hissiyat var ortamda. Fakat parçacık hızlandırıcıları kuramları test etmeye yeterli değilse bundan nasıl emin olabiliyorlar? İşte kozmoloji –bütün evrenin incelenmesi– bu yüzden bugün bilimin parlayan bir alanıdır. New York Bilimler Akademisi sorumlu idarecisi Heinz Pagels'in 1983'te söylediği gibi "hızlandırıcı-sonrası fizik dönemine çoktan girdik ve bu dönemde evrenin bütün tarihi, temel fiziğin ispat zemini haline gelmiştir"[86] Kozmologlar da parçacık fiziğini kucaklama konusunda en az bu kadar hevesliler.

EVREN BOŞLUK DALGALANMASI MI?

Kozmoloji belki de gerçekten parçacık fiziğinin bir dalıdır. Zira, son on yılda ya da öyle bir süre boyunca tamamen deli saçması olmakla başlayıp çılgın olmanın getirdiği yarı saygınlığa kadar gelişme katetmiş bir fikre göre evren ve içindeki her şey, parçacık öbeklerinin hiç yoktan ortaya çıkmasına, bir süre yaşayıp tekrar boşluğun içine soğurulmasına izin veren o boşluk dalgalanmalarından biridir, ne eksik, ne fazla. Bu fikir evrenin kütle çekimsel bakımdan kapalı olduğu ihtimaline sıkı sıkıya bağlıdır. Bir Büyük Patlama içindeki ateş topunda doğan, bir süre genişleyip sonra tekrar kasılarak bir ateş topu halini alarak ortadan kaybolan bir evren bir boşluk dalgalanmasıdır, fakat çok büyük bir ölçekte. Eğer evren belirsiz bir genişlemeyle nihai bir yeniden çöküş arasındaki kütle çekimsel sınırda tam olarak dengelenmişse, o zaman evrenin negatif kütle çekimsel enerjisi, içindeki bütün maddenin pozitif kütle enerjisiyle kesin olarak yok ediyor olmalıdır. Kapalı bir evrenin toplam enerji-

86. *Science*, 29 Nisan 1983, cilt 220, s. 491.

si sıfırdır ve bir boşluk dalgalanmasından toplam enerjisi sıfır olan bir şey yapmak zor değildir, bütün parçaların birbirinden uzaklaşarak genişlemesi ve geçici olarak çevremizde gördüğümüz bütün ilginç çeşitliliğe izin vermesi bayağı şık bir hile olsa da durum budur.

Bu fikir özellikle hoşuma gidiyor çünkü 1970'lerde bunun modern biçimiyle ortaya çıkışında payım olmuştu. Fikrin özgün hali modern termodinamiğin ve istatistiksel mekaniğin kurucularından on dokuzuncu yüzyıl fizikçisi Ludwig Boltzmann'a kadar gider. Boltzmann, evrenin termodinamik denge içinde olması gerektiğinden, ama görüldüğü haliyle öyle olmadığından dolayı şu anki görünüşünün dengeden geçici bir süre sapması sonucu olabileceği tahmininde bulunmuştu. Uzun vadede dengenin sağlanması şartıyla istatistik kuralları ortalama olarak buna izin veriyordu. Görünen evren ölçeğinde böyle bir dalgalanmanın meydana gelme şansı çok zayıftır, fakat eğer evren sonsuz bir süre kararlı bir biçimde var olduysa o zaman ileride meydana gelecek türden bir şeyin neredeyse bir kesinliği olacaktır ve ancak dengeden sapmak hayatın var olmasına izin vereceğinden evrenin dengeden nadiren uzaklaştığı bir sürede burada olmamız şaşılacak bir şey olmasa gerek.

Boltzmann'ın görüşleri hiç destek görmedi, fakat tema üzerindeki çeşitlemeler zaman zaman ortaya çıkmaya devam etti. 1971'de benim hoşuma giden ve *Nature*'da yazdığım çeşitleme evrenin ateşte doğup, genişlediği ve sonra çökerek bir hiç olacağı ihtimaliydi.[87] İki yıl sonra New York Şehir Üniversitesi'nden Edward Tryon *Nature*'a gönderdiği bir makalede Büyük Patlama'nın bir boşluk dalgalanması olduğu fikrini geliştiriyordu, fakat ilişikteki mektupta bu spekülasyonları benim imzasız yazım sayesinde yaptığını belirtiyordu.[88] Diyeceğim, bu kozmoloji modeline benim de özel bir ilgim var, ama tabii evrenin boşluk dalgalanması olduğu şeklindeki modern fikrin bütünüyle Tryon'a mal edilmesi doğrudur. Bu fikri daha önce başka hiç kimse düşünmemişti, fakat Tryon'ın o zaman işaret ettiği gibi eğer evrenin sıfır net enerjisi varsa,

87. *Nature*, cilt 232, s. 440, 1971.
88. *Nature*, cilt 246, s. 396, 1973.

$$\Delta E \Delta t = \hbar$$

denklemiyle uyum içinde var olmasına izin verilen zaman miktarı gerçekten çok uzun olabilir. "Bizimki gibi evrenlerin sık meydana geldiğini iddia etmiyorum, sadece beklenen sıklığın sıfır olmadığını söylüyorum," demiştir. "Fakat bu durumun mantığı şunu zorunlu kılıyor: Gözlemciler kendilerini daima hayat üretmeye gücü yeten evrenlerde bulacaklardır ve böyle evrenler fevkalade büyüktür."

On yıl boyunca bu fikir göz ardı edildi. Fakat son zamanlarda insanlar bunun başka bir versiyonunu ciddiye almaya başladılar. Tryon'un başlangıçtaki umutlarına rağmen hesaplar bir boşluk dalgalanması olarak oluşan herhangi bir yeni "kuantum evrenin" minik, sadece küçük bir uzay-zaman hacmini işgal eden kısa ömürlü bir fenomen olacağını öngörüyordu. Fakat sonra kozmologlar bu minnacık evrenin kaşla göz arasında müthiş bir şekilde genişleyerek şimdi içinde yaşadığımız evren boyutuna geleceği bir yol keşfettiler. "Şişme" 1980'lerde kozmolojinin moda kelimesidir ve şişme, nasıl minik bir dalgalanmanın genişleyip yaşadığımız evren kadar olabileceğini açıklar.

ŞİŞME VE EVREN

Kozmologlar evrende var olması muhtemel fazladan parçacıklarla zaten ilgileniyorlardı, çünkü evreni kapalı yapmak için gereken "kayıp kütle" için zaten sürekli gözlerini dört açıyorlar. Her parçacık için yaklaşık 1,000 eV'lik kütleye sahip gravitinolar özellikle işe yarayabilirdi – sadece evreni kapatmaya yetmekle kalmayıp, aynı zamanda evrenin Büyük Patlama'dan genişlemesini tarif eden denklemlere göre böyle parçacıkların varlığı galaksi boyutunda madde kütlelerini oluşturmak için tam uygun olacaktı. Her biri yaklaşık 10 eV kütleye sahip nötrinolar galaksi öbekleri boyutunda madde kütlelerinin gelişmesine tam yardım etmeye uygun olacaktı ve böyle şeyler. Fakat son birkaç yıl içinde kozmologlar parçacık fiziğiyle

daha da ilgilenir oldular, çünkü simetri kırılmasının son yorumu bizim uzay-zaman kabarcığımızın bu genişleyen durumuna gelmesine kırılan simetrinin kendisinin itici güç oluşturduğu yönündedir.

Bu fikir ilkin Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nden Alan Guth' dan gelmiştir. Bu, bütün fizik etkileşimlerinin (kütle çekimi hariç; kuram henüz süpersimetriyi içermiyor) bir simetrik etkileşim içinde birleştiği çok sıcak, çok yoğun bir evren dönemi tablosuna kadar gider. Evren soğumaya başlayınca simetri bozulmuş ve doğanın temel kuvvetleri –elektromanyetizma, güçlü ve zayıf çekirdek kuvvetleri– kendi yollarına gitmişlerdi. Belli ki evrenin iki durumu, yani simetri kırılmasından önce ve sonrası birbirinden çok farklı. Bir durumdan ötekine değişim bir tür hal değişimidir, suyun soğutulunca buza ya da kaynatılınca buhara dönüşmesi gibi. Fakat, gündelik hal değişimlerinin aksine evrenin ilk zamanlarındaki simetri kırılması kurama göre muazzam ölçüde itici kütle çekim kuvveti yaratmış ve her şeyi saniyenin kimbilir kaçta birinde etrafa saçmıştır.

Evrenin daha ilk safhalarından söz ediyoruz, "sıcaklığın" 10^{28} K olmasından 10^{-35} saniye öncesinden, tabii böyle bir durumda sıcaklığın bir anlamı varsa. Simetri kırılmasının yarattığı genişleme her 10^{-35} saniyede bir, her bir minik hacmi ikiye katlayıp geometrik olarak artmış olmalıdır. Bir saniyeden çok daha kısa bir zaman içindeki bu ani genişleme bir proton büyüklüğünden bugün gözlemlenen evren büyüklüğüne şişmiştir. Sonra uzay zamanın o genişleyen bölgesi içinde, bizim normal uzay zaman olarak düşündüğümüz kabarcıklar başka bir safha geçirerek gelişip büyürler.

Guth'ın ilk şişen evren versiyonu ilk minik kabarcığın nereden geldiğini açıklamaya yeltenmemişti. Fakat bunu Tryon'un tarif ettiği boşluk dalgalanmasıyla eş tutmadan edemiyor insan.

Bu müthiş evren görüşü pek çok kozmolojik muammayı çözer, özellikle de bizim uzay-zaman kabarcığımızın açıkla kapalı arasındaki sınır çizgisinde seyredecek hızda genişliyor görünmesi tesadüfünü. Şişen evren senaryosu bu dengenin, kabarcığın kütle/enerji yoğunluğuyla şişme kuvveti arasındaki ilişkiden dolayı takılı kalmış olmasını *gerektirir*. Daha da baş döndüren şey, bize evrende çok önemsiz bir rol verir, evrende görebildiğimiz her şeyi daha bü-

yük genişleyen bir bütünün içindeki baloncuğun içindeki bir baloncuğa yerleştirir.

Heyecan verici zamanlarda yaşıyoruz, anlaşılan Dirac'ın tahmin ettiği gibi evren anlayışımız Bohr atomundan kuantum mekaniğine geçişteki adım kadar önemli bir adımla bir çığır açılmasının eşiğinde. Schrödinger'in kedisini arayışımın Büyük Patlama'yla, kozmolojiyle, süper kütle çekimi ve şişen evrenle bitmesini özellikle ilginç buluyorum çünkü önceki kitaplarımdan biri olan *Space-warps*'da işe kütle çekimi ve genel göreliliğin hikâyesiyle başlayıp aynı yerde bitirmiştim. İkisinde de baştan planlanmış bir şey değildi; ikisinde de süper kütle çekimi son nokta gibi görünüyor ve belki de bu, kuantum kuramı ile kütle çekiminin birleşmesinin ufukta göründüğüne dair bir işarettir. Fakat henüz sorunsuz temiz bir son yok, umarım asla da olmaz. Richard Feynman'ın dediği gibi "Bilimi durdurmanın yollarından biri sadece yasasını bildiğiniz bir bölgede deney yapmak olurdu." Fizik bilinmeyeni araştırma işidir ve:

> Bize lazım olan hayal gücüdür, fakat korkunç bir deli gömleği içindeki hayal gücü. Bilinen her şeyle uyuşacak, fakat öngörülerinde bir yerlerde uyuşmayacak yeni bir dünya görüşü bulmak zorundayız, aksi halde ilginç olmaz. O uyuşmadığı noktada da doğayla uyuşması gerekir. Eğer önceden gözlemlenmiş bütün bir yelpazeyi kâpsayan her şeyle uyuşan ama başka bir yerde uyuşmayan farklı bir dünya görüşü bulabilirseniz, işte o zaman büyük bir keşif yapmışsınız demektir. Neredeyse imkânsızdır, fakat tamamen değil...[89]

Eğer fiziğin işi bitecek olursa dünya yaşanılması çok daha az ilginç bir yer olacaktır, sizi boşlukta, iç gıcıklayan imalarla ve daha anlatılmamış, her biri Schrödinger'in kedisi hikâyesi kadar ilginç hikâyelerle bırakmamın sebebi de budur.

89. *The Character of Physical Law*, s. 171.

Kaynakça

Bunlar Schrödinger'in kedisi hakkındaki gerçeği araştırdığım sırada okuduğum kitaplardır. Kuantum kuramıyla ilgili kapsamlı bir kaynakça yazmak için işe koyulmadım ve konunun uzmanları burada bulmayı umacakları bazı başlıkların olmadığını mutlaka fark edeceklerdir. Ne var ki, bir atıf sizi başka birine götürdüğü için aşağıdaki seçkilerden bir yerden başlayıp kafanıza göre devam ederseniz kuantum kuramı ve daha pek çok şey hakkında yazılmış önemli olan ne varsa bulabilirsiniz. Olgulara ilişkin metinler dışında, eğlendirici olmalarının yanı sıra kuantum temaları, özellikle paralel dünyalar fikri hakkında bilgi de veren bilimkurgu kitapları seçkisi de ekledim sona.

KUANTUM KURAMI

A. d'Abro, *The Rise of the New Physics*, ikinci cilt, Dover, New York, 1951 (özgün basım 1939).
Uzman olmayanlar için kapsamlı ilk çalışmalardan. Birinci cilt tarihsel ve matematiksel arka planı ele alıyor, o yüzden ikinci cilt tamamen kuantum kuramı hakkında. Eski moda üslup modern okuru biraz zorlar, fakat konuyu etraflıca ele almış (iki cilt toplam 982 sayfa), matematik yanının bir kısmını anlamaya gayret edecek kadar istekliyseniz bakmaya değer.

Kenneth Atkins, *Physics-Once Over-Lightly*, Wiley, New York, 1972.
Ana dalları bilim olmayan üniversite öğrencileri için bir sömestrlik fizik ders kitabı olarak yazılmış, fakat daha sıradan okur için de değeri olacak kadar ilginç ve açık. Bilim adamı olmayanlar için ciddi bir fizik kılavuzu, türünün en iyisi ve okuru basit başlangıçlardan göreliliğe, kuantum mekaniğine, atom çekirdeklerine ve parçacıklara sürüklüyor. Felsefi içerimlerine ve kuantum gerçekliğinin anlamına şöyle bir dokunulup geçiliyorsa da, denklemlere birkaç sayı ilave etmeyi denemek isteyen herkese kuantum aşşılığının temellerini açık bir şekilde sunuyor. Şiddetle tavsiye edilir.

Ted Bastin (yayıma hazırlayan), *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge University Press, New York, 1971.
1968'de, kuantum kuramında önemli bir "paradigma kayması"nın yakın olup olmadığı ihtimalini değerlendirmek için Cambridge'de düzenlenen gayri resmi bir kolokyumun bildirilerine dayalı bir eser. Genellikle ağır gidiyor ve burada sözü geçen kitapların çoğundan daha felsefi.

Max Born, *The Restless Universe*, Dover, New York, 1951.
Kuantum kuramının gelişiminde önde gelen simalardan birinin ağzından yeni fiziğin en iyi çağdaş anlatımı. Kuantum mekaniği tarihi değil, fakat fizik hakkında "popüler" bir kitap, ayrıca Born'un daha sonra Nobel Ödülü aldığı istatistiksel yorumun sokaktaki adam için yazılmış ilk örneklerinden biri de var. Bir de dinamik süreçleri göstermek için yarım yüzyıl önce, sayfa köşelerine animasyon çizimlerinden koyulmuş olması dikkate değer.

Max Born, *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, Londra, 1971.
İki müthiş adamın yazışmaları, Born'un yorumlarıyla. Kuantum kuramı ve Einstein'ın Kopenhag yorumunu kabullenmekteki gönülsüzlüğüne dair bazı ilginç yan bilgiler de var.

Louis de Broglie, *Matter and Light*, Norton, New York, 1939 (1937'de yayımlanan Fransızca basımının çevirisi; karton kapaklı baskısı da Dover'dan çıktı).
Genel olarak tarihle ilgili; yeni fiziğin doğuşunun, katılımcılarından birinin ağzından günü gününe sayılabilecek öyküsü.

Louis de Broglie, *The Revolution in Physics*, Greenwood Press, New York, 1969.
Başka, çok daha eski bir Fransızca kitabın pek iyi çevrilmemiş İngilizce versiyonu, fakat bu da tarihle ilgili.

Fritjof Capra, *The Tao of Physics*, Bantam, New York, 1980. (Türkçesi: *Fiziğin Tao'su*, çev. Kaan H. Ökten, Arıtan, İstanbul, 1993).
Modern parçacık fiziğiyle doğu felsefesini, mistisizmi ve dini ilişkilendiren yeni dalga kitapların ilki. Capra fizikçi ve temel kuantum fikirlerini içeren, ilgi uyandıran bir hikâye örüyor, fakat tarihsel bir bağlamda değil.

Jeremy Cherfas, *Man Made Life*, Blackwell, Oxford, 1982.
Genetik mühendisliğinin, potansiyelinin ve sınırlarının gizemlerine kolay bir "giriş" niteliğinde.

Barbara Lovett Cline, *The Questioners*, Crowell, New York, 1965.
Kuantum mekaniği hikâyesinin yaşam öyküleriyle anlatımı – Rutherford, Planck, Einstein, Bohr, Pauli ve Heisenberg hakkında birer bölüm var. Okunulası bir kitap, bol anekdot var, fakat fizik asgari düzeyde.

Francis Crick, *Life Itself*, Simon & Schuster, New York, 1982.
Canlı moleküllerinin doğasına kolay bir giriş. Yeryüzündeki hayatın evrenin başka bir yerinden gelmiş olabileceği spekülasyonu yapılıyor.

Paul Davies, *The Accidental Universe*, Cambridge University Press, New York, 1982.

Bizim burada olmamıza yol açan pek çok kozmik "tesadüf"ün açık seçik ama matematiksel anlatımı, kuantum mekaniğinin Everett yorumunun antropik ilkeyle bağlantısına da kısaca değiniliyor. Aynı yazardan *Other Worlds* (Dent, Londra, 1980), antropik ilkenin matematik içermeyen "popüler" anlatımını ana tema olarak almış.

Bryce DeWitt ve **Neill Graham**, yayıma hazırlayanlar, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1973.
Birçok dünya kuramının temelini oluşturan kilit öneme sahip makalelerin tıpkıbasım koleksiyonu. Kitap Everett'in doktora tezini, Everett ve Wheeler'ın *Reviews of Modern Physics*'de 1957'de yayımlanmış olan makalelerini ve DeWitt ile Graham'ın daha sonra kuramı geliştirme ve popülerleştirme girişimlerini ve başka katkıları içermekte. Bütün bu patırtı gürültünün niye koparıldığını özetleyen derli toplu bir kitap.

Paul Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, New York, 1982.
Ciddi öğrenci için nihai bir metin, bugün bile. Defalarca gözden geçirilip güncellenen kitapta kuantum elektrodinamiği üzerine bir kısım açılmış. Ayrıca giriş bölümleri belirlenemezliği, üst üste binmeyi ve kuantum mekaniğine duyulan ihtiyacı rahat anlaşılan durulukla tartışıyor. Ciddi bir öğrenci değilseniz bile ilk bölümü okumak için kütüphaneden ödünç almaya değer; ama ciddi bir öğrenciyseniz, Dirac'ın Schrödinger ve Heisenberg yorumlarına meselenin matematiğin*den* yaklaşması konunun bugün genellikle öğretildiği halinden daha mantıklı ve anlaşılır.

Paul Dirac, *Directions in Physics*, Wiley, New York & Londra, 1978.
1975'te Avustralya ve Yeni Zelanda'da verilmiş konferanslar. 1920'lerde kuantum mekaniğini geliştirmiş grubun son hayatta kalan üyesinin görüşü olarak paha biçilmez değerde; Dirac'ın eğlendirici ve anlaşılır konferanslarının doğrudan yazılı dökümü olduğu için de değerini ikiye katlıyor. Bugünkü fiziğin tamamlanmamış oluşunu gözler önüne seren değişken kütle çekimi ve manyetik tek kutup gibi fikirlerin tartışılmasını içeriyor.

Sir Arthur Eddington, *The Nature of The Physical World*, Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1935.
Edinburgh'da 1927'de sunulmuş bir dizi konferans metni, bu kitap kuantum kuramının 1920'lerin büyük bilim adamları üzerindeki etkisini konunun hâlâ hızla değiştiği sırada nadir bir vukufla anlatıyor. Eddington önde gelen bir bilim adamı olmasının yanı sıra bilimi popülerleştirenlerin ilki ve en iyisiydi.

Sir Arthur Eddington, *Science and the Unseen World*, Folcroft Library Editions, Folcroft, Pennsylvania, 1979.
Aynı döneme ait başka konferans metinleri.

Sir Arthur Eddington, *New Pathways in Science*, Cambridge University Press, 1935.
Cornell Üniversitesi'nde 1934'te verilmiş bir dizi konferans. *The Nature of The Physical World*'ün yayımlandığı tarihten beri meselenin nasıl bir gelişim gösterdiğini anlatıyor.

Sir Arthur Eddington, *The Philosophy of Physical Science*, Michigan University Press, Ann Arbor, 1958 (özgün basım Cambridge University Press, 1938).
Kitapta Eddington'ın 1930'ların sonlarında verdiği başka konferanslar var ve isminden de anlaşılacağı gibi daha felsefi eğilimli bir kitap.

Leonard Eisenbud, *The Conceptual Foundations of Quantum Mechanics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1971.
Matematiği en az düzeyde kullanıyor ve kuantum kuramının fiziksel önemini vurguluyor – fakat buradaki "en az" yine de çok demek. Atom yapısını vs. açıklamaya girişmeden kuantum dünyası bilmecelerine dair fiziksel ve felsefi bir kavrayış kazandırıyor.

Richard Feynman, *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge, 1967 (Türkçesi: *Fizik Yasaları Üzerine*, çev. Nermin Arık, TÜBİTAK, Ankara, 1995).
Cornell Üniversitesi'nde 1964'te verilmiş ve 1965'te BBC2'de yayınlanmış bir dizi TV konferansının metni. Tamamı gayet güzel okunuyor, usta hocadan kuantum mekaniksel doğa görüşü üzerine iyi bir de bölüm var.

Richard Feynman, Robert Leighton ve Matthew Sands, *The Feynman Lectures on Physics, III. Cilt*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1981.
Ciddi öğrenciler için en anlaşılır kuantum mekaniğine giriş ders kitabı. Meşhur çift yarık deneyini çok iyi işlemiş ve süperiletkenliği çok ilginç biçimde ele almış.

George Gamow, *The Atom and Its Nucleus*, Prentice-Hall, New Jersey, 1961.
Tesadüfen bu işe karışmış olan usta bir hikâyeciden kolay okunan bir kitap, idare edecek kadar kuanta ve dalga kuramı içeriyor – Gamov bir süre Bohr'la çalışmıştı. Biraz eski kafa ama esprili. Sırf ana karakterlerin tasvirleri için bile incelemeye değer.

Maurice Goldsmith, Alan Mackay ve James Woudhuysen, yayıma hazırlayanlar, *Einstein: The First Hundred Years*, Pergamon, Elmsford, New York, 1980.
C. P. Snow'un Einstein hakkında yazdığı mükemmel bir makaleyi de içeren çok karma bir kitap.

John Gribbin ve **Jeremy Cherfas**, *The Monkey Puzzle*, Bodley Head, Londra; Pantheon, New York, 1982.

İnsanın evrimi hakkında bir kitap, aynı zamanda kapsamlı ve teknik olmayan bir biçimde DNA'nın işleyişini de anlatıyor.

Niels Heathcote, *Nobel Prize Winners in Physics 1901-1950*, Henry Schuman, Inc. 1953 (1971'de yeniden basım, Books for Libraries Press, Freeport, New York).
Verilen her bir ödüle vesile olan çalışmaların özetini ve kısa yaşam öykülerini içeren bu kitap yirminci yüzyılın ilk yarısında kuantum kuramının fizikteki baskın rolünü net bir şekilde gösteriyor. Sadece iki kilit isim yok – 1950'lere kadar ödülünü alamayan Max Born ve "kimya" başlığı altında ödülünü alan Ernest Rutherford. Arada bir göz atmaya değer.

Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Harper & Row, 1959 (Türkçesi: *Fizik ve Felsefe*, çev. Yılmaz Öner, Belge, İstanbul, 2000).
St. Andrews Üniversitesi'nde 1955-56 arası verilmiş bir dizi dersin metni. Kuantum kuramının kısa tarihçesini içeriyor ve kuantum mekaniğinin kurucularından birinin ağzından Kopenhag yorumunu tartışıyor. Kesinlikle matematik yok.

Werner Heisenberg, *The Physicist's Conception of Nature*, Greenwood Press, Westport, Connecticut, 1970; Harcourt Brace basımı: 1958 (Türkçesi: *Çağdaş Fizikte Doğa*, çev. V. Günyol, O. Duru, V, Ankara, 1987).
Bir yarı felsefi kitap daha. Özellikle de Jagdish Mehra'nın aynı adlı kitabıyla karışmaması için burada anmak gerek! (bkz aşağıda.)

Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Harper & Row, New York; Allen & Unwin, Londra, 1971.
"Bilimle geçen bir hayatın anıları" diye bir alt başlığı olan, bilime az yer veren fakat kişi olarak Heisenberg'i çok iyi anlatan anekdotlara dayalı özyaşam öyküsü.

Banesh Hoffmann, *The Strange Story of the Quantum*, Peter Smith, Magnolia, Massachusetts, 1963 (özgün basım 1947).
1940'ların perspektifinden bakıldığında hâlâ nispeten yeni olan kuantum kuramına ilginç bir bakış. Yazar zaman zaman aşırı popülerleştirme tuzağına düşüp gündelik dil kullanacağım derken asıl savın ucunu kaçırıyor, fakat kırk yılı aşkın zaman sonra yine de okuması hoş bir kitap. 1959'da yazılmış, Feynman diyagramları ve nedenselliğin kaybını da içeren önceki on yıl içindeki gelişmeleri açık seçik anlatan eki için bile peşine düşmeye değer.

Ernest Ikenberry, *Quantum Mechanics*, Oxford University Press, Londra, 1962.
Matematikçi ve fizikçiler için bir kitap, sokaktaki adama kılavuzluk etmez. Sorunları çözmek için kuantum kuramının "nasıl kullanılacağı" ko-

nusunu güçlü ele almış ama denklemlerin ne anlama geldiği yorumunda zayıf.

Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1966.
Tek kitapta çok kapsamlı bir çalışma, matematik konusunda insafa geldiği yok fakat matematiğinin büyük kısmını atlasanız bile pek çok ilginç şeye vakıf olursunuz.

Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley, New York & Londra, 1974.
Kuantum mekaniğinin yorumu ve felsefi önemi hakkında bir kitap. Bazen, mesela Kopenhag yorumu hakkında, bıktırıcı ayrıntıya giriyor, fakat kuantum yemek kitabı tariflerinin çok ötesine geçmiş.

Pascual Jordan, *Physics of the 20th Century*, Philosophical Library, New York, 1944.
Yukarıda adı geçen de Broglie'nin kitapları gibi, yirminci yüzyıl fiziğinin önde gelen mucitlerinden birinin kaleminden daha çok tarihsel bir anlatı.

Horace Judson, *The Eighth Day of Creation*, Simon & Schuster, 1982.
Moleküler biyolojinin yirminci yüzyılın ikinci yarısındaki devrim yaratan gelişimini konu alan bu büyük, biraz derme çatma kitap kendi başına okumaya değer nitelikte, hem moleküler biyolojinin hikâyesi hem de bilim adamlarının nasıl çalıştığını ortaya serişi açısından. Kitabın kuantum devrimiyle ilgisi, Judson'ın şunu açıkça ortaya koymasından geliyor: Bugün bizim moleküler biyoloji diye andığımız şey Linus Pauling'in kuantum mekaniğinin kurallarını karmaşık moleküllerin kimyasını anlamak için kullanmasıyla doğmuştur. Ne yazık ki, Judson aynı zamanda yanılarak kuantum mekaniğinin Heisenberg, Born ve Dirac versiyonlarının Schrödinger'inkinden sonra çıktığını söylüyor – ama hatasız kul olmaz.

Jagdish Mehra (yayıma hazırlayan), *The Physicist's Conception of Nature*, Kluwer, Boston, 1973.
Trieste'de 1972'de Paul Dirac'ın yetmişinci doğum günü vesilesiyle yapılan bir sempozyumun bildirileri. Müthiş bir katılımcı listesi –adeta kuantum kuramında *Kim Kimdir*'i okumak gibi–; bu 839 sayfalık destan gibi kitap bilim okuru için fiziğin yirminci yüzyılda nasıl dönüştüğüne dair en iyi kılavuz.

Jagdish Mehra ve **Helmut Rechenberg**, *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer-Verlag, New York, 1982.
Kuantum fiziğinin tam tekmil tarihsel incelemesi. Bugüne kadar yayımlanan dört cilt hikâyeyi 1926'lara kadar götürüyor ve güncellemek için bir beş cilt daha planlanıyor. Bu destansı çalışma matematik konusunda in-

safsız davranıyorsa da içindeki pek çok denklemin yanında çok rahat okunabilen bir sürü bilgi de var.

Abraham Pais, *Subtle is the Lord...*, Oxford University Press, Londra ve New York, 1982.
Einstein'ın hayatı ve eserleri hakkında tam tekmil bir kitap.

Heinz Pagels, *The Cosmic Code*, Simon & Schuster, New York, 1982 (Türkçesi: *Kozmik Kod*, çev. Nezihe Bahar, Doruk, Ankara, 2003).
Görelilik kuramı, kuantum kuramı ve modern parçacık fiziğini tek kitapta açıklamaya çalışan gözüpek bir girişim. Bir parçacık fizikçisi tarafından yazılmış bu kitabın özü parçacık çiftliğinin –kuarklar, gluonlar, ve diğerleri– ayrıntılı anlatılışı. Kuantum kuramı burada çiftlikteki parçacıkların anlaşılmasına temel oluştursun diye daha kısa anlatılmış ve tarihsel bakış açısı söz konusu değil. Parçacıkların çoğaldıkça çoğalmaları hakkında daha fazla bilgiye ihtiyacınız varsa uğramakta yarar var. Kitabı Capra'nın ve Zukav'ınkilerle birlikte okumak da ilginç olur.

Jay M. Pasachoff ve **Marc L. Kutner**, *Invitation to Physics*, W.W. Norton, New York ve Londra, 1981.
Görünüşte ana dalları bilim olmayan öğrenciler için hazırlanmış bir ders kitabı olsa da, çok az bir matematikle bütün fiziğin genel bir resmini ortaya koyuyor; modern bilimle ilgilenen herkese güvenle salık verilir.

Max Planck, *The Philosophy of Physics*, W.W. Norton, New York, 1963 (özgün basım 1936).
Sadece tarihsel yanı önemli – başlangıçta attığı adımın büyüklüğünün farkında olmadan, ışımanın kuantum kuramını kuran adamın düşünce tarzına bir bakış.

Erwin Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics*, Chelsea Publishing Company, New York, 1978 (1928'de yayımlanan Almanca basımından çeviri).
Schrödinger'in temellerini attığı dalga mekaniğine ait temel makaleler, matrisle dalga mekaniğinin denkliğini gösterdiği tahlili de içeriyor. Matris mekaniği hakkındaki temel özgün makaleler van der Waerden tarafından derlenmiştir (aşağıya bakınız).

Erwin Schrödinger, *What is Life?*, Cambridge University Press, New York, 1967 (özgün basım 1944; bu basım *Mind and Matter*'la birleştirilmiş, ilk basım 1958).
Canlı moleküllerinin yapısını çözen insanların üzerinde çok önemli etkisi olmuş, tarihsel önemi olan çok güzel bir kitap. Artık hayat molekülünün DNA olduğu ve Schrödinger'in kitabı yazdığı zaman varsaydığı gibi genlerin proteinlerden meydana gelmediği biliniyor olsa da okumaya değer.

Kuantum kuramının genetik mühendisliği için hayati önemde olduğu konusunda sizi bu kitap ikna edemezse hiçbir şey edemez.

Erwin Schrödinger, *Science, Theory, and Man*, Dover Publications/Allen ve Unwin, Londra, 1957 (özgün basım 1935).
Schrödinger'in Nobel için yaptığı konuşmayı da içeriyor. Açık, bilgilendirici ve kuantum mekaniğinin gelişimiyle ilgilenen herkes için mutlaka gerekli bir okuma.

Erwin Schrödinger, *Letters on Wave Mechanics*, Philosophical Library, New York, 1967.
Schrödinger'e yazılan ve onun yazdığı mektuplar, yazıştığı isimler de Einstein, Planck ve Lorentz. Bu büyük adamların kafalarının işleyişine dair merak uyandıran tarihsel bilgiler. Ünlü kedi paradoksu hakkında bazı çok önemli yazışmalar da içeriyor.

John Slater, *Modern Physics*, McGraw-Hill, New York, 1955.
Matematiğe asgari seviyede başvurarak yazılmış bir kitap, fakat ciddi öğrenciler için. Eski olmasına rağmen lisans seviyesindeki öğrenciler için harika bir kuantum kuramına giriş kitabı.

J. Gordon Stripe, *The Development of Physical Theories*, McGraw-Hill, New York, 1967.
Üniversite birinci sınıf düzeyinde temel bir kılavuz kitap, bu gruba hitap eden pek çok kitabın aksine kuantum kuramına ve çekirdek fiziğine çok iyi bir giriş sunuyor. Ders kitabı, sokaktaki adama yaramaz.

B. L. van der Waerden (yayıma hazırlayan), *Sources of Quantum Mechanics*, Peter Smith, Magnolia, Massachusetts,1967.
Temel özgün makaleler seçkisi, hepsi İngilizce versiyonu, matris mekaniğinin temellerini kurmuş makaleleri de içerecek kadar gerilere gidiyor (Heisenberg, Born, Jordan ve Dirac) – fakat Schrödinger'in dalga mekaniğini *içermiyor* (Schrödinger'in bununla ilgili yazıları ayrı bir kitapta toplanmıştır; bkz. Schrödinger). Her makale için yazılmış özlü fakat kapsamlı giriş yazıları, eserleri bir perspektife oturtuyor.

James D. Watson, *The Double Helix*, Atheneum, New York, 1968 (Türkçesi: *İkili Sarmal*, çev. A. Serin, TÜBİTAK, Ankara, 2002).
DNA'nın yapısının canlı, dinamik bir kişisel anlatımı. "Eğrisiyle doğrusuyla"dan çok "eğrisiyle" anlatılmış; fakat çok eğlenceli ve kesinlikle okumaya değer.

Harry Woolf (yayıma hazırlayan), *Some Strangeness in the Proportion*, Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1980.
Bu kitap Princeton İleri Araştırma Enstitüsü'nde Einstein'ın yüzüncü do-

ğum yıldönümü sebebiyle yapılan bir sempozyumun bildirilerini içeriyor. Katılımcıların listesi kuramsal fiziğin *Kim Kimdir*'i gibi ve Einstein'ın kuantum kuramına katkısı üzerine kapsamlı bir bölüm ayrılmış. Büyük kısmı fazla matematik içermese de, bir kısmı oldukça ağır ve her okur için değil.

Gary Zukav, *The Dancing Wu Li Masters*, Bantam, New York, 1980.
Fizik eğitimi *görmemiş* birinin bakış açısından aynı hikâyeyi anlatan bu kitap sonuç itibariyle Capra'nın *The Tao of Physics*'inin bir eşi. Bilim dışındaki insanların yeni fizikten ne anladıklarını görmek için bütün bilim adamları bu kitabı okumalı; yalnız bilim dışındaki okurları uyarmak gerekir, Zukav bazen kendini heyecanına kaptırıyor, kitaptaki bilim daima yüzde 100 doğru değil ve de Capra gibi fikirlerin nasıl geliştiği konusuna pek az dikkat gösteriyor. Ama yine de okunacak bir kitap.

BİLİMKURGU

Gregory Benford, *Timescape*, Pocket Books, New York, 1981.
Bir fizik araştırmacısı olmanın nasıl bir şey olduğuna dair en iyi bilimkurgu tasvir, birçok dünya gerçekliğinde mümkün olabilecek türden bir zaman yolculuğunun olağanüstü kurgusal anlatımı.

Philip Dick, *The Man in the High Castle*, Gregg Press, Boston, 1979 (*Yüksek Şatodaki Adam*, çev. Dost Körpe, Metis, İstanbul, 1999).
ABD'nin İkinci Dünya Savaşı'nı kaybettiği bir dünyada geçen paralel-gerçeklik hikâyesi. Bilime çok az yer vererek yazılmış hoş bir kitap, hafif bir dokunuşla sıradanlıktan çıkmış.

Randall Garrett, *Too Many Magicians*, Ace Books, New York, 1981.
Paralel gerçeklikte kurulmuş "ya... olsaydı" hikâye dizisi. Richard Lionheart İngiltere tahtına kardeşi John'un geçmesine engel olacak kadar uzun yaşar. Bilimsel açıdan zayıf ama detektiflik hikâyeleri iyi ve eğlenceli.

David Gerrold, *The Man Who Folded Himself*, Amereon, Ltd., Mattituck, New York, 1973.
Dikey gerçekliğin birçok dünyası arasında zamanda ileri ve geri yapılan yolculuğun kafa karıştırıcı etkilerinin eğlenceli bir anlatımı. Buradaki "bilimi" hokus pokus diye görüp bir kenara atmak kolay, fakat öngörüleri, elinizdeki kitabın On Birinci Bölümü'nde dile getirilen bazı fikirlere çok yakın.

Keith Roberts, *Pavane*, Hart-Davies, Londra, 1968 (karton kapak Panther).
Bu öykü belki paralel evrende geçiyor, belki geçmiyor. Her halükârda iyi okunuyor.

Jack Williamson, *The Legion of Time*, Sphere, Londra, 1977.
İlk defa 1938'de bir dergide tefrika halinde yayımlandı, zamanının bilimkurgu geleneği içinde yetkin bir aksiyon serüven öyküsü, sadece tek bir açıdan kayda değer. İzini sürebildiğim kadarıyla ister bilimsel ister kurgusal olsun, daha sonra kuantum mekaniğinin birçok dünya yorumu adını alacak olan paralel dünyalar kavramının ilk defa basılmış hali. Tabii alternatif gerçekliklerde geçen daha eski "ya... olsaydı" öyküleri var, fakat Williamson kuantum mekaniğinin temellerinin kurulmasından beri daha ancak on yıl geçmişken "olayın geçtiği yer"i saygın bir bilim diliyle anlatmış. "Geodezikler atomaltı belirlenemezciliğin kaprisiyle sonsuz sayıda olası dallara ayrılmıştır." Hugh Everett, on dokuz yıl sonra yazdığı doktora tezinde, bunu güvenli bir matematik zemine oturtmuşsa da ondan daha özlü söyleyememişti. Bilimkurgu yazarlarının kuramsal bilimin gelişimini önceden gördüğü nadirdir, fakat olunca da dikkat etmeye değer.

Robert Anton Wilson, *Schrödinger's Cat* üçlemesi (*The Universe Next Door*, *The Trick Top Hat*, *The Homing Pigeons*), hepsi Pocket Books basımı, New York, 1982.
Bu komik, saygısız ve görkemli üçlemeyi tarif etmek neredeyse imkânsız. Aşağı yukarı aynı karakter grubunu içeren, aşağı yukarı aynı olayların çerçevesini sağlamak için özenle uygulanmış kuantum teması üzerine üç ayrı çeşitleme (her biri bir ciltte). Bir bakıma Lawrence Durrell'ın *İskenderiye Dörtlüsü*'nün görelilik kuramı için yaptığını *Schrödinger'in Kedisi* üçlemesi kuantum kuramı için yapmış – fakat Wilson daha komik. Öğrenilecek bir zevk, ama öğrendiğinizde de dilinizde kuantum dünyasının gerçek lezzetini bulacaksınız.

Bilimkurgu yazarları kuantum kuramını sürekli "keşfetmekteler" ve iki-üç ayda bir, ihtimalleri yeni kavramış birinden yeni bir kısa öykü çıkıyor. Yakın zamandan şu örnekler var: Greg Bear'ın "Schrödinger's Plague", *Analog*, 29 Mart 1982 ve Rudy Rucker'ın "Schrödinger's Cat", *Analog*, 30 Mart 1981. Başka iyi öyküler de var fakat bu ikisinden söz ettim, çünkü beni bu kitaba ve başlığına götüren gözden geçirme ve keşif arayışına çıkışım onların kuantum kuramına aşina olmayan bir okur kitlesinin dikkatini çekmek için Schrödinger'in kedisini araç olarak kullanmaları sayesinde olmuştur. Her iki yazara ve *Analog*'un editörü Stan Schmidt'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Sözlükçe

TÜRKÇE-İNGİLİZCE

alan kuramı	field theory
atarca	pulsar
atom tayfı	atomic spectrum
ayar simetrisi	gauge symmetry
bağıntı	correlation
bozunma	decay
buçuklu	half-integer
bütüncü	holistic
çekirdek	nucleus
çok katlı yapı	multiplet
değişme özelliği olmaması	noncommutativity
demet	beam
doğrusal kutuplanmış	plane polarized, linear polarized
durgun kütle	rest mass
durum	state
Duyu Ötesi Algı	Extra Sensory Perception (ESP)
elektromanyetizma	electromagnetism
esir	ether
eşlenik değişken	conjugate variable
etkileşim	interaction
evren bilimci	cosmologist
evren hattı	worldline
fosforışı	phosphorescence
girişim	interference
gizli değişkenler	hidden variables

görelilik kuramı	relativity theory
hareket	action
hız (yönlü hız)	velocity
hızlandırıcı	accelerator
ışık saçan esir	luminiferous ether
ışık yayan diyot	LED
ışıma	radiation
içerim	implication
ikici	dualistic
ikili yapı	doublet
kademeli dizi	cascade
kara cisim	blackbody
kara madde	dark matter
kararlı	stable
katkılanmış	doped
kesilme noktası	cut off
kırılma	refraction
kırınım	diffraction
kuantum sayısı	quantum number
kutuplanma	polarization
lazer	LASER
mazer	MASER
momentum	moment
morötesi felaket	ultraviolet catastrophe
oyuk ışıması	cavity radiation
öngörü	prediction
örüntü	pattern
paketçik	kuantum
parçacık	particle
parçacık fiziği	particle physics
radyoaktiflik	radioactivity
sahte rasgele	pseudo-random
sınıflandırmacı	taxonomist

soğurmak	absorb
sürat	speed
tamamlayıcılık	complementarity
tanecik	corpuscle
tayf	spectrum
tayf ölçüm uzmanı	spectroscopist
tayf ölçümü	spectroscopy
tekli yapı	singlet
temel durum	ground state
titreşim kipi	mode of vibration
tümleşik devre	integrated circuit
uyarlı ışıma	coherent radiation
uzay-zaman süreklisi	space-time continuum
yapıcı girişim	constructive interference
yayılma	emission
yaymak	emit
yerbilmezlik	nonlocality
yıkıcı girişim	destructive interference
yük (elektrik)	charge

İNGİLİZCE-TÜRKÇE

absorb	soğurmak
accelerator	hızlandırıcı
action	hareket
atomic spectrum	atom tayfı
beam	demet
blackbody	kara cisim
cascade	kademeli dizi
cavity radiation	oyuk ışıması
charge	yük (elektrik)
coherent radiation	uyarlı ışıma
complementarity	tamamlayıcılık

conjugate variable	eşlenik değişken
constructive interference	yapıcı girişim
corpuscle	tanecik
correlation	bağıntı
cosmologist	evren bilimci
cutoff	kesilme noktası
dark matter	kara madde
decay	bozunma
destructive interference	yıkıcı girişim
diffraction	kırınım
doped	katkılanmış
doublet	ikili yapı
dualistic	ikici
electromagnetism	elektromanyetizma
emission	yayılma
emit	yaymak
ether	esir
Extra Sensory Perception (ESP)	Duyu Ötesi Algı
field theory	alan kuramı
gauge symmetry	ayar simetrisi
ground state	temel durum
half-integer	buçuklu
hidden variables	gizli değişkenler
holistic	bütüncü
implication	içerim
integrated circuit	tümleşik devre
interaction	etkileşim
interference	girişim
kuantum	paketçik
LASER	lazer
LED	ışık yayan diyot
luminiferous ether	ışık saçan esir
MASER	mazer

mode of vibration	titreşim kipi
moment	momentum
multiplet	çok katlı yapı
noncommutativity	değişme özelliği olmaması
nonlocality	yerbilmezlik
nucleus	çekirdek
particle	parçacık
particle physics	parçacık fiziği
pattern	örüntü
phosphorescence	fosforışı
plane polarized, linear polarized	doğrusal kutuplanmış
polarization	kutuplanma
prediction	öngörü
pseudo-random	sahte rastgele
pulsar	atarca
quantum number	kuantum sayısı
radiation	ışıma
radioactivity	radyoaktiflik
refraction	kırılma
relativity theory	görelilik kuramı
rest mass	durgun kütle
singlet	tekli yapı
space-time continuum	uzay-zaman süreklisi
spectroscopist	tayf ölçüm uzmanı
spectroscopy	tayf ölçümü
spectrum	tayf
speed	sürat
stable	kararlı
state	durum
taxonomist	sınıflandırmacı
ultraviolet catastrophe	morötesi felaket
velocity	hız (yönlü hız)
worldline	evren hattı

Dizin

Alfa ışıması, 43-4, 72, 80, 138-40
Antropik ilke, 254, 279
Aspect, Alain, 17, 231, 232
Aspect deneyi, 14, 17, 88, 219, 231-3, 235, 236, 255

Balmer serisi, 66-8, 73, 74, 119
Belirsizlik ilkesi, 128-30, 139, 140, 163-7, 186-7, 189, 199, 202-9
Bell testi, 220, 221d, 222, 227-32, 245, 255
Beta ışıması, 43, 72, 80
Bilimkurgu, 241-2, 247, 249-52, 277, 285-6
Birçok dünya yorumu, 184-5, 238-56
Birleşik alan kuramı, 136, 181-2, 268
Bohm, David, 220, 221, 227, 234
Bohr Enstitüsü, 70, 105
Bohr, Niels, 19, 61-87, 91, 92, 95, 101, 106, 110, 112, 127, 130, 163, 164, 167, 182-3, 185-9, 230d, 256
Bohr'un atom modeli, 63-4, 69-88, 101, 103, 142-3
Boltzmann, Ludwig, 35, 37, 51-3, 75, 273
Born, Max, 81, 100, 105, 109, 112-7, 122, 123, 127-8, 130-1, 177, 178, 185, 278
Bose-Einstein istatistikleri, 106-7, 111, 151-2, 154
Boşluk dalgalanması olarak evren, 272-4
Bozonlar & fermiyonlar, 106-8
Bragg yasası, 155-6
Brown hareketi, 37, 56, 93
Büyük Patlama Kuramı, 78, 197, 218-9, 233-5, 239, 248-9, 253-4, 270, 272-5

Capra, Fritjof, 13, 206, 213, 278, 283, 285
CERN, 220, 248, 267, 270
Clark, Terry, 235-7
Compton etkisi, 94-5, 107, 121

Çift yarık deneyi (iki delik deneyi), 170-83, 216-8, 242, 245

Dalga fonksiyonu, 131, 177-81, 183, 210-5, 237-42, 250d
Dalga mekaniği, 121-7, 132-6, 180-1, 236, 250d, 283-4
Dalga/parçacık ikiliği, 91-101, 127-30, 167-8, 180-1
de Broglie, Louise, 95-100, 121-3, 131d, 278
d'Espagnat, Bernard, 221d, 227, 230-4
DeWitt, Bryce, 244, 246-7, 279
Dirac, Paul, 70, 71, 115, 117-24, 130, 131, 133-6, 142, 164-5, 169, 170, 192-3, 260-1, 276, 279, 282
DNA, 15, 155-9, 284
Düşünce deneyleri: EPR Paradoksu, 187-90, 210, 215, 220-2, 225, 227; kutudaki saat deneyi: 185-7; Schrödinger'in kedisi, 16-7, 210-5, 237, 240-1, 246, 248, 250; Wheeler'ın gecikmiş seçim deneyi, 215-9, 231

Eddington, Arthur, 102, 169, 261, 279-80
Einstein, Albert, 15-6, 32, 36-7, 52, 53, 55, 57-61, 71, 73, 75, 84, 91-5, 99, 107, 110, 121-2, 131d, 143-4, 181, 184-90, 210, 215d, 222, 244-5, 248, 278, 283
Enerji düzeyleri (durumları), 63-4, 67-

8, 73-6, 103, 107-8, 125-6, 133-4
Entropi, 51-3
Everett, Hugh, 238-49, 251, 254-6, 279
Evren hatları, 191, 199

Fermi-Dirac istatistikleri, 106-8, 111, 146, 151-2
Feynman diyagramları, 190-9, 202-8, 211, 213-4, 258-60
Feynman, Richard, 170-1, 175, 179-81, 199d, 219, 235, 252d, 276, 280

Gama ışıması, 43, 72
Genetik mühendisliği, 15, 21, 158-60
Gizli değişken kuramı, 17-8
Görelilik kuramı, 13, 17, 36, 55-6, 93-4, 104-6, 117, 120, 123, 133, 168, 181-2, 190-1, 199, 201, 245-6, 250, 261-2
Gözlemcinin gözlemlenen süreçle etkileşimi, 129-30, 164-5, 167-70, 178-82, 216-7, 221-2, 224-5

Hamilton, William, 118, 124-5
Heisenberg, Werner, 45, 84, 109, 111-20, 126, 129-31, 140, 163-5, 167, 170, 184, 281

Işığın dalga kuramı, 23-32, 92, 101, 124, 170
Işığın tanecik kuramı, 23-6, 32, 58, 75

İki delik deneyi, bkz. çift yarık deneyi.
İstatistiksel mekanik, 35, 48, 49, 273

Jordan, Pascual, 116-7, 120d, 282
Josephson eklemi, 153-4, 235

Kara cisim ışıması, 49, 53, 55, 76, 93, 126
Katot ışınları, 38-9, 41, 58
Kimya, 9, 15, 21, 34, 43-4, 81-8, 148, 155-6, 158-9, 282
Konum/momentum, 117, 128-30, 163-8, 187-90, 202
Kopenhag yorumu, 130-1, 166-70, 179-85, 188-90, 212, 215, 237, 238, 240-42, 245, 248, 252, 254-5, 260, 278, 281-2
Kozmik ışınlar, 135
Kozmoloji, 52, 196, 272-6
Kuantum elektrodinamiği, 170, 257-61, 279
Kuantum kromodinamiği, 257, 279

Lazerler, 15, 21, 142-6, 159-60, 230

Matris mekaniği, 116-26, 133, 283
Maxwell, James Clerk, 31, 35, 37-9, 245
Mazerler, 142-6
Moleküler biyoloji, 15, 156-60, 282, 287d

Nedensellik, 76-7, 110, 165-6, 182-3, 188-9, 239, 244, 281
Newton'ın, Isaac, 21-3, 30-3, 56, 65, 117, 165, 234
Nötrinolar, 169, 204, 260, 274
Nötronlar, 79-80, 82, 101, 108, 135-8, 141-3, 201, 204-7, 214
Nükleonlar, 138-40, 204

Olasılık, 16, 52-3, 71-3, 110, 128-32, 151, 154, 168, 176-82, 190, 199d, 210, 215, 221, 239, 242, 247, 255
Oyuk ışıması, 48, 50, 75

Paralel dünyalar, 241-3, 249-50, 286
Pauli dışlama ilkesi, 105-8, 131, 147, 151
Pauli, Wolfgang, 103-6, 109, 112, 118-9, 131, 165
Planck, Max, 49-61, 117-9, 283
Planck sabiti, 54, 56, 59, 67-8, 71, 99, 117-9
Planck zamanı, 262
Potansiyel kuyusu, 139-40, 146
Pozitronlar, 135-6, 147, 169-70, 192-4, 198-99, 209, 230, 233, 264, 266d

Rutherford, Ernest, 43-6, 61-3, 71-3, 79, 92

Schrödinger, Erwin, 15-8, 100, 122-8, 157, 159, 163, 168, 177, 180, 210, 212, 283-4
Simetri, 184, 196, 263-72, 275
Spin, 102-8, 111, 119, 123, 133-4, 151, 163, 169-70, 201, 220-3, 227-9, 233, 266, 271
Süperakışkanlık, 107, 108, 154
Süperiletkenler, 151-5, 235-6, 280
Süperkütleçekimi, 270-2, 276
Süpersimetri, 270-2

Şişen evren, 274-6

Tamamlayıcılık ilkesi, 92, 128, 130, 167, 181-3
Tayf çizgileri, 65-9, 73, 75, 184-7, 103-4, 111-2, 119, 133
Termodinamik, 50-7, 273
Thomson, J. J., 37-41, 44-5, 63d, 69, 101, 110
Transistörler, 146, 149-52, 235

Valans bandı, 147-8

Wheeler, John, 195, 198, 215-9, 231, 239, 244-8, 263, 279

yarı ömür, 72
Yarıiletkenler, 146-51
Yeniden normalleştirme, 258-62, 265-7, 270-2
"Yerel gerçekçi" dünya görüşü, 227-9, 234

Zaman oku, 166-7, 197
Zaman yolculuğu, 199-201, 241, 250-2, 256, 285