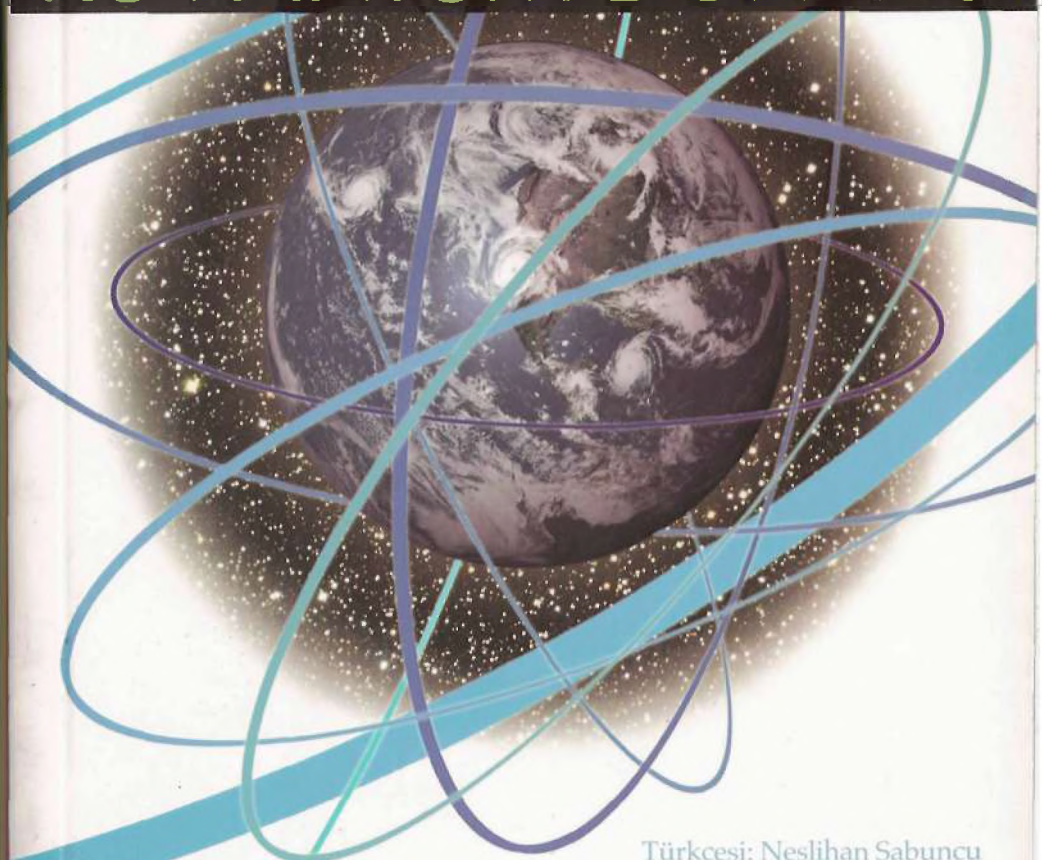
GÜNCEL YAYINCILIK

AÇIK BİLİM

herkes için kuvantum fiziği

KUVANTUM DÜNYASI



Türkçesi: Neslihan Sabuncu

Kenneth W. Ford

GÜNCEL YAYINCILIK: *243*
Açık Bilim: 35

•

ISBN 975-6117-22-2
Herkes İçin Kuvantum Fiziği - Kuvantum Dünyası

Kitabın orijinal adı: *The Quantum World - Quantum Physics for Everyone*

•

Genel Yayın Yönetmeni: Aysel Akdaş

•

Kapak Tasarımı: Talip Aktaş

•

Birinci Basım: Eylül 2005

•

Ofset Hazırlık
Güncel Yayıncılık Ltd.

Baskı ve Cilt: Kayhan Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti.
Davutpaşa Cad. Güven San. Sitesi D Blok No: 155
Topkapı / İstanbul / Tel: 0 212 576 0136

© Güncel Yayıncılık Ltd. Şti.
© Harvard University Press
Tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında
yayımcının yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

GÜNCEL YAYINCILIK LTD. ŞTİ.
Çatalçeşme Sok. No: 54 Kat, 3 Cağaloğlu - İstanbul
Tel: 0 212 511 22 37, Fax: 0 212 522 86 68
e- mail: info@guncelyayincilik.com.tr

herkes için kuvantum fiziği

KUVANTUM DÜNYASI

Kenneth W. Ford

Türkçesi: Neslihan Sabuncu

GÜNCEL YAYINCILIK

içindekiler

Teşekkür 9

1. Nesnelerin Yüzeyinin Altı 11
2. Küçük Ne Kadar Küçük? Hızlı Ne Kadar Hızlı? 19
3. Lepton Ailesiyle Tanışın 42
4. Geniş Ailenin Diğer Üyeleri 82
5. Kuantum Kümeleri 109
6. Kuantum Sıçramaları 130
7. Sosyal ve Antisosyal Parçacıklar 151
8. Sabitliğe Tutunmak 176
9. Dalgalar ve Parçacıklar 211
10. Sınırları Genişletmek 252

Ek A: Ölçüler ve Büyüklükler 285
Ek B: Parçacıklar 288
Ek C: Altını Alanlar 293

Teşekkür

Jonas Schultz ve Paul Hewitt bu kitabın metnini özenle okuyup pek çok yararlı öneride bulundu. Ayrıca Paul kitaptaki görüşlere hayat veren çizimleri yaptı. Her ikisine de çok şey borçluyum. Kitabı okuyup çoğu bölümüyle (belki de tamamıyla) ilgili yorumlar yapan keskin görüşlü arkadaşlarım Pam Bond, Eli Burstein, Howard Glasser, Diane Goldstein, ve Joe Scherrer'e teşekkür ederim. Diane'in Germantown Akademesi'ndeki öğrencileri, kitabı aralarında paylaştırıp değerli (ve sade) geri besleme sağladılar. Bu öğrenciler Rachel Ahrenhold, Ryan Cassidy, Meredith Cocco, Brian Dimm, Emmanuel Girin, Alex Hamili, Mark Hightower, Mike Nieto, Luis Perez, Matt Roman, Jared Solomon, ve Joseph Verdi'dir.

Yararlı verileri ve gerçekleri bulup getirenler (ya da aradığım şeyi bulmam için büyük bir çabayla bana yardımcı olanlar) arasında Finn Aaserud, Stephen Brush, Brian Bruke, Val Fitch, Alexei Kojevnikov, Alfred Mann, Florence Mini, Jay Pasachoff, Max Tegmark, ve Virginia Trimble vardı. Jason Ford ve Nina Tannenwald 1. Bölüm'de doğru bir başlangıç yapılmasına yardımcı oldu, Lillian Lee kitabın başlığının seçimi konusunda pek çok değerli fikrin kaynağı oldu. Heidi Miller Sims benim için yetenekliden de öte bir denetleyicidir.

Eşim Joanne ve çocuklarım Paul, Sarah, Nina, Caroline, Adam, Jason, ve Ian, masa başında oturmak anlamına geldiğini yıllar önce öğrendikleri 'iş'im konusunda bana sonsuz destek sağladılar. Ayrıca Harvard University Press'in kadrosunun en yetenekli ve uyumlu kişileri olan Michael Fisher, Sara Davis ve Maria Ascher'le tanışma şansını yakaladım.

1. bölüm

Nesnelerin Yüzeyinin Altı

Tahtaya vurun. Katı hissi verir. Katıdır. Ancak derinlemesine araştırdığınızda farklı dünyalarla karşılaşırsınız. Katı maddelerin atomlardan oluştuğunu ve atomların çoğunlukla boş alanlardan oluştuğunu okulda öğrenmişsinizdir. Aslında, atomlar dönen pervaneli bıçak tarafından oyulan diskin boşluğuyla aynı anlamda boşluğa sahiptir. Küçük ve hızlı bir şeyin atomun ya da dönen pervanenin içinden geçmesi kolaydır, ama büyük ve yavaş bir şey için bu imkânsızdır.

Çoğu ölçümlere göre atomlar küçüktür.* Ancak bazı bilim insanlarına göre atomlar iridir. Nükleer ve parçacık fizikçisi dediğimiz bu bilim insanları, atomlardan daha küçük olan ve atomların merkezinde bulunan küçük çekirdekten bile küçük alanlarda neler olduğunu merak ederler. Biz, bu bilim insanlarının çalışma alanını *atomun içindeki dünya* diye adlandırırız. Ben bu kitapta işte bu dünyayı incelemek istiyorum.

20. yüzyılda, atomun içindeki dünyanın doğasının bizim etrafımızdaki sıradan dünyada görmediğimiz şekilde tuhaf ve harika davrandığını öğrendik.

Uzayın en küçük parçalarına ve zamanın en küçük dilimlerine baktığımızda sadece havai fişek diye adlandırabileceğimiz bir şey görürüz. Çok fazla sayıda yeni parçacık var olmak üzere ortaya çıkar; bazıları uzun, çoğunluğu kısa yaşar;

* Ne kadar küçük? Sıraya dizilmiş on milyon atom bir incin (2,54 cm) onda birinden daha kısadır. 1981 yılında icat edilen tünel kazmayı tarayan mikroskop (STM) sayesinde atomlar ilk defa bireysel olarak görülmüştür. 1900'lerin başlarına kadar, pek çok bilim insanı atomların varlığından bile şüphe duymuştu.

her biri diğerleriyle bir şekilde etkileşim kurar ve her biri yaratılmaya elverişli olduğu kadar yok edilmeye de uygundur Biz bu dünyada doğanın hız sınırı ile yüz yüze geliriz, uzay ve zamanın birbirine karıştığım görürüz ve kütlenin enerjiye enerjinin kütleye dönüşebildiğim öğreniriz. Bu dünyadaki tuhaf oyun kuralları bilim insanı olan ve olmayanları aynı derecede şaşırtır.

Kuvantum mekaniği (genel anlamıyla, çok küçüğün fiziği) ve *özel görelilik* (genel anlamda, çok hızlının fiziği) diye adlandırdığımız bu kurallar yirminci yüzyıl fiziğinin iki büyük devriminin ürünleridir.

Bu kitapta, sizlere bu iki devrimel teorinin -özellikle kuvantum mekaniğinin- bizim gördüğümüz dünyayı nasıl değiştirdiğini anlatmak istiyorum. Görüşleri açıklamak için kuvantum kurallarıyla yönetilen *"şeylerin* yani atomun içindeki parçacıklardan yararlanacağım, (bundan sonra bunlara sadece Î X f ^ "Kü?ükne k^ar küçük» ve "hızlı ne kadar hızlı bölümlerine baktıktan sonra size parçacık ailesinin çok sayıda üyesini tanıtacağım. Sonra, fizikçilerin parçacıkların davranışları ve parçacıklardan oluşan her şeyi açıklamak ,?m geliştirdikleri hayret verici görüşlere döneceğim

Benim doğduğum yıl olan 1926'da sadece elektron ve protonun atomun içindeki dünyanın üyeleri olduğu biliniyordu. *Elektron,* atomların içinde hızla dolaşan ve elektrik akım, taşıyan hatlar boyunca hareket eden bir negatif elektrik zerresıdır. Ayrıca günümüzde elektron, bilgisayar monitörleri ve televizyon tüp eri olarak kullanılan katot ışın tüplerinin ekranındaki piksellerini ses ve görüntü verecek şekilde yönetir Elektrondan yaklaşık 2000 kat daha büyük olan ve pozitif elektrik^taşıyan *proton,* kendini çevreleyen elektronu çekerek

îo9nf , J6n atomUnUn merkezinde tek başına oturur 1920 lerde protonların daha ağır atom çekirdeklerinde de bulunduğu düşünülüyordu ve günümüzde bunun gerçekten böye olduğunu biliyoruz. Ayrıca bunlar, dünyaya büyük miktarlarda ve büyük enerjiyle uzaydan gelirler ve biz bunlara *temel Kozmik radyasyon* deriz.

1926'da *foton* (ışık parçacığı) da biliniyordu, ama bunun "gerçek" bir parçacık olduğu düşünülmüyordu. Kütlesi yoktu; yavaşlatılamaz ya da yakalanamazdı ve çok kolay yaratılabilir veya yok edilebilirdi (yayılabilir ve yutulabilirdi). Elektron ve proton gibi güvenilir, sabit bir madde yığını değildi. Bu yüzden foton bazı yönlerden bir parçacık gibi davrandığı halde fizikçiler onu, ışık zerreciği diye saçma bir sıfatla tanımladılar. Bundan sadece birkaç yıl sonra fizikçiler elektronların fotonlar kadar kolay bir şekilde yaratılabildiği ve yok edilebildiğini gördüklerinde, foton dalgalarının bir parça oluşturduğunu ve kütlesi olmayan bir parçacığın da kesinlikle bir parçacık olduğunu anladıkları zaman, foton gerçek bir parçacık olma statüsüne tam olarak kavuştu.

1926 yılı fiziğin altın çağının ortasıydı. 1924 ile 1928 yılları arasındaki kısa dönemde fizikçiler, bilimin o döneme kadar görmediği en önemli ve şaşırtıcı görüşleri ortaya attılar. Bunlar; sadece ışığın değil maddenin de dalga boyunun olduğunun keşfedilmesi; doğanın temel kanunlarının kesinlik değil olasılık kanunları olduğunun farkına varılması; maddenin belli hallerinin doğru ölçülebilirliği ilkesinin sınırlı olduğunun anlaşılması; elektronların bir eksen üzerinde sadece iki yönde, yani yukarı ve aşağı doğru döndüğünün keşfedilmesi; her bir parçacığa bir karşıt parçacığın eşlik ettiğinin tahmin edilmesi; tek bir elektron ya da fotonun aynı anda iki veya daha fazla farklı yöne hareket ediyor olabileceği düşüncesi (sanki aynı anda arabanızı kuzeye ve batıya sürer gibi ya da aynı anda New York ve Boston'da vitrinlere bakar gibi) ve asla iki elektronun aynı anda aynı hareket durumunda olamayacağı ilkesidir (denedikleri halde aynı ayakla aynı anda adım atamayan yürüyüşçüler gibi).

Bunlar bu kitabın temelini oluşturan "büyük fikirler" arasında. Atom içi parçacıklarının açıklanması bu fikirleri aydınlatacak. Parçacıklar, (ve bir bakıma atomların tamamı) çok küçük ve çok hızlıyı yöneten kanunlardan en fazla etkilenen varlıklardır.

Burada hemen belirtmeliyim ki, kuvantum fiziğinde neyi (parçacıkları) *ne olduğundan* (kanunlardan) ayırmak hiç de kolay değil. Yirminci yüzyıldan üç yüz yıl önce geliştirilen "klasik" fizikte neyin ve ne olduğunun ayırımı son derece açıktır.

Dünya (ne), kuvveti ve hareket kanunlarına uygun olarak güneşin etrafında bir yörünge izler (ne olduğu). Yerkürenin ne içerdiği, üzerinde yaşamın olup olmadığı, lav püskürtmesi veya uykuda olması gibi özelliklerin dünyanın güneş etrafında nasıl döndüğüyle ilgisi yoktur. Başka bir örnek vermek gerekirse; titreşen elektrik yükü elektromanyetik radyasyonu oluşturur. Bu yükler ister elektronlar, protonlar ister iyonize atomlar ya da tenis toplan tarafından taşınsın, bu olay radyasyonun zerre kadar umurunda olmaz. Radyasyon, elektriklenen bir nesnenin belli bir şekilde elektrik titreşimi oluşturduğunu "bilir" ama bu nesnenin ne olduğunu "bilmez" ya da bilmesi gerekmez. Elektrik titreşimi oluşturan bir nesne (ne) radyasyon yayılımıyla (ne olduğuyla) ilgilenmez.

Parçacıklara gelindiğinde, işler bu kadar kolay değildir. Parçacıkların *ne olduğu* ile *ne yaptıkları* birbirlerine bağlıdır. Atomun içindeki dünyanın tuhaflığı işte buradadır. Bu nedenle ilerleyen bölümlerde siz (ve ben), parçacıkların *özelliklerinin, hareketleriyle* birleştiğindeki dönemlere dikkat etmeliyiz.

Bir de atomun içindeki dünyanın *neden* bu kadar tuhaf, sıra dışı ve muhteşem olduğunu sormak için durayım. Neden çok küçük ve çok hızlıyı yöneten kanunlar sağduyuya karşı gelir? Niçin bunlar zekamızın sınırlarını zorlar? Bunların tuhaflığı açıklanamamıştır. 1900'ler öncesi klasik fizikçiler doğal olarak, bizi çevreleyen dünyadaki sıradan kavramların, duyu dünyamızla algılayamadığımız, dokunulamayacak kadar küçük ve görülemeyecek kadar hızlı nesneler için bize doğayla ilgili artan bilgilerle hizmet vermeye devam edeceğini tahmin etmişlerdir. Öte yandan, bu klasik bilim insanlarının kuralların değişmeden kalacağını bilme şansı yoktu. Nasıl emin olabilirlerdi -ya da *bir kimse* nasıl emin olabilir kisıradan araştırmaların sonucu olan "sağduyu" görülemeyen,

duyulamayan veya dokunulamayan fenomenleri açıklamaya yardım edecek?

Aslında geçtiğimiz yüzyılın fiziği bize sağ duyunun rehberliğinin, yeni bilgi dünyasında zayıf kaldığını öğretmiştir. Kimse bu sonucu tahmin edemezdi, ama kimse buna şaşırmamalı. Günlük hayattan edindiğimiz tecrübeler madde ve devinim ile uzay ve zaman konusundaki görüşlerimizi şekillendirir. Sağduyu; katı madde katıdır, tüm doğru saatler aynı zamanı gösterir, bir çarpışmadan sonra maddenin kütlesi öncekiyle aynıdır ve doğanın kuralları açıklanabilir yani yeterince doğru veri güvenilir sonuçlar elde edilmesine yol açar der. Ancak bilim, sıradan tecrübelerin dışına çıktığında -örneğin atomun içindeki dünyaya girdiğinde- her şey çok farklılaşır. Katı madde çoğunlukla boş alandır, zaman izafidir, kütle çarpışmada artabilir ya da azalabilir; veri ne kadar kusursuz olursa olsun, sonuç belli değildir.

Bu neden böyledir? Nedenini bilmiyoruz. Sağduyu duyularımızın alanının dışında genişleyebilirdi, ama genişlemedi. Bizim her gün gördüğümüz dünya, doğrudan algıladığımız şeylere dayanan sınırlı bir dünyadır. Televizyon haber bülteninin değerli eski sunucusu Walter Cronkite'ın "Bu, olması gerektiği gibidir." sözlerini tekrarlayabiliriz sadece. Büyülenebilirsiniz, aklınız karışabilir, sersemleyebilirsiniz ama şaşırmamanız gerekir.

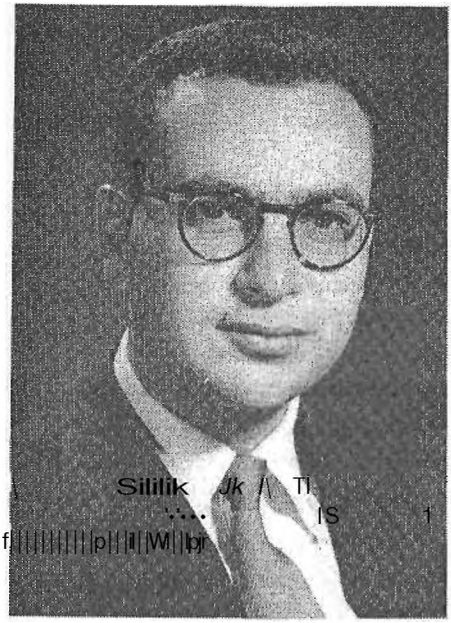
1976 yılında ben elli yaşımdayken, atomun içinde bilinen yüzlerce parçacık vardı. Bu parçacıklardan bir kısmı 1930'larda, biraz daha fazlası 1940'larda, çok büyük bir bölümü ise 1950 ve 1960'larda keşfedilmeye başlamıştı. Fizikçiler bunlara, "temel" ya da "asal" parçacıklar demeyi bırakmışlardı. Çünkü onlar böyle denilemeyecek kadar çoktu. Ancak bu parçacıkların sayısı kontrolden çıkmaya başlayınca, fizikçiler basitleştirilmiş bir şema ortaya koydular. Sayıları kontrol edilebilecek kadar az olan parçacıklar temeli oluşturdular (bugüne kadar kimsenin doğrudan görmediği kuarklar da buna dahil). Eskiden beri bilinen protonun da dahil oldu-

ğu bilinen parçacıkların çoğu bileşikti -yani temel parçacıkların kombinasyonundan oluşmuşlardı.

Burada, onlarca yıl önce neler olduğuyla, bizim atomları ve çekirdekleri arayışımız arasında bir benzerlik var. *Nötron* (yüksüz veya nötr, protonun kardeşi) 1932'de keşfedildiğinde bilinen atom çekirdeği sayısı yüzlerce olmuştu. Her biri bir kütle ve bir pozitif elektrik yüküyle tanımlanmaktaydı. Yük, *atom numarasını* ya da periyodik tablodaki yeri belirliyordu. Başka bir deyişle, *elementi* tanımlıyordu (element kendine özgü kimyasal özellikleri olan maddeye denir).

Hidrojen çekirdeğinin yükü bir ünite, helyum çekirdeğinin yükü iki ünite, oksijen çekirdeğinin sekiz, uranyum çekirdeğinin doksan iki ünite vb. idi. Aynı yükteki bazı çekirdekler (dolayısıyla aynı elementin çekirdekleri) farklı kütlelere sahipti. Bu çekirdeklerin etrafında bulunan atomlara *izotop* adı verildi. Bilim insanları, her biri ortalama iki ya da üç izotopa sahip olan doksan civarındaki elemente ait yüzlerce çekirdek tipinin daha az sayıdaki daha fazla temel bileşenden oluştuğundan emindi; ama nötronun keşfinden önce bu bileşenlerin ne olduğu konusunda fikirleri yoktu. Nötron olayı aydınlattı (ancak daha sonra onun da bir bileşik olduğu keşfedildi). Çekirdekler iki parçacıktan oluşmaktaydı, proton ve nötron. Protonlar yükü taşırken, proton ve nötronlar birlikte kütleyi oluşturuyorlardı. Bir atomun içinde çok geniş bir yer kaplayarak çekirdeğin etrafında vızıldayanlar elektronlardı. Böylece üç temel parçacık, yüzlerce farklı atomun yapısını açıklıyordu.

Atomun içindeki parçacıklara gelindiğinde; kuarkların "keşfi" atomlar için nötronun keşfi gibi bir şeydi. "Keşif sözcüğünü tırnak içine alıyorum çünkü her ikisi de Caltech'de çalışan Murray Gell-Mann ve George Zweia, 1964'de birbirlerinden bağımsız yaptıkları çalışmalarda, kuarkların var olduklarını gözleme dayanarak kanıtlamadan öne sürmüşlerdi ("kuark" sözcüğünü Gell-Mann'a borçluyuz). Günümüzde kuarkların var olduklarının kanıtı hâlâ dolaylı olsa da, yine de bunların var olma olasılığı çok yüksektir. Bugün kuarklar proton, nötron ve diğer bütün parçacıkların bile-



Murray Gell - Mann (Doğum 1929), 1959. Fotoğraf: Harvey of Pasadena; AIP Emilio Segrè Görsel Arşivi

şeni olarak bilinirler.

Fizikçiler, daha sonra, atomun içindeki parçacıklar için *bir standart model* buldular. Bu modelde elektron, foton ve yarım düzene kuarkın da içinde bulunduğu yirmi dört temel parçacık vardır, bu modelde araştırılan bütün parçacıklar ve bunların birbirleriyle olan etkileşimleri açıklanmıştır.* Yirmi dört, üç kadar (1926'da bilinen parçacıkların sayısı) sevimli bir küçük sayı değildir, ama bu yirmi dört parçacık "temel" kalmak için inatla direnmiştir. Kimse onlardan herhangi birinin diğerinden yaratıldığını ve daha temel varlıkların olduğunu bulamamıştır.

Ama eğer kuramcılar haklıysa (onların fikirlerine ileride değineceğim), daha küçük ve daha basit yapılar keşfedilmeyi bekliyor olabilir.

Temel parçacıklardan bazılarına *lepton*, bazılarına *kuark*

* Bu yirmi dört parçacık içinde yerçekimi -yerçekiminin kuramsal parçacığıya da başka bir kuramsal varlık olan Higgs parçacığı (parçacık dünyasının insan adıyla anılan tek parçacığı) yer almaz. Karşıt parçacıklar da bu sayının dışındadır.

ve bazılarına da *güç taşıyıcısı* denir. Sizlere bunları anlatmadan önce gelin atomun içindeki dünyada neler olduğunu açıklamaya yarayan sayı ve büyüklüklere bakalım.

2. bölüm

Küçük Ne Kadar Küçük? Hızlı Ne Kadar Hızlı

// Ne kadar Büyük?" ya da "ne kadar küçük?" bizim atom içi alanda ölçtüğümüz şeylerdir. Bildiğiniz gibi atomlar küçüktür, atomun içindeki varlıklar ise daha da küçüktür, bu yüzden ışık son derece hızlı hareket eder, parçacıklar da bu hıza yakın bir hızda uçar ve gözümüzü bir kez kırpmamız, bir parçacığın ortalama ömründen çok daha uzun sürer. Bunları anlatmak, görüntülemekten daha kolay. Kitabın bu bölümünde amacım, küçük boyutlar, yüksek hızlar ve kısa zaman süreleri içinde kendinizi rahat hissetmeye başlamanız için, atom içi âlemini "görmenize" yardımcı olmak.

Görünen o ki, parçacıkları tanımlamak için gereken kavramaların çoğu kesinlikle tuhaf değildir; sadece ölçüler farklıdır. Uzunluk, hız, zaman, kütle, enerji, yük ve dönme bir elektronu olduğu kadar bir bovvling topunu da tanıtmada kullanılabilir. Atom içi alemiyle ilgili sorulması gereken sorular şunlardır: Bu sayılar ne kadar büyük? Bunu nasıl biliyoruz? Onları ölçmede kullandığımız uygun birimler nelerdir?

Büyük ve küçüğü anlamak için sıkıcı olmayan basit bir sayı sistemine ihtiyacımız var. Pek çok okuyucu zaten sayı sistemini biliyordur. Bin; 1.000 veya 10^3 diye gösterilir. Bir milyon; 1.000.000 veya 10^6, bir milyar; 1.000.000.000 ya da 10^9 şeklinde gösterilir. Basit gözüküyor. On sayısının kuvveti, sayı yazıldığında gördüğümüz sıfırlar kadardır.

Ancak onun kuvvetini yazarken ondalık virgülü kullanılırsa daha iyi olur. Böylece 243 milyon; 243.000.000 ya da $2{,}43 \times 10^8$ şeklinde yazılır. 2,43'den 243.000.000'a dönmek

için ondalık virgülü sekiz basamak sağa kaydırılır. On'un kuvvetlerini kullanarak sayıları ifade ettiğimiz sisteme üslü sayılar notasyonu (ya da çoğu zaman, bilimsel notasyon) denir.

1 'den küçük sayılar için de kurallar benzer şekildedir. (Aslında tamamen aynıdır). Sıfır tam binde bir; 0,001 ya da 10^{-3} şeklinde ifade edilir. (Eğer 1'le başlarsanız ve ondalık virgülünü üç basamak sola kaydırırsanız 0,001'i elde edersiniz.) Diyelim ki uzunluğu 2,2 milyar metre olan büyük bir molekül var. Bu uzunluk 0,0000000022 m diye yazılabilir ama 2,2 x 10^{-9} m şeklinde yazmak daha uygundur.

Üslü sayı sisteminde *çarpma* üs rakamlarını *toplayarak* yapılır. Bir milyar; bin kere bir milyondur: 10^3 x 10^6 = 10^9. Bir trilyon; bin kere bir milyardır: 10^3 x 10^9 = 10^{12} Bölme yapmak için üs sayılarını *çıkartırız*. Örneğin, 8 x 10^{16} metrelik mesafede yani çok uzakta sayılmayan bin yıldıza 4 x 10^8 saniyede (yaklaşık on üç yılda) ulaşmak için bir parçacığın hızı ne olmalıdır? Bu, mesafe zamana *bölünerek* bulunur: 8 x 10^{16} metre bolü 4 x 10^8 saniye = 2 x 10^8 m/s (ışık hızının yaklaşık 2/3 'ü).

Üslü sayı sistemi, bilim insanlarının büyük ve küçük sayılarla başa çıkmak için kullandığı yollardan biridir. Diğer yol ise, çalışılan alana daha uygun olan yeni birimler oluşturmaktır. Biz bunu (en azından Amerika Birleşik Devletleri ve Büyük Britanya'da) uzunluğu feet ve inçle, seyahat mesafelerini mille ölçtüğümüz daha büyük ölçüler dünyasıyla yapıyoruz. Astronomlar diğer yıldızlara olan uzaklığı ölçmek için daha büyük bir birim kullanıyorlar, ışık yılı*. Bilgisayarlarımızda kilobayt, megabayt, gigabayt'ı (sırasıyla 10^3, 10^6, 10^9) kullanıyoruz. Eczacılar miligramı (gramın bindi biri) kullanıyor. Jet pilotları Mach sayısını kullanıyor (havada ses hızının katsayısı olarak tanımlanan hız).

Parçacık dünyasında uzunluk birimi için femtometref (10^{-15} m), hız birimi için ışık hızı (3 x 10^8 m/s, sembolü c) yük

* Ya da bazen 3,26 ışık yılı olan parsek'i kullanıyorlar.

t Femtometreye İtalyan asıllı Amerikalı nükleer fizikçi değerli Enrico Fermi anısına "fermi" denirdi. "Femtqmetre"nin kısa yazılışının fm olması ne güzel bir tesadüf.

birimi için elektron yük büyüklüğü (sembolü *e)* ve enerji birimi için elektron voltu (sembolü eV) kullanırız.

Elektron volt, 1 voltluk elektrik gücüyle (yada voltajıyla) hızlandırılan bir elektrondan elde edilen enerjidir. Örneğin televizyon tüpünün içinde bulunan 1500 voltluk elektriği iten (ya da çeken) bir elektron ekrana doğru 1500 eV'lik bir enerjiyle uçar. Ayrıca, bir elektron voltu kabaca kırmızı ışık fotonu tarafından taşınan enerji kadardır. On tane elektron voltu bir atomu iyonize edecek (elektronu serbest bırakacak) güçtedir. Kütle ve enerjinin denkliği nedeniyle parçacık kütleleri eV birimleriyle de açıklanabilir. Örneğin bir elektronun kütlesi 511.000 eV (511 x 10^3 eV ya da 511 keV) ve protonun kütlesi 938.000.000 eV (93^8 x 10^6 eV veya 93^8 MeV, 1 GeV'den biraz az)* dır. eV birimlerindeki parçacık kütleleri biraz daha büyüktür.

Tablo A2'de (ek A'da) maddenin bazı özelliklerinin büyük ölçekli dünyada kullanılan birimleri ve atom içi dünyasının büyüklük sembolleri görülmektedir.

Uzunluk

Uzunluk sıkıcı bir konu mudur? Atom içi mesafeleri görüntülemeye çalışmaya başladığınız zaman değil. Atom çekirdeklerinin büyüklüğü bir atomun büyüklüğünün 10^{-4} ile 10^{-5}'i arasında değişir. Bir atomun 3 km çapında yani orta büyüklükte bir havaalanı kadar genişlediğini hayal edin. Bunun 10^{-4}'lük bir parçası 30 cm'dir, yaklaşık bir foot, yani kabaca bir basketbol topunun çapı kadardır. Bir havaalanının ortasındaki bir basketbol topu, atomun ortasındaki uranyum gibi "büyük" bir çekirdek kadar yalnızdır. [Örneği daha anlaşılır yapmak için orta noktası yerden bir mil (1.609 m) yükseklikte olan dev bir çatıyla havaalanını kaplayın.] Şimdi, basketbol topunun yerine golf topu koyun; böylece merkezinde pro-

* Ek A'da Tablo A1 'de büyük ve küçük katsayılar için kullanılan standart isimler ve semboller gösterilmiştir.

ton olan hidrojen atomunun modelini elde edersiniz.*

Golf topunun içinde (proton), hiçbiri görülebilir boyutta olmayan kuarklar ve gluonlar gezinir. Golf topunun dışında ise yine görülebilir boyutta olmayan tek bir elektron, atomun • 3 km'lik alanını "doldurur." Görünmeyen bir zerrecik dev bir hacmi mi dolduruyor? Evet. Maddenin dalga yapısı sayesinde, bu gerçekleşiyor.

Golf topu kadar irileştirilen bir protonu büyütme işlemi bir çocuğun 1 cm çapındaki bilyesine uygulanırsa ne olur? Bilye dünyanın yörüngesinin çapma eşit bir alan kadar genişler. Dünya bilyenin yüzeyinde bir daire çizerken, bilyenin içinde Güneş, Merkür ve Venüs vardır.

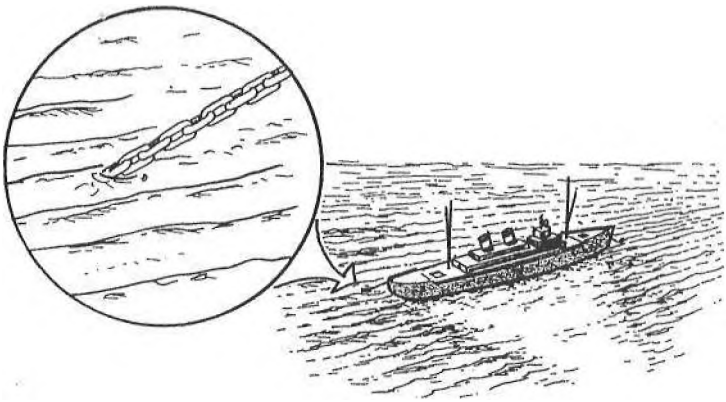
Golf topumuz protonun gerçek boyutuna dönüştüğünde 10^{15} m'lik bir çapı olur. Bu da 1 femtometreye ya da 1 fermi'ye (1 fm) eşittir. Bugüne kadar yapılan bütün deneylerde incelenen en kısa mesafe, yaklaşık olarak, bir fermi'nin binde biri ya da 10^{18} m'dir. Asal parçacıklar, eğer bir boyuta sahiplerse, bu ölçüden daha küçüktür.

İnanılmayacak derecede kısa mesafeleri nasıl ölçeriz peki? Cetvelle ya da pergelle değil tabi. Yöntemlerden biri, *yaydım deneyleri* yapmaktır. Diyelim ki elektron ışınları çok sayıda proton içeren hidrojen örneğine ateşlendi. Elektronlar yoldan çıkarlar -yani yayılırlar- elektron fırlatıcıları ve proton hedeflerinin arasında gerçekleşen elektrik gücü ile dağıtılırlar. Eğer protonlar nokta parçacıklar olsaydı (yani matematikte var olan noktalar kadar küçük olduğu düşünülebilir), elektronlar önceden tahmin edilebilir bir modelde oluşurlardı. Elektronların yayılmasının *gerçek* şekli ise böyle bir model tahmininden farklıdır. Bir elektronun, bir protona hangi yaklaşım mesafesinde bir çekim kuvveti hissettiği, nokta parçacıklarda beklenenden farklıdır. Modelin analizi protonun boyunun yaklaşık

Bir uranyum atomu bir hidrojen atomundan çok az daha büyüktür, (bu yüzden havaalanı ölçüsünü değiştirmeye hiç gerek yok). Uranyum çekirdekleri ne kadar çok yüklü olursa elektronlarını o kadar kuvvetle çeker ancak atomun boyutundaki küçük değişikliğin dengelenmesinin sonucu olarak daha fazla elektron çeker.

1 fm olduğunu gösterir; ayrıca bu analiz protonun pozitif elektrik yükünün protonda nasıl dağıldığını da açıklar. (İlk olarak Ernest Rutherford 1920'de alfa parçacıklan üzerinde yaptığı yayılım deneyleri sonucunda, atom çekirdeklerinin büyüklüğünün ölçülebilir olduğunu söylemiştir.)

Maddenin dalga yapısı da küçük mesafelerin ölçülmesine yardımcı olur. Hareket halindeki her parçacığın belirli bir dalga boyu vardır. Parçacık ne kadar enerjik olursa, dalga boyu da o kadar kısa olur. Dalgalar hedeflerinden *sapar* ve bu da hedeflerin dalga boyu kadar ya da dalga boyundan daha büyük olduğunu gösterebilir. Örneğin su dalgaları salladıkları demirlemiş bir geminin özelliklerini açıklayabilir ama vurdukları zincirler hakkında yok denecek kadar az bir açıklama yapabilirler. En iyi mikroskopların yardımıyla ışık dalgalarının biyolojik özelliklerinin ışığın dalga boyu kadar küçük olduğu görülebilir, ama ışığın dalga boyundan daha küçük özellikler, örneğin virüs yapılarının özellikleri görülemez. Modern hızlandırıcılardan yayılan, en enerjik parçacıkların dalga boyları 0,001 fm (10^{18} m) civarındadır. Bunların kırılması, kısa mesafelidir.



Şekil 1. Gemiye vuran dalgalar gemi hakkında pek çok şeyi açıklayabilir, ancak zincir hakkında hiçbir şey açıklayamaz.

Evren bu kitabın konusu değil, ancak bilim insanlarının keşfettikleri en büyük ve en küçük alanların içinde biz insanların nerede bulunduğunu görmemiz gerekir. Bildiğimiz evrenin yarıçapı, yaklaşık on dört milyar ışık yılı yani 10^{26} m kadardır. Bir masanın genişliği evrenden 10^{26} kat kadar küçüktür ve parçacık deneylerinde görülen en kısa mesafelerden "sadece" 10^{18} kat büyüktür. Büyük ve küçük sınırlar arasındaki "cimri" bir mesafe 10^{4} m, ya da 10 km'dir. (Yaklaşık 6 mil). Diyelim ki bu mesafe sizin her gün işe gidiş geliş mesafeniz. Bu mesafeyi 10^{22} ile çarpın, böylece evrenin yarıçapını bulursunuz. Bu mesafeyi 10^{22}'ye bölün, böylece araştırmanın şimdiki zamana ait küçüklük sınırına ulaşırsınız. Altı millik tanıdık bir mesafenin, halen bilim dünyasında bilinen en büyük ve en küçük mesafelerin yansı (oran diye ifade ediyoruz) kadar olduğunu bilmek yararlı olabilir. Şu 10^{22} sayısı ne kadar büyük acaba? Eğer bu sayıda gün işe gidip gelseydiniz, iş hayatınız evrenin yaşından iki milyar yıl kadar daha uzun olurdu. Eğer bu sayıda insanı galakside değişik yerlere yerleştirseydiniz, bunları içine almak için bir trilyondan fazla gezegen gerekirdi. Bu aynı zamanda, kabaca, bildiğimiz evrendeki yıldızların toplam sayısı ile soluduğumuz havadaki atomların sayısıdır. Peki ya 10^{44}, yani en uzak ile en yakın mesafelerin oranı? Bunu, bu sayının büyüklüğünü, düşünmesi için okuyucuya bırakıyorum.

Uzunluk konusunu bitirmeden önce teorisyenlerin üzerinde çalıştığı neredeyse hayal edilemeyecek kadar küçük mesafeye değinmek istiyorum. Bu yaklaşık 10^{35} m'lik *Planck uzunluğudur** Protonun boyunun yaklaşık 10^{15} m olduğunu hatırlayın. Bu, Planck uzunluğunu zaten çok küçük olan protondan 10^{20} kat yani yüz milyar milyar kat daha küçük yapan Takdir etmeliyiz ki fizikçiler, hesaplamalara göre sadece par-

* Nükleer fizik ve yerçekimi konularında çalışmalar yapan Amerikalı fizikçi John Wheeler, 1950'lerde *Planck uzunluğu* terimini kuantum fiziğinin Alman öncülerinden Max Planck'e itafen kullanmıştır. (Wheeler'in icat ettiği pek çok terim fizik dünyasında kullanılmaktadır. Bunların arasında *kuvantum köpüğü* ve *kara delik* terimleri de vardır.)

cacıkların değil, uzay ve zamanın da kuvantum mekaniğinin tuhaf kurallarının alanına girdiğini düşünmeye cesaret ederler. Planck ölçüsüne göre, uzayın ve zamanın, bizim günlük hayatımızdaki bilinen uysal karakterini kaybedip sinirli bir kuvantum köpüğüne dönüşmesi, beklenir. Yine aynı büyüklük ölçüsü içinde kuramsal *diziler,* laboratuarda gördüğümüz parçacıkları oluşturacak şekilde hula-hup dansı yapabilirler.

Hız

Acelesi olan bir salyangoz saniyede 0,01 metrelik (0,01 m/s) bir hızla hareket eder. Bir insan 1 m/s hızla yürür, 30 m/s hızla araba kullanır, serin havada 330 m/s (saatte 740 mil)'lik ses hızına yakın bir hızda uçakta uçar. Işık, bir yerden bir yere insana göre yaklaşık bir milyon kat daha hızlı, yani 3×10^8 m/s hızla ulaşır.

Uzun olsun kısa olsun, mesafenin bildiğimiz sabit bir sınırı yok. Ancak doğanın belirlediği sabit bir hız sınırı var; ışık hızı. Işık hızını geçecek bir aracın bileti bu güne kadar basılamadı; yani bildiğimiz kadarıyla bu sınırın bariyerlerini aşmayı başaracak bir şey yok.

Yörüngedeki bir astronot bile kırk bin faktörlük ışık hızına yetişemez. Dünyanın etrafını bir kez dolaşmak için astronotun bir buçuk saate ihtiyacı varken, bir optik tel etrafında dönen ışık bu işi saniyenin onda birinden biraz daha fazla bir sürede yapar. Ama yine de biz insanlar, zaman ve mesafenin sınırlarında olduğumuz için doğanın azami hızından çok uzakta değiliz.

İnsanlar ilk defa 1969 yılında sabit ışık hızını (ya da aynı anlama gelen radyo dalgalarını) hissetme fırsatını yakaladılar. Houstan'daki bir NASA görevlisinin aydaki bir astronotla konuşmasını duyduk. Sonra, sıradan bir sohbette beklenenden daha uzun bir gecikmeyle astronotun cevabını duyduk. Süredeki gecikme, normal reaksiyon süresine ilave olarak, sinyallerin ışık hızında aya gidip gelmesi için süren yaklaşık

2,5 saniyelik bir süreydi. Çocuklar, okulda, güneş ışınlarının Dünya'ya ulaşmasının sekiz dakika sürdüğünü öğrenirler. Bir sonraki en yakın yıldızın ışığının bize ulaşması dört yıl alır; evrenin en uzak noktasından ışığın buraya ulaşması ise on milyar yıldan daha uzun bir zaman alır. Astronomlara göre ışık aheste bir şekilde ilerler.

Dünyada katı sıvı ve gazlarda durmadan hareket eden atomlar ve moleküller, havada ses hızının bir ile on katına, ışık hızından ise 10^5 ile 10^6 defa daha kısa bir hıza ulaşırlar. Ancak parçacık hızlandırıcılarındaki ya da uzaydan kozmik ışınlar olarak gelen parçacıkların hızlarının ışık hızına yakın olması son derece olağandır. Kütlesiz olan fotonların seçme şansı yoktur. Kütlesiz parçacıklar için mümkün olan tek hızda yani ışık hızında seyahat ederler. Çünkü bunlar *zaten* ışıktır. Çok hafif kütlesi olan nötronlar, neredeyse fotonlar kadar hızlı hareket ederler. Modern hızlandırıcılardaki elektronlarda olağanüstü hıza yaklaşırlar, ancak bu hız, ışık hızında gezinen bir böceğin hızı kadar daha yavaştır.

Çok hızlı bir parçacığın ya da ışığın bile hızını ölçmek çok kolaydır; tıpkı harekette olduğu gibi mesafe zamana bölünür. Modern saatler zamanı, saniyenin veya daha azının milyarda bir olarak gösterebilirler. Işık, saniyenin ya da nano saniyenin milyarda birinde bir foot (yani 30 cm) ilerler. Aslında ışık hızı belirli bir standarda oturtulmuş olarak o kadar iyi ölçülüyor ki, zaman ve yer ölçüleri onun yanında ikinci derecede önemli kalıyor.

"Atılgan Uzay Gemisi"nin mürettebatı acelesi olduğundan farklı bir sürüşe geçiyor ve galaksiden, ışık hızının çok ötesinde bir hızla uzaklaşıyor.

Sizce böyle bir bilim kurgu hızının gerçekleşme olasılığı var mıdır? Basit bir nedenden dolayı kesinlikle mümkün değil. Nesne ne kadar hafifse o kadar hızlı hareketlenebilir. Yük trenleri hantal bir yavaşlıkla hızlanır, otomobiller daha çabuk ve hızlandırıcılardaki protonlar daha da çabuk. En kolay hızlanma ise hiç kütlesi olmayan bir parçacığınkidir; aslında yaratıldığı anda kütlesiz foton derhal ışık hızına ulaşır. Ama öte-

sine değil. Eğer ışıktan daha hızlı gidebilen bir şey olsaydı, o zaman kütlesiz fotonlardan oluşan ışığın, kendisinin daha hızlı gitmesi gerekirdi. Ama bilim insanları kesin kurallara direnirler. *Tachyon* diye adlandırılan ışıktan *daha hızlı hareket* eden kuramsal bir varlık üzeride çalışmalar yapılmakta. Tachyon'un bazı çalışmalarda, gideceği yere, seyahatine başlamadan varabildiği görülen tuhaf bir varlıktır. Yine de teorisyenler dişlerini gıcırdatarak da olsa, bu varlık üzerinde çalışmayı sürdürmektedir. Bugüne kadar yapılan araştırmalarda Tachyonla ilgili hiçbir şey bulunamamıştır.

Zaman

"Kısa" zaman ve "uzun" zaman nedir? Biz insanlar için bir yıl uzun bir zamandır, saniyenin yüzde biri ise kısa bir zamandır.* Öte yandan bir parçacık için saniyenin yüzde biri sonsuzluk demektir. Evrendeki gösterişli olaylar zincirinde ise bir milyon yıl, öğle tatili kadardır.

Bir parçacığın ışık hızına yakın bir hızda protonun çapından geçme süresi, parçacığın saatindeki "tık" sesi için iyi bir seçimdir. Bu yaklaşık 10^{-23} s, yani saniyenin milyarda birinin milyarda birinden daha kısa bir süredir. Bir gluonun (çekirdeğin içindeki "tutkal" parçacık) yaratılışından yok oluşuna kadar geçen zaman da aşağı yukarı bu kadar sürer. Pion (nükleer çarpışmalarda oluşan bir parçacık) bir footluk (30,48 cm) hareketiyle, protonun çapının yaklaşık bir milyon milyarı kadar yol katetmiştir ve bunu yapması 10^{-9} saniyede gerçekleşmiştir. Bir dedektörde iz bırakacak kadar uzun yaşayan parçacıklar 10^{-10} ile 10^{-6} s kadar yaşamış demektir.

Nötron ise tuhaf bir özel vakadır. Ortalama on beş dakikalık ömrüyle parçacık dünyasının en yaşlı ferdidir.

Deneysel olarak belirlenen şimdiye kadar ki en kısa mesa-

* Saniyenin yüzde biri kadar kısa sürede görünen bir şeyi algılayabilirsiniz ama binde birinde görüneni değil. Bazı olimpiyat oyunlarında saniyenin birkaç yüzde biri kazananı belirler.

fe yaklaşık 10^{-18} m olduğundan, bununla ilgili yürütülen çalışmaların yaklaşık 10^{-26} s olduğunu söylemek yanlış olmaz, (zamanı dolaysız ölçmenin hâlâ bu kadar kısa süre için imkânsız olmasına rağmen).* Bilinen en uzun zaman "evrenin ömrü"dür-evrenin bilinen ömrünün bugün itibarıyla 13,7 milyar yıl ya da yaklaşık 10^{18} s olduğu tahmin ediliyor. Evrenin oluşumundan bugüne kadar geçen bu sürelerin oranı 10^{44}'dür. Bu dev sayı bilinen en büyük ve en küçük mesafelerin de oranıdır. Bu bir tesadüf değildir. Evrenin en uzakta kalan bölgesi ışık hızına yakın bir hızda bizden uzaklaşmakta, atomun içindeki dünyada uçuşan parçacıklar da aynı hızda hareket etmektedir. Hem evren hem de atomun içindeki dünyayla ilgili çalışma alanında, ışık hızı mesafe ile zaman ölçüleri arasındaki doğal bağdır.

Kütle

Kütle *durağanın* ölçüsüdür -yani duran bir nesneyi harekete geçirmek ya da hareket halindeki bir nesneyi durdurmak veya yönünü değiştirmenin zorluğunun ölçüsüdür. Fırlatılan bir beysbol topunu fazla sorun yaşamadan durdurabilirsiniz. Aynı hızda size doğru gelen bir bowling topunu durdurmak çok daha zor olur. Hele aynı hızda size doğru gelen yüklü bir arabayı durdurmaya çalışmayı hiç düşünmeyin. Bowling topu beysbol topuna göre daha çok kütleye, yüklü bir araba ise çok daha fazlasına sahiptir. Kütle ne kadar büyük olursa, *nesnenin hareket durumunu* değiştirmek te o kadar güç olur. Sıradan nesnelere göre atomun içindeki parçacıkların hemen hemen hiç kütlesi yoktur. Her dakika vücudunuza doğru gelen muonları durduruyorsunuz ama bunu yaparken hiçbir şey hissetmiyorsunuz. *(Mudnlat;* atmosferin yüksek kesimlerinden gelen kozmik ışınlar tarafından yaratılan değişken parçacıklardır. Bunlar hızla aşağı inerek *zemin radyasyonunun* bir

* Evren bilimciler Büyük Patlama'dan sonraki hesaplarını, 10^{-}" saniye geri çekmeye cesaret etmişlerdir.

bölümünü oluştururlar.)

Günlük hayatta kütleyi ağırlık olarak düşünürüz. Bir nesnenin kütlesini onu tartarak buluruz. Tesadüfen (aslında tesadüfen değil, önemli bir nedeni var), yerçekimi nesneyi kütlesiyle orantılı bir şekilde çeker.

Böylece Dünya üzerinde bir nesnenin kütlesine, dünyanın yerçekiminin o nesneyi ne kadar kuvvetle aşağı doğru çektiğini ölçerek karar veririz. Bu yöntem, bakkal dükkânlarında ve kamyon ölçüm istasyonlarında işe yarar ama uzayda değil. Uzay istasyonu etrafında dönen bir uzay gemisindeki astronotun ağırlığı yoktur ama hâlâ bir kütlesi vardır. Julie ya da Jack adındaki bir astronot yörüngede dönerken bir tartının üzerine çıkarsa tartı sıfırı gösterir. Ağırlığı yok demek işte bu anlama gelir. Ama eğer Julie ve Jack ellerinden tutarak birbirlerini iterlerse, hareket için efor sarf etmeleri gerekir. Bunun nedeni her birinin kütlesi ya da durağanlığının olmasıdır. Birbirlerini itme hızları kütleleriyle ters orantılıdır. Eğer birbirlerini ittikten sonra Julie 1,2 m/s'lik bir hızla sürüklenirken Jack 1,0 m/s'lik bir hızla sürükleniyorsa, bunun nedeni Jack'in kütlesinin Julie'ninkinden 1,2 kat daha fazla olmasıdır. Jack harekete bu oranda dayanıklıdır. Julie kendi kütlesini, 1 kg'lık bir ağırlığı havaya atarak ve bu ağırlığın kendi geri gelişinden ne kadar daha fazla hızlı uçtuğuna bakarak hesaplar.

Pratikte, uzun bir yolculukta olan bir astronotun ağırlığının arttığını ya da azaldığını bulmak için, astronot özel olarak tasarlanmış bir koltuğa oturtularak bir sağa bir sola sallandırılır. Koltukta bulunan mekanizma, astronotun bu sallantıya gösterdiği direnci ölçerek bunu "ağırlık" (kütle) cinsinden gösterir.

Bir parçacığın küçük kütlesi de aynı yöntemle ölçülebilir. Eğer parçacık yüklüyse, bu yükün yönü manyetik bir alanda değiştirilir. Parçacığın hızı biliniyorsa, bilim insanı parçacığın kütlesini izlediği yoldaki sapmadan bulabilir. Hareket halindeki bir parçacığın bile sabitliğinden bahsedebiliriz, yani hareket yönündeki değişikliğe gösterdiği dirençten. Daha bü-

yük kütlesi ya da daha fazla hızı olan bir parçacık daha fazla sabittir.

Einstein'in kütle-enerji eşitliği ($£ = mc^2$) de parçacıkların kütlesini ölçmeyi sağlayan yöntemlerden biridir. Bu eşitliğe ve onun bazı çıkarımlarına gelecek bölümde değineceğim. Bir parçacığın toplam enerjisini bilen -örneğin o parçacığın nasıl yaratıldığını bilerek- ve onun kinetik enerjisini (hareket enerjisini) ölçen bir bilim insanı, kütle enerjisini yani bir bakıma kütleyi bulmak için, kinetik enerjiyi toplam enerjiden çıkarabilir demek şimdilik yeterli

Birinci bölümde bahsedildiği gibi, enerji, parçacıkların kütlelerini ölçme ve raporlamada yaygın olarak kullanılır.

Örneğin, bir protonun kütlesi 938 milyon elektron volt (938 MeV) dediğimizde bu, protonun kütlesini ışık hızının karesiyle çarparak şu kadar enerjiye sahip bir kütlesi var demektir. Bu ölçü kilogram cinsinden çok küçüktür, yani 1,67 x 10^{-27} kg'dır. Gördüğünüz gibi parçacık kütlelerini belirlerken MeV ve GeV birimleri kg'dan çok daha kullanışlıdır. Evrende kütle konusunu bitirirken şöyle bir soru soralım: Evrenin kütlesi ne kadardır? Bu tam olarak bilinmiyor ama kaba bir tahmin yapılabilir. Astronomlar görebildiğimiz evrende yaklaşık 10^{22} yıldız olduğunu tahmin ediyorlar. (Bir gram suyun içindeki molekül sayısından çok daha az). Ortalama bir yıldızın ağırlığı (yani kütlesi) yaklaşık 10^{30} kg'dır, yıldızların toplam ağırlığı ise 10^{52} kg'dır. Maddenin her bir kilogramında 10^{27} proton vardır, böylece görebildiğimiz evrende (çok kabaca) 10^{79} proton vardır.* Bir de göremediğimiz bir evren *(kara cisim)* vardır, bu evren görebildiğimiz evrenden altı kat daha büyük olabilir. Peki kara cisim nedir? Günümüz evren biliminde cevaplanmamış en büyük sorulardan biri işte budur.

* Evrenin bilinen bölümünde tahminen protonlarla aynı sayıda yani yaklaşık $W^{elektro}$n vardır. Ayrıca, bundan bir milyon kat daha fazla foton kabaca 10^{TM}, ve neredeyse fotonların sayısı kadar nötrino vardır. (Fizikçi George Gamow elinde "En az 100 nötrino içerdiği garantilidir." yazan bir kibrit kutusuyla gezerdi.)

Enerji

Enerji, bir aktörün sahneden bir kostümle ayrılıp, başka bir kostümle sahneye geri gelmesi gibi, pek çok görünüşe sahiptir ve hızla şekilden sekile girebilir. Bu zengin çeşitlilik sayesinde enerji, doğanın tanımlandığı hemen her yerde ortay çıkar ve bilimin tek en önemli kavramı olma özelliğine sahiptir.

Enerjinin önemi sadece şekil çeşitliliğinden değil, korunumundan da kaynaklanır: evrendeki enerjinin toplamı daima aynıdır, çünkü bir enerji türünün kaybı başka bir enerji türünün kazanılmasıyla telafi edilir. Kuvvet enerjisi, kimyasal enerji, nükleer enerji, elektrik enerjisi, ışın enerjisi, ısı enerjisi ve bunlar gibi daha pek çok enerji türünden bahsedebiliriz. Parçacık dünyasında sadece iki belirgin enerji şekli vardır: kinetik enerji ve kütle enerjisi. *Kinetik enerji* hareket enerjisidir, kütle enerjisi ise varlığın enerjisidir.

Bir parçacık ne kadar hızlı hareket ederse, o kadar kinetik enerji vardır. Hareketsizken kinetik enerji sıfırdır. Aynı hızda hareket eden iki parçacıktan daha büyük kütlesi olanın kinetik enerjisi daha fazladır.* Fotonların garip özellikleri vardır. Sabit bir hızda (c) Hareket ederler ve sıfır kütlelerine rağmen kinetik enerjileri vardır. Yavaşlatılamadıkları ve durdurulamadıkları için (ancak yok edilebilirler), hiçbir zaman kinetik enerjileri sıfır olmaz. Kütleleri olmadığı için de kütle enerjileri yoktur. Bunlar saf kinetik varlıklardır.

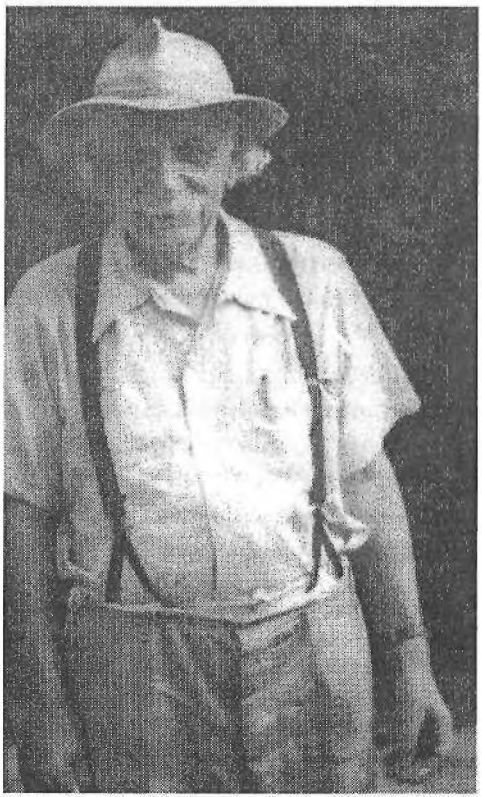
Yirminci yüzyılın başlarında kütlenin bir enerji türü olduğunu keşfeden kişi Albert Einstein'dı. Herkes onun şu formülünü bilir: $E = mc^2$

Şimdi bunun ne alama geldiğini görelim. İlk olarak bu formül bize kütle enerjisi ya da var olma enerjisinin kütle ile

* Işık hızından çok daha az hızlarda, kütlesi m olan ve v hızında hareket eden bir parçacığın kinetik enerjisi KE = (1/2) mV şeklinde ifade edilir. Işık hızına yakın hızlarda ise bu "klasik" formülün yerine "izafi" bir formül kullanılır. Bu formüle göre hız ışık hızına yaklaşırken kinetik enerji de (KE) sonsuz değere ulaşır. Ancak ışık farklı bir kurala uyar. Onun kinetik enerjisi frekansına ve dalga boyuna bağlıdır. Mavi foton kırmızı fotondan daha fazla kinetik enerjiye sahiptir.

orantılı olduğunu gösterir. İki kat kütle iki kat kütle enerjisi, sıfır kütle sıfır kütle enerjisi demektir. C^2 ışık hızının karesinin sembolüdür ve *orantının sabiti* diye adlandırılır. Kütlenin ifade edildiği birimi, enerjinin ifade edildiği birime çevirme görevini üstlenmiştir. Aşağıdaki eşitliğin, arabanızın deposunu benzinle doldurma maliyetini ifade ettiğini düşünün, $C = GP$.

Maliyet, C, eşittir galon miktarı, *G*, çarpı benzinin galon fiyatı *P*. Maliyeti galon miktarıyla orantılıdır, fiyat, *P* orantının sabitidir ve galon miktarını dolar miktarına dönüştürür. c^2'de bir bakıma fiyattır. Her kütle birimi için olan enerjidir, bir birimlik kütle yaratmak için enerji cinsinden ödenecek bedeldir. Ve bu bedel çok yüksektir. Standart birimlerde (enerji joule cinsinden, kütle kilogram cinsinden): $c^2 = 9 \times 10^{16}$J/kg'dır. Bu



Albert Einstein (1879-1955). 1954, Fotoğraf Richard Arens; AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

nedenle kütle enerjinin oldukça yoğun bir şeklini temsil eder. Küçük bir kütle, büyük bir enerjiye yol açar. Küçük bir kütle, oluşturmak için büyük miktarda enerji gereklidir.

Modern hızlandırıcıların temel amacı, kinetik enerjiyi kütle enerjisine dönüştürmektir. Kinetik enerjiye sahip bir proton, belki de sabit durduğundan bin kat daha fazla enerjiye sahipken bir başka protona çarparsa, bu kinetik enerjinin büyük bir bölümü yeni bir kütle yaratmak için elverişli olur. Düzinelerce ya da yüzlerce parçacık bu çarpışma noktasından uzaklara uçabilir. Böyle bir çarpışmada neler olduğunun analizi enerji ve momentum korunum kanunları yardımıyla yapılabilir.*

Enerjinin çeşitli şekillerinde, çok farklı ölçü birimlerinin ortaya çıkması şaşırtıcı değildir. Bir joule, 1 m/s'lik hızla hareket eden 2 kg'lık bir kütlenin kinetik enerjisidir. Bir kalori, bir gram suyun sıcaklığını bir santigrat derece artırmak için gerekli olan enerjidir. Yaklaşık dört joule'a eşittir. Bir besin kalorisi (ya da "büyük kalori" veya büyük *C* harfiyle ifade edilen kalori), bin kaloridir. İki bin ile üç bin besin kalorisi arası bir gün boyunca insanın ihtiyacı olan kaloridir. Başka bir birim, kilowatt saat, aylık elektrik faturasında gördüğümüz birimdir. Bir kilowatt-saat 3,6 milyon joule'a eşittir, bu da 100 vvatt'lık bir ampulü on saat yakacak bir enerjidir, f

Atomun içindeki dünyadaki ortak olan bir özellik, enerji ve kütlenin aynı birimle yani elektron voltla ölçülmesidir. 1930'lardaki ilk hızlandırıcılar, parçacıkların hızının bir kaç milyon elektron voltluk (MeV) enerjiye yükselttiler. Bunu takip eden on yıl ve sonrasında hızlandırıcı enerjiler yüzlerce

* *Momentum* bir parçacığın hareketinin yönünü gösteren kontrol edilen bir semboldür. (Ya da vektör semboldür). Klasik fizikte momentum mv'dir, yani kütle ile hızın çarpımıdır. Isaac Newton momentuma "devinimin sembolü" demiştir. Yüksek hızdaki parçacıklar için momentum $mv/\sqrt{1-(v/c)^2}$'dir, c ışık hızını gösterir. Kuzeyi gösteren bir momentum ile güneyi gösteren eşit büyüklükteki bir momentumun toplamı sıfırdır.

t Gazeteler genellikle enerji ile gücü karıştırırlar. Watt cinsinden ölçülen güç, birim zamandaki enerji miktarıdır. Enerji ise bunun aksine -elektrik şirketinin size sattığı- gücün zamanla çarpımıdır (kilovvatt - saat cinsinden).

kat MeV, sonra GeV ve şimdi de TeV (tera elektron volt ya da trilyon elektron volt) kadar arttılar. Hızlandırılmış enerjiler, en sıcak maddelerdeki termal enerjileri bile büyük oranda aştılar. Güneşin yüzeyinde protonlar, sadece 1 eVTik kinetik enerjiyle hareket ederler, yani protonun kütlesine hapsolmuş enerjiden bir milyar kat daha az bir enerjiyle. Ancak bir TeV hızlandırıcısından proton, durduğundaki enerjisinden bin katı daha fazla kinetik enerji kazanır. Uzaydan Dünya'yı bombalayan kozmik ışınlar, yaklaşık 10^{20} eV'lik yani dünyada görülen en büyük parçacık enerjisinden çok daha fazla enerjiye sahiptir.

Yük

Elektrik yükünün, bir parçacığı karşı cinsten bir parçacığa çekici gösteren bir şey olduğu (ne olduğunu bilmiyoruz!) kesindir. Yükü olmayan nötr parçacıklar diğer parçacıkları etkileyemezler, (en azından elektriksel anlamda). Yük çiftleşebilir. Örneğin, hidrojen atomu, birbirlerini elektrikle çeken bir elektron ve bir protondan oluşur. Daha enerjik parçacıklar elektrik kuvvetinden dolayı çiftleşmezler; çok nadiren doğru yoldan saparlar.

Aynı yükler (her ikisi de pozitif ya da her ikisi de negatif) birbirlerini iter; farklı yükler (pozitif ve negatif) birbirlerini çeker. Bir çekirdeğin içinde pozitif yüklü protonlar birbirlerini iter, ama gluonlar tarafından sağlanan çekici "tutkal" bu itmenin üstesinden gelir ve çekirdeği bir bütün olarak tutar -bir noktaya kadar. Sonunda çok ağır olan çekirdeklerdeki elektrik gücü, gluonların karşı koyabileceğinden daha güçlü bir hale gelir ve çekirdek dağılır. İşte bu nedenle doğada var olan çekirdeklerden hiçbiri uranyum çekirdeklerinden daha ağır olamaz.

Evrendeki büyük ölçekli madde yığınları (gezegenler, yıldızlar ve galaksiler) için yer çekimi -aslında zayıf ama daima çekici olduğu için- kazanır. Daha küçük ölçeklilerde ise elekt-

riğin yerçekimini ittiği kolayca görülür. Saçınızı bir tarakla tarayın ve sonra onu masanın üzerinde duran bir parça kâğıdı kaldırmak için kullanın. Taraktaki belki de bir milyonda bir milyonluk (10^{12}'de 1) yük dengesizliği, o kâğıt parçasını elektriksel olarak kaldırması için yeterlidir ve bu güç, Dünya'nm yerçekimi kuvvetiyle o kâğıt parçasını aşağıya çekmesinden daha fazladır. Eğer tarakta bir şekilde daha büyük bir yük dengesizliği olsaydı, bu yük nötr hale geçerken ya taraktan başınıza doğru öldürücü bir şimşek çakardı, ya da tarak şiddetle ve başınıza doğru gelen öldürücü bir silaha dönüşürdü.

Hangi yüke pozitif hangisine negatif dendiğine keyfi bir şekilde karar verilmiştir, yani bu tarihi bir tesadüfün sonucudur. On sekizinci yüzyıl ortalarında Benjamin Franklin, bir elektrik türünün bir nesneden diğerine gönüllü olarak aktığı sonucuna varmıştır ve bu türe pozitif denmiştir. Böylece protonlar pozitif, elektronlar negatif yüklü diye adlandırılmıştır.

Bugün negatif elektronların akışkan olduğunu ve metallerdeki elektrik yükü akışından sorumlu olduğunu biliyoruz.

Yük, bu bölümün ilk paragrafında bahsedildiği kadar gizemlidir. Fizikçiler onun *korunumunu* (doğadaki kurnaz matematik simetrisine bağlı olarak) anlıyorlar ama onun *mantığını* tam olarak anlamıyorlar. Proton ve elektron yüklerinin büyüklükleri neden birbirlerine eşit? Niçin gözlemlediğimiz bütün parçacıkların yükü protonunkine (+1) ya da negatifininkine (-1) veya bunların katlarına (örneğin +2 veya -2) eşitken, kuarkların yükleri kesirlidir? (örneğin +2^3 ve -1*3). Yüklü bir temel parçacığın yakın çevresinde neler olmakta? Eğer parçacık fiziksel büyümesi olmayan sabit bir noktaysa, kuvvetin elektrik alanı parçacık üzerinde sonsuz büyüklüğe ulaşır.* Eğer parçacığın fiziksel büyüklüğü varsa, toplam yükü oluşturan yük tanecikleri niçin onun uçup gitmesine neden olmuyor? Acaba uzay ve zaman kesin olarak parçacığın olduğu yerde mi doğru yoldan çıkıyor? Bu sorular sorulması gereken doğru sorular olmayabilir ama en azından bizim yükü

* Ters-kare kurumuna göre, kuvvetin alanı parçacıkla arasındaki mesafe küçüldükçe daha büyür, mesafe sıfıra indiğinde kuvvet sonsuz olur.

neden tam ve derinlemesine anlayamadığımızı açıklıyor.

Elektron, sadece temel bir parçacık olduğundan değil (yükü olan en hafif parçacık), aynı zamanda hem ağır sanayi hem de iletişim sanayiinin çalışkan işçisi olduğu için şerefine bir anıt dikilmesini hak ediyor. Elektronlar bilgisayarlardaki küçük devrelere doğru itilip çekilirler; kablosuz mesaj gönderip alan antenlerdeki dalgaları yönlendirirler; kablolardan geçerken güçlü motorlara dönüşebilirler; ve hareketlerini engelleyen bir şeyle karşılaşırsa ışık ve ısı yayarlar.

Günlük hayatımızda yük birimi kulomb'dur. (amper-saniye) (1785'de elektrik kuvvetinin tam kanunu keşfeden Fransız bilim insanı Charles A. Coulomb'un soyadı ile anılır.) Bir kulomb, kabaca, yüz vvattlık bir ampulün içinde bir saniyede dolaşan, yük miktarıdır. Atomun içindeki dünyada ise yük birimi haliyle çok daha küçüktür. Tablo A2'de gösterildiği gibi e ile sembolize edilen bu birim 1,6 x 10" kulomb'dur (yani bir kulomb'un milyarda birinin milyarda birinden daha küçüktür). Sayıları ters çevirirsek, her saniye ampulün içinde dolaşan elektron sayısı 6 x 10^{18}'dir diyebiliriz.

Dönüş

Fotonlardan nötrinolara, galaksilerden galaksi topluluklarına kadar her şey döner. Dünyamız ekseni üzerinde günde bir kez, güneşin etrafında ise yılda bir kez döner. Güneş kendi ekseninde her yirmi sekiz günde bir, galaksi etrafında işe 230 milyon yılda bir döner. Çok daha uzun bir dönme süresinde ise galaksiler topluca birbirlerinin etrafında dönerler. "Evren bir bütün olarak dönüyor mu?" sorusu pek anlamlı değildir, onun yerine "Evrenin dönüşü neye bağlı?" sorusu sorulmalıdır. Ünlü mantıkçı Kurt Gödel bir zamanlar benzer bir soruyu araştırmıştı: Daha çok sayıdaki galaksi bir galaksiden farklı yöne mi dönüyor? Gödel eldeki verilere dayanarak galaksilerin rota eksenlerinin her yöne doğru rastgele dağıldığını söyleyebilmişti. Bu nedenle evren galiba bir bütün olarak

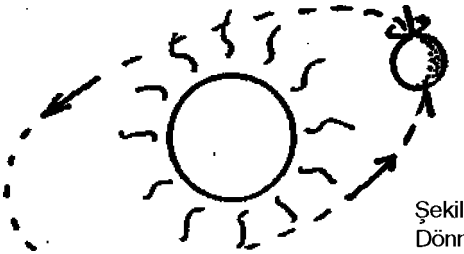
dönmüyor -en azından biz bunu ortaya çıkaracak yeterli bilgiye sahip değiliz.

Küçük boyutlulara geldiğimizde; moleküller döner (sıcaklığa göre değişen oranlarda), atomun içindeki elektronlar ise atom çekirdeğinin etrafında ışık hızının yüzde biri ile yüzde onundan biraz fazlasına kadar olan hızlarla döner. Çekirdeklerin çoğu ile çekirdekteki proton, nötron, kuark ve galonların tamamı döner. Aslında, ister temel ister bileşik olsun, çoğu parçacık dönme özelliğine sahiptir.*

Her tür ölçü tablosunda, iki tür dönme hareketini ele almak yararlı olur. Bunlardan birincisi, nesnenin kendi ekseni etrafında dönmesi (Dünya'nın günlük dönüşünde olduğu gibi), ki biz buna *dönme* diyoruz, diğeri ise başka bir yerdeki nesneni etrafında dönmesi (dünyanın güneş etrafındaki yıllık dönüşü), buna da *yörüngesel hareket* diyoruz. Her iki tür dönüşünün de ölçülmesi *açısal momentum* ile yapılır, açısal momentum dönme sisteminde kütle, boyut ve hızın karışımından oluşan bir ölçüdür. Momentum düz bir hat üzerindeki devinimin "gücünü" ölçerken, açısal momentum bunu dönme hareketinin "gücünü" ve "derecesini" ölçerek yapar.

Temel parçacıklarda belirli bir dönme oranı yoktur. Ancak, elektronlar ve diğer parçacıklar ölçülebilir açısal momentuma sahiptir.

Niels Bohr 1913'deki hidrojen atomuyla ilgili kilometre taşı sayılan teorisinde açısal momentum katsayısı ile ilgili bir



Şekil 2.
Dönme ve Yörüngesel Hareket

* Dönme konusu bir üniversitede fizik dersi alan öğrencilerimi ümitsizliğe sürüklediğinde, onları üzerinde "Panta kuklei": "Her şey döner" vecizesiyle süslenmiş kâğıtları dağıtarak toparladım.

kural ortaya atmıştır. Planck sabiti *2n'ye* bölündüğünde (bu niceliğe günümüzde *h-bar* diyoruz ve *h* şeklinde gösteriyoruz) yörüngesel açılı momentumun temel katsayı birimi bulunur, bu da bir elektronun (daha genişletilmiş anlamıyla herhangi bir başka parçacığın) sahip olabileceği yörüngesel açılı momentumun değerlerinin sadece sıfır, *h, 2h, M* gibi değerlerde olduğu ama asla bu değerler arasında olmadığı anlamına gelir. Atomsal veriler bu kuralı desteklemiştir; ta ki Hollandalı iki fizikçi Sam Goudsmit ve George Uhlenbeck 1925'de elektronun yörüngesel açılı momentumun yanısıra, daha önce bölünemez olduğu düşünülen birimin sadece yarısı kadar büyük olan (1-^2/5) büyüklüğündeki dönme açılı momentumu olduğunu bulana kadar. Artık biliyoruz ki, aslında dönüş ya elektronlarda ve kuarklarda olduğu gibi yarı-tektamsayı ya da fotonlarda olduğu gibi tamsayı ile ifade edilebilir.

Belirli bir parçacık, bu parçacığın benzersiz bir özelliği olan tek sadece tek dönüşe sahiptir. Ya da değil midir? Farklı yönde dönen iki parçacık *aynı* parçacığın iki farklı şekli olabilir mi acaba? Evet, ama dönüşü değiştirmek çok keskin bir değişim olduğundan, artık bu parçacık farklı bir parçacıktır. Bu sanki, tahta bir sapa bir balta başı ya da tırmık başı takmanız gibi bir şeydir. Peki bu balta ve tırmık aynı aletin iki farklı görünüşü mü yoksa bunlar iki farklı alet mi? Eğer bir parçacık fizikçisi gibi düşünürseniz, bunların farklı aletler oldu-



Bu aracın sürücüsü Max Planck'i hürmetle anıyor olmalı.

ğunu söylersiniz.

Gelelim değerlere; *ft,* 1,05 x 10^{-34} kg XmXm/s'ye eşittir. On sayısının üssü olan eksi otuz dört bu dönme biriminin günlük hayatta karşılaşılan açısal momentumlara oranla son derece küçük olduğunu gösterir. O zaman biz bu kadar küçük bir miktarı bir tek elektronun dönme birimi olarak nasıl ölçeriz? Bunun zor olmadığını gösteren bazı nedenler var. Bunlardan biri bütün elektronların aynı şekilde dönmesidir, böylece pek çok sayıda elektronun dönüşünün toplam etkisini ölçmek mümkündür. Başka bir neden ise dönüşün *yönelme* katsayısı olmasıdır. Bu şu anlama gelir: dönen bir parçacığın ekseninin yönü sadece bir kaç tane olabilir, her yöne doğru eksen rotası olamaz. Yarım birimli dönen elektronda ise izin verilen, "yukarı" ve "aşağı dediğimiz, sadece iki yön vardır. Manyetik bir alanda oturan bir atomda bu iki yön birbirinden çok az farklı enerjilere sahiptir, bunun sonucunda oluşan birbirinden çok az farklı frekansa sahip fotonlar, bir "yukarı" ve bir "aşağı elektron tarafından yayılır. Frekans (ya da dalga boyu), bir elektronun dönüşüne "fiske vuracak" kadar kolayca enerji açığa çıkararak bir sürede, çok doğru bir şekilde ölçülebilir.

Açısal momentumun niceliği prensipte geniş ölçekli dünyada da vardır. Ama bir tenis fanatiğinin "dönüş"ünü 10" kuvantum biriminden 10" + 1 kuvantum birimine çıkardığını hayal edin. Kesirsel değişim fark edilemeyecek kadar küçüktür. Bu tıpkı Amerika Birleşik Devletleri'nin gayri safi milli hasılasını bir peninin bir milyarda bir milyarı kadarına dönüştürmeye, ya da dünyada yaşayan bütün maddelerin kütlelerini tek bir bakterinin kütlesinden daha azına dönüştürmeye benzer.

Ölçü Birimleri

Normalde kullandığımız ölçü birimleri, bilimsel çalışmalarda kullanılanlar bile, rastgele tanımlanmıştır ve fiziksel dünyayı yöneten temel kanunlarla hiçbir ilgisi yoktur. Ancak kuvantum teorisi ve görelilik, doğanın kanunlarıyla daha

uyumlu iki "doğal" birimle açıklanmıştır. Hâlâ cevaplanmamış bir soru ise üçüncü bir doğal birimin keşfedilmeyi bekliyor olup olmadığı sorusudur.

Metre özgün tanımına göre, Dünya'nm kutuptan ekvatora kadar olan mesafesinin on binde biridir. Kilogram 0,001 metre küp (1 litre) suyun kütlesidir. Görüldüğü gibi, hem metre hem de kilogram tanımlarında Dünya'run büyüklüğü dikkate alınır ve Dünya'nın büyüklüğü ile ilgili söylenecek çok özel bir şey yoktur. İkincisi; üçüncü temel birim Dünya'nın bir özelliğine bağlıdır: yine onun da dönüş oranıyla ilgili söylenecek pek bir şey yoktur. Daha iyi bir gerekçe olmadığı için, Mısırlılar gece ve gündüzü on ikişer parçaya bölmüş, Sümerler altmışlı sayma sistemini tercih etmiş, saat günün yirmi dörtte biri, dakika saatin altmışta biri ve saniye de dakikanın altmışta biri olmuştur.*

Yüzyıldan daha fazla bir süreden günümüze kadar gelen iki doğal birim *Planck sabiti h* ve ışık hızı c'dır. Max Planck 1900'de sabitini tanıtırken, bu yeni birim tamamıyla yeni bir fikirden ortaya çıkmıştı. Bu birim, atomun içindeki dünyadaki ölçüleri kuran kuvantum teorisinin asal sabit birimiydi.. Eğer *h* (kuramsal olarak) daha küçük olsaydı, atomlar da daha küçük olurdu ve kuvantum teorisinin tuhaflıkları günlük hayatta yaşananlardan iyice farklılaşırdı. Eğer *h* sihirle büyütülebilseydi, doğa da daha "şişerdi" ve kuvantum fenomenleri daha anlaşılır bir hal alırdı, (bu söylenenleri ciddiye almayın. Eğer *h* daha büyük veya daha küçük olsaydı, bilim insanlarının üzerinde çalıştığı doğa dahil her şey farklı olurdu.)

Albert Einstein 1905'de ışık hızını görelilik kuramının temel taşı yaptığında, ışık hızı ne yeni bir sayıydı ne de yeni bir fikirdi. Ancak uzantıları tamamıyla yeniydi, bunlar: doğanın hız sınırı; ve uzay ve zaman ile kütle ve enerjiyi birbirlerine bağlamasıydı. Bu nedenle *c* görelilik kuramının temel sabitiyken, *h* de kuvantum teorisinin temel sabitiydi.

Ne *h,* ne de *c* tek başlarına bir kütle, uzunluk ya da zaman-

* Günümüzde metre ve saniye atomsal standartlara göre tanımlanmaktadır, ama bu standartlar özgün Dünya temelli tanımlara uyacak şekilde seçilmiştir.

dır, her ikisi de bu üçünün basit birer kombinasyonudur. Eğer bunlar üçüncü bir doğal birimle birleştirilseydi, kilogram, metre ve saniye kadar doğru ve hatta bunlardan daha fazla tatmin edici bir ölçü sistemi oluşabilirdi, (dikkatli bir okuyucu yük birimi olan e'yi üçüncü doğal birim olmaya aday gösterebilir. Ne yazık ki bu işe yaramaz. Çünkü bu birim *h* ya da c'den bağımsız değildir, tıpkı hızın zaman ve mesafeden bağımsız olmadığı gibi.)

Hangi birim sistemine ait olursa olsun, her ölçü, bir oranın en iyi ifade şeklidir. Eğer kilonuzun 151 pound (68,5 kg) olduğunu söylüyorsanız, bu, aslında ağırlığınızın standart nesneden (bir pint = 0,473 litre sudan) 151 kat (32,4 kat) fazla olduğunu söylüyorsunuz demektir. Elli dakikalık bir ders rastgele belirlenmiş zaman birimi olan bir dakikadan elli kat uzundur. Doğal birimlerde oranı, rastgele belirlenmiş olanlar yerine fiziksel olarak anlamı olan birimlere göre düzenleriz. Doğal ölçü tablosuna göre, hızı 10V olan bir jet uçağı oldukça yavaş, 0,99c olan bir parçacık ise oldukça hızlıdır. 10,000 #lik bir açısal momentum büyük, (l-f2)^'hk bir açısal momentum ise küçüktür.

Bir bakıma "doğal" birimler olan *h* ve *c* de rastgele belirlenmiştir ama bilim insanları bunların doğal dünyanın temel özelliklerine doğrudan bağlı oldukları konusunda aynı görüşte olabilir. "Tümüyle doğal" fiziğe gelindiğinde; henüz ortaya çıkmamış bir tane daha doğal birime ihtiyacımız var. Böyle bir birim bulunursa, atomun içindeki dünyadaki uzay ve zaman hakkında tamamıyla yeni bir görüşe öncülük edebilir, ya da, daha büyük bir olasılıkla, bugüne kadar keşfedilen gerçekler katmanlarından çok ötesine, yani atomun içindekinin *içindeki* dünyaya rehberlik edebilir.

3. bölüm

Lepton Ailesiyle Tanışın

İçinde üç ailenin olduğu bir peri masalı hayal edin. Birinci aile bir vadide yaşıyor ve vanilyalı dondurma seviyor: îkinci aile yakındaki bir dağdan biraz uzakta bir tepede yaşıyor ve çikolatalı dondurma seviyor. Üçüncü aile bir dağın zirvesinde yaşıyor ve çilekli dondurma seviyor. Bu farklı aileler, antropologların anlayamadığı bir şekilde, birbirleri arasında kız alıp vermiyor ve pek iletişim kurmuyor olmalarına rağmen, bu üç ailenin fertleri ortak bazı özelliklere sahip ve birbirlerine bağlı gözüküyorlar. Ancak, yüksek sınıftan bir fert öldüğünde, bu fert sihirle alt sınıftaki ailelerin üç ferdine dönüşüyor. Vadi ailesinde asla doğal ölüm olmuyor ama bu ailenin fertleri başka yerlerden gelen işgalciler tarafından yok ediliyor. Daha iyi bir isim bulamadıklarından antropologlar bu üç aileye. Çeşni 1, Çeşni 2 ve Çeşni 3 diyor. Yukarıdaki olay lepton adındaki parçacıkları çok iyi tanımlıyor. Elektron ve onun nötrinosu vadi ailesini, muon ve onun nötrinosu tepe ailesini, tau leptonu ve onun nötrinosu ise dağın zirvesindeki aileyi oluşturuyor. Bu ailelerin birbirleriyle nasıl ilişkileri olduğu hakkında pek net bilgisi olmayan fizikçiler, bunları Çeşni 1, Çeşni 2 ve Çeşni 3 diye adlandırıyor. (Bu terimlerin lezzet konusuyla ilgili olduğunu düşünen olabilir.)

Böylece her üçünden ikisinde çeşni olan, altı tane lepton vardır. "Lepton" sözcüğü Yunanca "küçük" ya da "ışık" anlamlarına geler elektron ve nötrinolan tanımlamak için son derece uygun bir terimdir.

Ancak keşifler bu terminolojiyi değiştirmiştir, Tablo B.1'de (Ek B) görüldüğü gibi, tau leptonu ışıktan başka bir

şey değildir. Bu, sanki antropologlann, bu dondurma-sever ailelerin bazılarının dağın zirvesinde yaşadıklarını keşfetmeden önce onlara "ova kabileleri" demesine benziyor.

Tablo B.l leptonların bazı özelliklerini gösteriyor. Leptonların hepsi yarım birimlik bir dönüşe sahiptir ya nötrdürler (yüksüz) ya da bir birimlik negatif yük taşırlar. Her bir leptona karşılık, onunla aynı kütleye ama zıt yüke (sıfırın tersi yine sıfır) sahip bir karşıt lepton vardır. Leptonlardan bazıları sabit değildir. (Sabit olmama radyoaktivite ile ayrı şeydir. Şu anlama gelir: Uzunluğu tam olarak tahmin edilemeyen kısa bir süre yaşadıktan sonra parçacık, ani bir dönüşümle ya da bozunmayla başka parçacıklar haline gelir.)

Tabloda gösterilmeyen şey, leptonların zayıf bir etkileşimi olduğudur. Bu onları kuvvetli bir etkileşimi olan kuarklardan (gelecek bölümde tanıyacaksınız) ayırır. Leptonların da kuarklar gibi bilinen bileşikleri yoktur (bu yüzden onlar da temel parçacıktır) ve bilinen bir ölçüleri de yoktur. Bugüne kadar yapılan tüm deneylerde (ve onları tanımlayan başarılı teorilerde) leptonlar nokta parçacıklar gibi davranmıştır.

Elektron

Tablo Bl 'deki ilk sözcük olan elektron, sadece en iyi bilinen lepton değil aynı zamanda şimdiye kadar keşfedilen ilk temel parçacık olma özelliğine de sahiptir.

İngiltere'deki Cambridge Üniversitesinde fizik profesörü olan J. J. Thomson, 1897'de katot ışınları hakkında daha çok şey öğrenmek istedi. Bu dönemlerde o ve diğer bilim insanları, içinde iki metal plaka bulunan ve hemen hemen hiç hava almayan bir cam fanusta, bu plakalardan biri pozitif diğeri negatif yüklenip aralarında yüksek voltaj sağlanırsa, negatif plakadan pozitif plakaya bir tür "ışın" akışı olacağını biliyorlardı. Negatif plakaya katot (pozitife de anot) dendiği için, bu çok gizemli ışınlara "katot ışınları" dendi. (İsimler kolay değişmez. Televizyon ve bazı bilgisayarlardaki görüntü me-



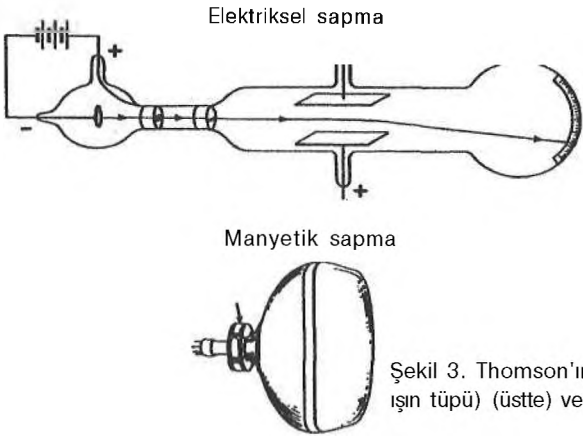
JJ. Thomson (1856-1940), Argonne Ulusal Laboratuarı ve AIP Emilio Segre Görsel Arşivi

kanizmasına hâlâ katot ışın tüpü ya da CRT diyoruz.)

Thomson ve aynı dönemdeki bilim insanları katot ışınlarının, normalde düz bir yol izlediği halde, manyetik alanlar tarafından yollarının değiştirilebildiğini biliyorlardı.*

Bu sapmaları ölçen Thomson "ışınlar"ın negatif yüklü parçacıklardan oluştuğu sonucuna vardı. Dahası, hem manyetik hem de elektriksel sapmayı kullanarak kütlenin bu parçacıkların yüküne olan oranını *(m+e)* ölçebildi. Bu oranın, hidrojen iyonunun (bunun sadece bir protein olduğunu biliyoruz) kütleden yüke olan oranından en az bin kat küçük olduğunu buldu ve şöyle dedi: "m-fe'nin küçüklüğü; m'nin küçüklüğü veya e'nin büyüklüğü ya da bu ikisinin kombinasyonu nedeniyle olabilir." Katot ışın parçacıklarının hafifletilmiş gazdan kolayca geçebilme becerisine dayanarak sözlerini, doğru bir şekilde, şöyle bitirmiştir: Parçacıklar büyük elekt-

* Günümüzde bilgisayar monitörleri ve televizyon tüplerindeki [eğer bunlar CRT (katot ışın tüpü) ise], manyetik sapma elektronları ekranın çok çeşitli noktalarına gönderir.Bir laboratuar aleti olan osilografta ise elektriksel sapma elektronları yönlendir.



Şekil 3. Thomson'ın CRT'si (katot ışın tüpü) (üstte) ve modern CRT.

rik yükü taşıyamaz, bu yüzden kütleleri atomlarla kıyaslandığında daha küçük olmalıdır. Onun bu ölçümleri ve çıkarımları elektronun keşfi dediğimiz olayı meydana getirdi.

Thomson, "katot ışınları maddesinde yeni bir durum söz konusu, bu maddenin alt katmanlarının sıradan bir gaz halindekinden daha ileri taşınması durumudur", diye yazdığında aslında işe parçacık fiziği -ya da atom içi fiziğinden- başlamıştı. Bilim insanları negatif yüklü bu yeni ışık dalgasının atomların bir bileşeni olması gerektiğini derhal anladılar. Kolayca iyonize olabildiği (yüklendiği) ve elektromanyetik sürecin sonucu olarak ışık yaydığı için, atomların doğada elektrikli olması gerektiğini zaten biliyorlardı. Bu yüzden, elektron bir kez belirlendi mi bu teşhis kesinlikle doğrudur. Daha sonra atom için bir yapı "uydurma"nın heyecanlı süreci başladı. Niels BbhVun 1913'teki hidrojen atomu üzerindeki teorik çalışması bu yönde atılmış en büyük adımdı, bunu 1920'lerdeki tam kuvantum teorisi ve bu teorideki atom yapısının tamamıyla açıklanması izledi.

Thomson'ın çalışmasından çok kısa bir süre önce, yani 1896'da, Fransa'da, Henri Becquerel radyoaktiviteyi, belirli ağır elementler tarafından kendiliğinden yayılan "radyasyon'^ keşfetmişti. Dünyanın farklı bölgelerindeki bilim insanları radyoaktif atomların ne yaydığım bulmak için derhal

çalışmaya başladılar. Bu çalışmaların öncüleri arasında Fransa'dan Marie ve Pierre Cruie ve önce Kanada sonra İngiliz vatandaşı Ernest Rutherford vardı. Bu ilk çalışmaları yapanlar radyoaktif atomların üç tür radyasyon yaydığını öğrendiler. Bu radyasyonların tam olarak ne olduğunu araştırırken, Yunan alfabesinin ilk üç harfi olan alfa, beta ve gamma'yı ışınları adlandırmada kullandılar Bir kaç yıl içerisinde (1903'de), alfa ışınları, iki kat yüklü helyum atomları (yada bugün bildiğimiz adıyla helyum çekirdekleri), beta ışınları ise elektronlar diye tanımlanmıştı.

Bu nedenle katot ışınları, beta ışınları ve elektronlar tamamıyla aynı şeydir.*

Elektron konusunu bitirmeden, önce onun karşıt parçacığı olan pozitrondan bahsetmek istiyorum. 1928'de, akıllı olduğu kadar suskunf olan İngiliz fizikçi Paul Dirac, elektronu tanımlamak için büyük bir çabayla görelilik ve kuvantum mekaniğinin kurallarını bir araya getirerek (bugün Dirac denklemi dediğimiztt) bir denklem oluşturdu. Dünyadaki diğer meslektaşlarının şaşkınlığı bir yana, bu denklemde Dirac 'ı da şaşırtan iki şey vardı. Birincisi, bu denklem elektronun bir yarım dönüşü olması gerektiğini "söylüyordu". Tabii ki elektronun bir yarım dönüşü olduğu zaten *biliniyordu,* ama kimse bunun niçin olduğunu ve hatta elektronun bu özelliğinin ortaya bir matematik teorisinden çıkacağını bilmiyordu.

İkincisi, Dirac'ın denklemi, karşıt maddenin varlığım ortaya koydu. Bu denklem şöyle söylüyordu: Elektronla aynı kütle ve dönüşe sahip ama zıt elektrikle yüklü bir karşıt elektron parçacığı, bu elektrona eşlik etmelidir. Dirac'm teorisine

* On iki yıl kadar gamma ışınlan elektromanyetik radyasyon diye tanımlandı. En son olarak da foton dendi.

t "Dirac çok nadir konuşur" diyen Niels Bohr'a cevap olarak Ernest Rutherford şu hikayeyi anlattı: Evcil hayvan dükkanına müşteri, hayal kırıklığı içinde, konuşmayan bir papağanı iade eder "Üzgünüm", der dükkanım sahibi, "Siz konuşan bir papağan istemiştiniz. Bu ise size düşünen bir papağan vermişim."

tt Başarılı bir yaratıcılığa sahip bir matematik denklemi nasıldır? İşte cevabı: Serbest bir elektron denklemli,

(ifid/dt - iHca'V + Çime') y/=0



Paul Dirac (1902-19849. 1930, © Cavandish, Laboratuvarı Cambridge, İngiltere

göre, bir pozitron ile bir elektron karşılaştığında bir mini patlama olacaktı. Pof! Artık ne elektron, ne pozitron vardı -bu çarpışmada sadece bir çift foton yaratıldı. Bu söylem, o zamanlar fizikçiler için kolay kabul edilebilir bir şey değildi, çünkü o güne kadar ne böylesine ışık dalgası olan pozitif bir parçacık gözlemlenmişti, ne de bir "yok etme" olayı görülmüştü. Dirac'ın kendisi bile denklemine olan inancını kaybetmişti. Protonun bir şekilde elektronun karşıt parçacığı olabileceğini düşünmeye başlamış ancak hemen sonra bunun neredeyse imkânsız olduğunun farkına varmıştı. Üstelik, kütlesi eşininkinden farklı olan bir karşıt parçacık fikri hiç de "zarif değildi.

Dirac, kendinden önceki Einstein gibi, basitlik, genellik ve "güzellik" gibi testlerden başarıyla geçen denklemlere inanıyordu. Acaba bu, inanç temelli fizik miydi? Evet, bir bakıma öyle, ancak bu inanç eski bilgilerin bir kayanın üzeride sağlam bir şekilde oturmasına olan inançtır -Kepler, Galileo ve Nevvton'a kadar geriye giderek fizikte başarılı bir şekilde edi-



Cari Anderson (1905-1991). Foto: AIP (Emilio Segre Görsel Arşivi, W. F. Meggers Nobel Ödülü Alanlar Galerisi

nilen büyük ilerlemelere olan inançtır. Dirac aslında teorisinin yanlış olamayacak kadar mükemmel olduğunu iddia etmiş, günümüze kadar da yapılan deneylerde bunun doğru olduğu kanıtlanmıştır. İşte tam burada bir şey oldu. Caltech'te çalışan Cari Anderson, 1932'de bir bulut çemberinde kozmik ışınlar yayan, günümüzde yaygın olarak pozitron denen, bir karşıt elektrona yol gösteren bir işaret buldu.* Bundan çok önce, Fransa'dan Frederic ve irene Joliot-Curie tarafından bu olay onaylanmıştı.

Bunlar yeni radyoaktif elementler yarattılar, bu elementlerin bir kısmı elektron yerine pozitron ışınları ile bozundular. Dirac, Anderson ve Joliot-Curie'ler 1930'larda Nobel Ödülü aldı. (Frederic Irene'le 1925'te tanıştığında, annesi de Nobel ödüllü olan Marie Curie'nin yanında asistan olarak çalışıyor-

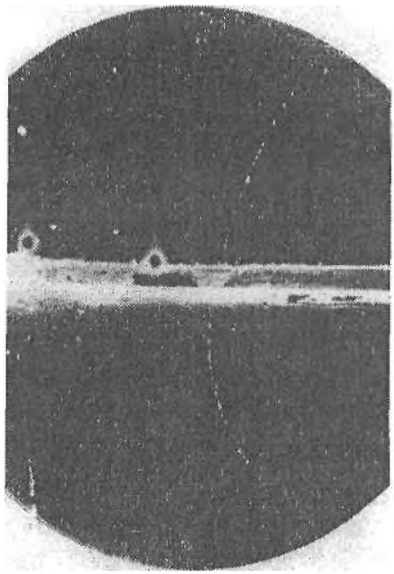
* Cari Anderson bir keresinde bana bir partide "Ünlü bir fizikçinin yaşını bulmak istersen en önemli çalışmasını yirmi altı yaşında yaptığını varsaymaksın", demişti. Partiden sonra bir referans kitabında Anderson'un ismini aradım ve tabii ki pozitronu keşfettiğinde yirmi altı yaşında olduğunu gördüm. (1932 Eylül'de yirmi yedi oldu.) Einstein'de bu kurula uyuyor, Bohr ise yakın.

du. Frederic ve irene 1926'da evlendiklerinde tireyle birleştirilmiş soyadı (Joliot-Curie) kullanmaya başladılar.)

Artık biliyoruz ki her parçacığın bir karşıt parçacığı var. Az sayıda nötr parçacıkta, parçacık ve karşıt parçacık aynı. Örneğin foton, kendisinin karşıt parçacığı. Ancak parçacıkların çoğuna, farklı bir karşıt parçacık eşlik etmekte. Tablo B.l'deki leptonların altısının da farklı karşıt parçacıkları var.

Elektron Nötrinoları

Size elektronun nötrinolarını tanıtmadan önce kısaca alfa, beta ve gamma radyoaktivitesinden bahsetmek istiyorum.



Anderson'ın pozitronu gösteren bulut çemberinin yolu. Anderson parçacığın aşağı doğru uçtuğunu söylemişti. Çünkü metal levha, parçacığın hız kaybetmisene neden olur ve levhanın altında, yolu üzerindeki daha büyük kavis orada daha yavaş hareket ettiğini gösterir. Bu yüzden parçacık, negatif yüklü bir parçacığın izleyeceği sağa doğru kıvrımın aksine sola doğru kıvrılır.
Foto: Cari Anderson; AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

Radyoaktivite

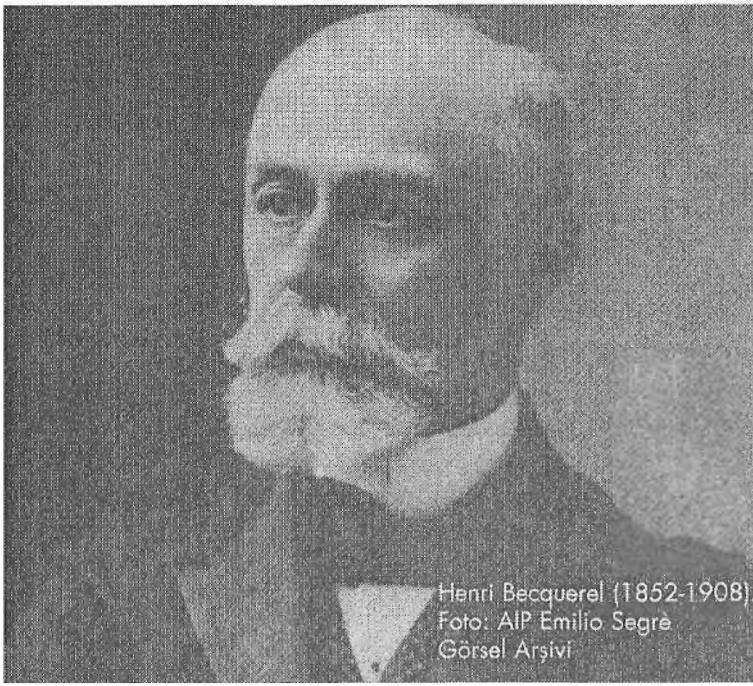
Becquerel ve onu izleyen bilim insanları, on dokuzuncu yüzyılın son yıllarında belirli elementlerin kendiliğinden *aktif* olarak *radyasyon* yaydığını keşfettiler, böylece bu olaya "radyoaktivite" dendi. Yaklaşık on yıllık bir süre içerisinde, radyasyonun kademeli olarak sızmadığını, ani "patlamalar"la yayıldığını ve her radyoaktivite olayında açığa çıkan enerjinin kimyasal reaksiyona giren bir atom tanesinden çıkandan çok daha büyük (yaklaşık bir milyon kat büyük) olduğunu öğrendiler.

Çekirdeğin ani radyoaktif dönüşümü* *bozunum* olayı diye adlandırıldı (çürüyen bir kütük ya da yaşlanan bir fizikçi ile ortak hemen hemen hiçbir özelliği olmamasına rağmen). Bir çekirdek bozunuma uğradığında, bunu kesin bir zaman çizelgesine göre değil, zamanının tahmin edilme olasılığı çok zayıf olan beklenmedik bir anda yapar. Belirli bir çekirdeğin belirli bir zaman diliminde bozunuma uğrama ihtimali yüzde ellidir, buna çekirdeğin *yarı ömrü deniri* Alfa ya da beta bozunumu onu farklı bir çekirdeğe, farklı bir elemente dönüştürür. Yeni çekirdek radyoaktif olabilir ya da olmayabilir; eğer radyoaktifse farklı bir yarı ömrü olur. Daha önce bahsedildiği gibi, çekirdekten dışarı çıkan şey normalde "radyasyon" değil bir "mermi" dir yani alfa, beta ya da gamma parçacığı.

Bir çekirdeğin bir alfa parçacığı yayabilmesi çok gizemli bir şey değildir. Zaten alfa parçacığının kendisi küçük bir çekirdektir, bu nedenle küçük kütleli bir çekirdeksel modelinin

* Radyoaktivitenin keşfini izleyen yıllarda, atomun iç yapısı gizemli kaldı, bu yüzden Becquerel ve meslektaşları atomun içindeki radyoaktivitenin kaynağının yerini belirleyemediler. İngiltere Manchester'daki Ernest Rutherfbrd ve meslektaşları yaptıkları deneyler sonucunda atomun kütlesinin büyük bir bölümünün merkezdeki küçük bir çekirdekte olduğunu gördükleri 1911 yılında çekirdeğin, radyoaktivitenin merkezi olduğu ortaya çıktı.

t Radyoaktif çekirdeklerin ömür süresi saniyenin binde biri ile milyarlarca yıl arasında değişir. Ömrün başka bir ölçü birimi aritmetik ortalama, ya da ortalama ömürdür. Bir parçacık çekirdeğinin yarı ömrü ortalama ömrünün yüzde 69'u kadardır.



Henri Becquerel (1852-1908).
Foto: AIP Emilio Segrè
Görsel Arşivi

büyük kütleli olandan kopmasını göz önünde canlandırmak yeterlidir. Ancak yine de bir sorun var. Alfa parçacığı niçin ebeveyninden ayrılmak için bu kadar uzun -bazen milyonlarca hatta milyarlarca yıl- bekliyor? 1928'de George Gamow (Rus göçmeni, sonra Kopenhag'da yaşadı) ile İngiliz fizikçi Ronald Gurney, Amerikalı fizikçi Edward Condounn'la çalışarak bu problemi birbirlerinden habersiz çözdüler. Alfa bozunumun tembelliğini açıklamak için, henüz geliştirilmekte olan yeni kuvantum mekaniğinin araçlarını kullanmak zorundaydılar. Klasik teoriye göre alfa parçacığının ebeveyn çekirdekten kaçamadığını belirlediler. Alfa parçacığı çekirdeksel güçler tarafından çok sıkı tutuluyordu. Ama kuvantum teorisine göre "tünel kazanarak" özgürlüğüne kavuşabilirdi. kuvantumun tuhaflığı sahneye çıkmıştı ve artık, burada kalıcıydı. Küçük bir olasılıkla alfa parçacığı "delinmez" bir bariyerden fırlayarak uçup gidebilir ve geride daha az yükü ve kütlesi olan bir çekirdek bırakır.

Gamma bozunumu kesinlikle gizemli bir şey değildir, fizikçiler bunun yüksek frekanslı elektromanyetik radyasyon yayılması ile gerçekleştiğini fark ettiler. Tıpkı atomun içindeki elektrik yüklü elektronların bir kuvantum devinim durumundan diğerine atlarken olduğu gibi, çekirdekte bulunan elektrik yüklü protonlar da aynı şeyi yapabiliyor olmalıydı. Çünkü protonlar daha yüksek frekansla hareket ederler ve elektronlardakinden daha yüksek enerjili kuvantum sıçramaları yaparlar, yayıldıkları "ışık" ise atomsal elektronların yaydığından çok daha yüksek frekanslıdır. Bu ışığa biz *gamma radyasyonu* deriz. Modern terminolojide, bir çekirdek kuvantum sıçramasıyla yaratılan (yayılan) fotonlar, bir atomsal kuvantum atlamasında yaratılan ve yayılan fotonlardan daha fazla enerji ve frekansa sahiptir. 1905'de Albert Einstein, beş yıl önce Max Planck tarafından geliştirilen bir formülü yorumlamıştı, formül $F = hfdir$. Anlamı ise bir foton tarafından yaratılan enerji E ve fotonun elektromanyetik titreşiminin frekansı/doğru orantılıdır; h ise Planck'in sabit sayısıdır. Bu nedenle eğer bir foton, diğerinin iki katı enerjiye sahipse, aynı zamanda onun iki katı frekansa sahip demektir. Eğer bir çekirdeksel gamma-ışınlı foton görülebilen ışıklı bir fotonun enerjisinden bin kat fazla enerjiye sahipse, bin kat fazla frekansa da sahip demektir, /z'nin değeri standartlara göre çok küçük olduğundan tek başına bir fotonun enerjisi de E küçüktür. Ama sıfır değildir! *hfdp* görüldüğü gibi, belirli bir frekans yayılımmdaki enerji miktarının tek bir fotonun enerjisinden daha az olmasından daha küçük bir nicelik yoktur.

Böylece 1920'lerde bilim insanları gamma bozunmasına şaşırmadılar, sadece alfa bozunumuna biraz şaşırdılar (daha önce belirtildiği gibi alfa bozunumu bilmecesi Gamow, Condon ve Gurrey tarafından çözüldü). Ancak beta bozunumuna hayret ettiler. Çekirdekten fırlatılan elektronlar en az üç nedenle hoş karşılanmadı.

Birincisi, kimse elektronların çekirdek içinde yayılmadan önce nasıl tutulabildiğini anlayamadı, kuvantum mekaniği teorisi der ki, bir elektron çekirdek içinde hapsedilemez. Çekir-

dek içinde tutulan bir elektronun oldukça iyi tanımlanmış bir pozisyonu olması gerekirdi. Ancak pozisyonunun küçük olacağı konusundaki belirsizlik, momentumunun da büyük olacağı konusunda belirsizlik demekti. (Werner Heisenbeg'in belirsizlik prensibi böyle diyor). Bu, onun çekirdekten uçup gidecek kadar çok kinetik enerjisi olacağı anlamına geliyor.

Bu, tıpkı bir balonu ellerinizle sıkmanız gibi bir şey. Balonu ne kadar çok sıkarsanız, bazı kısımları parmaklarınızın arasında yükselerek sizin onu küçültme çabanıza karşı gelir.

İkincisi, ölçümler, belirli bir tür radyoaktivitesi olan çekirdekten fırlatılan ve elektronlar tarafından götürülen enerjinin daima aynı olduğunu, yani ortalama olarak bozunum sürecindeki çekirdeğin kaybettiği enerjiden daha az olduğunu göstermiştir. Ya enerji görünmez olup fark ettirmeden kaçıyor, ya da değerli enerji korunum kanunu gerçekten de değerli değil.

Üçüncü neden ise, çekirdeklerin beta bozunumu öncesi ve sonrasındaki dönüşleri. Çekirdeğin dönüşünü ölçen bir bilim insanı, onun içindeki bir-yarım-dönüşlü parçacıkların tek sayılı mı yoksa çift sayılı mı olduğunu söyleyebilir. Diyelim ki *tek sayılı* bir-yarım-dönüşlü parçacıklar içeren bir çekirdek bir elektron fırlattı. (Bu elektronun dönüşü bir buçuktur.) Geride kalan ve daha küçük bir elektron içeren çocuk çekirdek *çift sayılı* bir-yarım-dönüşlü parçacıklar içermelidir ya da bunun böyle olduğuna inanılırdı. Ancak çekirdekler bu beklentiye karşı geldi. Deneyler gösterdi ki; eğer ebeveyn çekirdekte tek sayılı bir-yarım-dönüşlü parçacıklar varsa, çocuk çekirdekte de bunlar olur ve eğer bu sayı ebeveyn çekirdek için çiftse, çocuk çekirdek için de çifttir. İşte bir zorluk daha.

Beta Bozunumu ve Elektron Nötrinoları

Beta bozunumu konusunu açığa çıkarmak iki hamleyle mümkün oldu. Birincisi, İsviçreli "Wolfgang Pauli tarafından ortaya atılan, elektron fırlatılırken onunla birlikte giden, elektron gibi bir-yarım-dönüşlü ve küçük kütleli ama elektrik



Wolfgang Pauli (1900-1958). 1931 yazında Carlin, Nevada'da bir tren istasyonundan Caltech'e giderken. Foto: AIP Emilio Segrè Görsel Arşivi, Goudsmit Koleksiyonu.

yükü açısından nötr olan ve görünmeyen bir başka parçacığın olduğu görüşüdür. 1930'un Aralık ayında bir grup fizikçinin katıldığı, (ama onun Zürih'te bir baloya katılmayı tercih ettiği) Almanya, Tübingen'deki bir toplantıda, Pauli bu fizikçilere şöyle yazmıştı: "Sayın Radyoaktif Bayanlar ve Radyoaktif Baylar". Yeni nötr parçacık fikrini "beta bozunumunun sorunlarından kaçınmak için çaresizlikten üretilmiş bir fikir" olarak nitelemişti. "Şu anda bu fikirle ilgili herhangi bir yazı yayınlamaya cesaret edemiyorum" diye eklemişti; "bu nedenle şu soruyu ilk olarak siz güvendiğim radyoaktif arkadaşlarıma soruyorum: Böyle bir nötron deneysel olarak nasıl tanımlanabilir?"*

Pauli 'nin "nötron"u, hiç kimsenin onun inceleme yollarını veya özelliklerini ölçmeyi düşünmediğinden, ortalığı karıştırdı. Nötron, üç beta bozunumu probleminden ikisini

*Pauli'nin mektubundan alman bu bölümler, Almanca aslından çevrilmiştir.



Enrico Fermi (1901-1954), 1928. Foto: G.C. Trabacchi, Emesl Orlando Lawrence Berkeley Laboratuarı; AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

(enerjinin korunması ve çekirdeksel dönme) "çözdü", ama bunu tamamıyla kuramsal olduğu görülen bir varlıkla yaptı.

Pauli'nin önermesinden iki yıldan daha az bir süre geçmişti ki "gerçek" nötron keşfedildi (tıpkı çekirdeklerde bulunanlar gibi ve yaklaşık olarak proton kadar büyük bir nötr parçacık).

Bu keşfin ardından, daha sonra ilk nükleer reaktörün (Chicago'da)* kurucusu olarak çok büyük bir üne kavuşacak olan şaşırtıcı derecede akıllı ve enerjik bir İtalyan fizikçisi olan Enrico Fermi, Pauli'nin nötrino ya da "küçük nötron" parçacığını yeniden kullandı. İsim aynı kaldı ancak ona bir tamla-

* Fermi büyük bir öğretmen ve disiplinli bir adam olarak tanımyordr. Her gün aynı saatte kalkar, aynı yiyeceklerden oluşan kahvaltısını yapar ve aynı haber programını dinlerdi. 1951'de Jemez Dağlarına onunla birlikte gidip, Parcheesi oynadığımda (Amerika'da oynanan kızmabirader gibi bir oyun) öğrendim ki, o anda ne yapıyor olursa olsun bunu sadece basan odaklı yapan bir adamdı. Fermi'yi sevmemek imkansızdı. Öğrencileri tarafından sayılırdı.

ma eklememiz gerekti, Tablo B. 1'de görüldüğü gibi nötrinoların üç "çeşni"sini biliyoruz. Pauli ve Fermi'nin ilk nötrinosu elektron nötrinosudur.

Beta bozunumunu anlamak için ikinci hamleyi 1934'de yapan kişi Fermi oldu. Radyoaktif bir çekirdeğin radyoaktif bozunum sırasında elektronla aynı anda bir nötrino (aslında bir karşıt nötrino) *yarattığını* ve bunların ikisinin de derhal çekirdekten çıktığını ileri süren bir teori geliştirdi. Pauli'nin kurgusunun tersine, Fermi'nin bu teorisi, beta bozunumunu anlamak için azap veren *bütün* problemleri çözdüğünden derhal kabul edildi. Bu teori, örneğin beta bozunumunda görülen elektron enerjilerinin yayılması bulgusunu doğru bir şekilde açıkladı. Ve, en önemlisi, kuvantum fiziğinin tam merkezine o günden beri hiç değişmeyen bir görüşü doğru bir şekilde yerleştirdi: *Küçük ölçekli dünyada etkileşimler parçacıkların yaratılışı ve yok oluşuyla olmaktadır.* Bunun elektromanyetik etkileşimlerde fotonların yaratılışı ve yok oluşu (yayılması ve yutulması) aracılığıyla olduğu zaten biliniyordu. Bilim insanları bir parçacık ve karşıt parçacık çiftinin birlikte yok olabildiğini de biliyordu. Ancak Fermi bu yaratıcı buluşunu, beta radyoaktivitesini, parçacıkların yaratılış ve yok oluşunu açıklamak için yapmasına rağmen bu açıklama *bütün* etkileşimleri açıklayacak zemini oluşturdu.

Bu olaydan sonra, çoğu fizikçi 1956 yılına kadar doğrudan gözlemlenememesine rağmen, nötrino gerçeğini kabul etti. Aynı yıl, Güney Carolina'daki Sovannah River Nükleer reaktöründe çalışan Frederick Reiner ve Clyde Cowan, cihazları aracılığıyla reaktörden her saniye gönderilen milyarlarca nötrinodan aslında rasgele birini (aslında bu bir karşıt nötrino) yakalayabildiler.

Nötrinoya genellikle "kolay bulunmaz nötrino" denir. Böyle denmesinin iyi bir nedeni vardır. Nötrinolar *yok denecek kadar az* bir etkileşime sahiptir. Ne zaman bir nötrino "bir şey yapsa", etkileşimi zayıf olduğu için, örneğin beta bozunumuna gönderilir, ya da Reines-Cowan cihazı tarafından yutulur. Bu zayıf etkileşim aslında bildiğimiz en zayıf etkileşim



Fred Reines (1918-1998) 1950'lerde laboratuarında. Fotoğraf Ed Nano; AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

değil. Bu onu yerçekimine aittir (az sonra göreceğiz).

Ancak bu, içinde yüklü parçacık ve fotonların yer aldığı elektromanyetik etkileşimden ya da içinde proton, nötron ve kuarklarm yer aldığı güçlü etkileşimden çok daha zayıftır. Eğer birkaç milyon elektron voltluk enerjiye sahip olan bir nötrino, on ışık yılı (Dünya ile Alfa Kentaurus arasındaki mesafenin iki katından fazla) kalınlığında sert bir duvarla karşılaşsaydı, bunu aşabilmek için yok denecek kadar az şansa sahip olurdu. İşte bu, nötrinoları bulmanın niçin çok zor bir iş olduğunu açıklıyor. Ancak sizi merakta bırakıyor: Bir nötrino nasıl yakalanabilir? Yanıt *olasılıkta* saklı. Montaj fabrikasından çıkan otomobilleri düşünün. Herbirinin 100.000 millik yolu ciddi hiçbir kaza yaşamadan katetmesinin yok denecek kadar az bir ihtimal olduğunu varsayın. Bunlardan bazıları çok daha az hasarla, bazıları ise az hasarla yollarına devam edecek. Çok azı ciddi bir kazaya karışmadan önce daha sadece on mil gitmiş olacak, içlerinden biri ise sadece on blok öte-

ye gidebilecek. Bir laboratuarda aranan nadide nötrino ise tıpkı henüz fabrikanın kapısından çıkmadan aksilik yaşayan bir araba gibidir.

Muon

1930'ların başlarında temel parçacıkların dünyasında barış galip geldi. Madde, proton, nötron ve elektronlardan oluşuyordu. Fotonlar ile hâlâ kuramsal ama son derece itibarlı nötrinolar değişim sürecinde (etkileşim) yer alıyordu. Hepsi bu kadardı. Beş parçacık. Barış uzun sürmedi. Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde kozmik radyasyonla ilgili çalışmalar yapan bilim insanları, yüklü parçacıkların elektronlardan iki yüz kat daha büyük olduğuyla (proton ve nötronlardan dokuz kat daha az büyük olduğuyla) ilgili kanıt buldular. Önce bu iyi bir habermiş gibi geldi. Japon teorisyen Hideki Yukawa bundan çok kısa bir süre önce, çekirdeğin içindeki nötron ve protonlar arasındaki değiş tokuş sırasındaki kütlesi kadar bir kütleye sahip büyük bir nükleer güce neden olabilen, yeni ve güçlü bir şekilde etkileşim kuran parçacıkların varlığını haber vermişti. Teoriyle pratik arasında harika bir uyum olduğu görülüyordu. Ancak son bir deney "Hayır" dedi. 1945'ten kısa bir süre sonra, pek çok ülkedeki fizikçiler savaşla ilgili çalışmaları bırakıp esas çalışmalarına geri döndüklerinde, kozmik ışın deneyleri Yukawa parçacıklarının gerçek olduğu halde, bulut çemberleri ve fotoğraf emülsiyonlarında iz bırakan çoğu kozmik ışın parçacığı ile aynı olmadığını gösterdi. Yukawa'mn parçacıklarına *pion* denmeye başlandı. Kozmik radyasyonda daha çok bulunan parçacıklara ise (sonunda) *muan** dendi.

* Uzaydan dünyaya ulaşan temel kozmik radyasyon çoğunlukla proton içerir. Bu protonların atmosferde atom çekirdekleri ile çarpışması dünya yüzeyine ulaşamayan her tür başka parçacığın oluşmasına sebep olur. Dünyaya ulaşan yüklü parçacıkların çoğu muon'dur. Elinizi uzatın. Her saniye bir düzine civarında muon elinizden içeri girecek (ayrıca trilyonlarca, evet trilyonlarca nötrino!)

Fiziğin yeni bir alanına girmek bir Rus romanı okumak gibidir. Öğrenilecek pek çok isim vardır, ilk başta kim kimdir diye merak edersiniz.

Bu nedenle şimdi anlatmaya ara verip biraz parçacık isimlerinden bahsedeyim. Bir kısmı bir zamanlar yaptıkları şeyle ilgisi kalmamış pek çok parçacık vardır.

Leptonlar güçlü bir etkileşime girmeyen bir-yarım dönüşlü temel parçacıklardır (ve kuark içermezler).

Baryonlar kuarklardan meydana gelmiş, bir yarım dönüşlü (3*2 ya da 5*2 de mümkün), güçlü etkileşimi olan bileşik parçacıklardır. "Baryon" sözcüğü Yunancadaki "büyük" ya da "ağır" sözcüğünden gelmiştir. Proton, nötron ve bunlardan daha ağır pek çok parçacık baryondur. Ancak ağır olup da baryon olmayan parçacıklar da vardır.

Mesonlar tıpkı baryonlar gibi bileşik, güçlü etkileşimi olan ve kuarklardan oluşan parçacıklardır. Ancak yarım-tektamsayılı (fe2, 3-^2 gibi) dönüşleri olacağına 0,1 gibi tam sayılı değeri olan dönüşlere sahiptir. "Meson", Yunancada "orta", "ara" anlamlarına gelir. Bu sözcük (ya da bir alternatif sözcük olan "mesetron") ilk olarak elektron ve protonların kütlelerinin arasında olan parçacıklar için kullanılmıştı. Muon dediğimiz parçacık ise ilk başta mu meson diye adlandırılmıştı. Pion (Yukawa parçacığı) ilk başta pi meson'du. Artık biliyoruz ki muon ve pion'un hemen hemen hiç ortak noktası yok. Pion bir mesondur, muon ise değildir. Pion, aslında en az ağırlıkta olan mesondur. Diğer mesonlar daha ağırdır, bazıları ise protondan bile ağırdır.

Kuarklar, güçlü etkileşimleri olan, asla yalnız görünmeyen temel parçacıklardır. "Baryonik", baryonik yük taşıma özelliğine sahip olma anlamına gelir. Bir kuark ile bir karşıt kuark bir meson oluşturmak üzere birleştiklerinde, *baryonik yük* sıfırdır. Üç kuark bir baryon oluşturmak için birleştiklerinde ise baryonik yük birdir (Kuarklarla gelecek bölümde tanışacaksınız).

Burada kısaca değineceğim başka isimler de var. Hadronlar güçlü etkileşimleri olan baryon ve mesonlar içerir; nükle-

onlar *çekirdeklerde* bulunan nötronlar ve protonları kuşatır; *fermionlar* (Enrico Fermi'nin anısına) lepton, kuark ve nükleonlar gibi yanm-tek-tamsayılı dönüşe sahiptir; *bosonlar* (Hintli fizikçi Satyendra Nath Bose'un anısına) mesonlar ve güç taşıyıcılar gibi tamsayılı dönüş yapan parçacıklardır.

Muonlara geri dönelim. 1940'ların sonunda, fizikçiler kozmik radyasyonun bu parçasının görülen güçlü bir etkileşimi olmadığını belirlemişlerdi, çünkü muon maddeye son derece istekli bir şekilde giriyordu. Muon her bakımdan bir elektron gibi davranıyordu, tek farkı ondan iki yüz kat daha ağır olmasıydı. Büyük kütlenin sadece güçlü etkileşime gireceği görüşü, o dönemin başlıca gizemli konusuydu. Güçlü etkileşimi olmayan parçacıklar (elektron, nötron ve fotonlar) hafiftiler. Ancak oldukça ağır olduğu halde güçlü etkileşime girmeyen bir parçacık vardı. Rivayete göre Kolombiya Üniversitesi'nin seçkin fizikçisi I.I. Rabi, "Kim böyle emretti?" diye sordu. Caltech'teki parlak teorisyen Richard Feynman'm tahtasının bir köşesinde "Muon niçin ağır?" diye bir sorunun yazılı durduğu söylenir. Zaman içinde bu gizem daha da derinleşti, çünkü yapılan her ölçüm muon ve elektronun kütle hariç her bakımdan aynı olduğunu doğruluyordu.

Varlık nedeni ne olursa olsun, fizikçiler muonun, elektronun şişman, yakın akrabası olduğunu kabul etmek zorundaydılar. Bu arada; muonun ortalama olarak saniyenin iki milyonda biri kadar, elektronun (eğer rahatsız edilmezse) sonsuza kadar yaşadığı gerçeği arasında çok büyük bir fark yoktur. Her parçacık eğer başarabiliyorsa bozunmak ister. Yük koruması, enerji korumasıyla birlikte elektronu bozunmaktan kurtarır, çünkü elektronun dönüşebileceği daha hafif yüklü bir parçacık yoktur. Muonu ise bu konuda zorlamazlar ve sonunda (atomun içindeki dünyada saniyenin iki milyonda biri çok uzun bir süredir) muon dönüşür. Dönüşümde sağladığı özel *yöntem,* bize aslında muonun elektrondan kütle alışında da farkları olduğunu gösterir. Eğer kütle tek fark olsaydı, aşağıdaki formülde görüldüğü gibi, muonu bazen elektron ve foto-

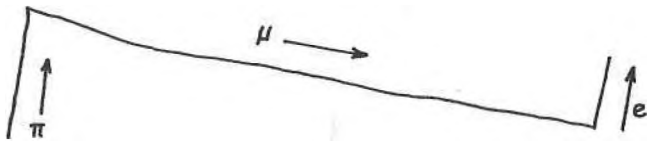
na (gamma ışınına) dönmüş olarak bulmamız gerekirdi.
$pL -> e + y$.
Bu dönüşme, eğer olsaydı, lepton sayısını korurdu (bir lepton dönüşümden önce, bir lepton dönüşümden sonra). Ancak böyle bir bozunma hiç görülmedi.

Açıkçası muon ve elektronları birbirlerine dönüşmekten alıkoyan bir özellik vardır.

Bu özellik *çeşni* diye adlandırdığımız şeydir. Çeşni de tıpkı elektrik yükü ve baryonik yük gibi *korunur,* etkileşimden sonra da etkileşimden önceki halindeki gibidir. Tablo B.l'deki muon-dönüşüm olayları listesine bakarsanız, dönüşüm olmadan önce muon çeşnisi içinde bir parçacığın, yani bu örnekte negatif muonun kendisinin, olduğunu görürsünüz. Bozunumdan sonra, muon çeşnili bir parçacık olan muon nötrinosu ortaya çıkar. Böylece'muon çeşnisi korunur. Ya elektron çeşnisi? Dönüşümde yaratılan parçacıklar bir elektron ile elektron tipinde bir *karşıt nötrino* içerirler. Bu nedenle, fizikçiler hesaplamalar yaptıklarında, dönüşümden sonra "çeşni sayısı" +1 (elektron için) ve -1 (karşıt nötrino için) olan elektronlar görülür: yani dönüşümden önce olduğu gibi bunların toplamı sıfırdır. Emin olmak için "çeşni"ye sayısal değer vermek biraz yapaydır ama işe yarar. Üç lepton çeşnisinin her biri korunmaktadır (Korunum kanunlarının detayları 8. bölümde.)

Muon Nötrinosu

1940'ların sonlarında muon gerçeğini ortaya koyan deneyler arasında, Büyük Britanya'daki Bristol Üniversitesi'nden Cecil Povvell ve birlikte çalıştığı meslektaşlarının yaptığı bir deney de vardı. Dedektör işlevi görmesi için özel olarak tasarlanmış fotoğraf emülsiyonunda, bir elektron tarafından takip edilen bir muon tarafından izlenen, bugün pion dediğimiz bir işarete rastlanmıştır. Pionun bir muon ile bir ya da daha fazla sayıda görülmeyen nötr parçacığa dönüşmüş ol-



Şekil 4. Bir pîonun durdurulduktan sonra görünen bir muon ile görünmeyen bir nötrinoya; ve bir muonun durdurulduktan sonra görünen bir elektron ile görünmeyen bir nötrinoya (aslında bir nötrino ile bir karşıt nötrinoya) dönüştüğünün izlerinin fotoğraf emülsiyonunda tespit edilen görüntüsüne dayanan bir çizim. Özgün gözlem 1948'de Bristol Üniversiteleri'nden Cecil Powell ve meslektaşları tarafından yapılmıştı. Muonun izinin uzunluğu yaklaşık 0.04 cm.dir (Bir incin (2.54) iki yüzde birinden daha az).

duğu ve daha sonra da bu muonun bir elektron ile bir ya da daha fazla sayıda nötr parçacığa dönüşmüş olduğu tespit edilmiştir. Bu görülmeyen parçacıkların nötrino olabilme ihtimali vardı, ama soru, nötrinonun bir ya da iki tür olup olmadığıydı. Fizikçilerin, muonun elektronunki gibi bir nötrino arkadaşı olabileceği konusunda güçlü nedenleri vardı, ama muonun nötrinosunun elektronunkiyle aynı olup olmadığını ilk başta belirleyemediler.

Muonu elektrondan ayıran özelliklerin arasında kütleden başka bir şey (çeşni özelliği) de olduğu için, muonun elektronun nötrinosundan farklı, kendi nötrinosu olduğunu düşünmek çok doğaldı. Ancak fizikçiler en basit açıklamanın, muhtemelen en doğru açıklama olduğuna inanmayı severler.

Eğer ihtiyacınız yoksa niye yeni bir parçacık icat edesiniz ki? Belki de elektronun nötrinosu çift işlev görebilir, elektronun yanısıra muonla da çiftleşebilirdi. Buna sadece deneyler karar verebilirdi.

Kritik deneyi 1962'de (Reiner ve Cowan elektronun karşıt nötrinoyu, bulduktan yaklaşık altı yıl sonra) Leon Lederman'ın* başkanlığında, Melvin Schwertz ve Jack Steinber-

* Daha sonraları Chicago yakınlarındaki Fermi Laboratuarında yöneticisi olan Lederman, halen yüksek okulda okutulan fen konularını düzenleme girişiminin ulusal lideridir, ve dokuzuncu sınıflara fizik öğretmek için başlatılan "Temel Fizik" hareketinin de öncülüğünü yapmıştır.

ger'den oluşan Kolombiya Üniversitesi 'nden bir grup bilim insanı tarafından yapıldı. O zamanlar için çok üstün sayılan 33-GeV gücündeki hızlandırıcı ile Long Island'daki Brookhaven Laboratuarında yapılan çalışmada, kozmik ışınların atmosferin yüksek kesimlerinde yaptığı şeyin iki katını laboratuar ortamında oluşturdular. Protonlar çekirdeklere çarparken pionları oluşturur. Pionlar uzaklara gider ve sonra muon ve nötrinolara dönüşür. Yeterince zaman ve yer verildiğinde muonlar da dönüşür, ama bahsi geçen fizikçiler dönüşen pionların ürettiği nötrinolarla ilgilendiler. Dönüşüm süreçleri şöyleydi:

7t^{+} -4 *ff*+ v;

TC' —> *fr*+ *v.*

Pozitif pion, bir *karşıt muon* ve bir nötrino olan pozitif muona dönüşür. Negatif pion, bir negatif muon ve bir karşıt nötrinoya dönüşür, (v sembolünün üzerindeki çizgi -Yunanca *nu*- karşıt parçacığı temsil eder.)



Muon nötrinosunu keşfeden takım, fotoğraf 1962 keşif yılı. Takımın liderlerinden Jack Steinberger (doğum 1921) sol başta, Melvin Schwartz (doğum 1932) sağ başta, ve Leon Lederman (doğum 1922) Schwartz'ın yanında. Leon Lederman arşivi.

Hızlandırıcıdan gelen parçacık serpintilerini bloke etmek için fizikçiler 44 foot kalınlığında (13,41 m.)* demirden somut bir bariyer kurdular, bu bariyer her yüklü parçacığı durdurmaya yeterliydi ama nötrinolara (ve karşıt nötrinolara) engel olamadılar. Eğer nötrinolar tek tip olsaydı, bariyeri yıkan bu nötrinolar fizikçilerin dedektöründe muonlar kadar çok elektron yani bir sürü proton ve nötron içeren bir çember yaratırlardı. (Atom çekirdeklerinin içinde!) Aslında nötrinolar sadece muon yaratarak muon nötrinosunun elektron nötrinosuyla aynı olmadığını gösterdiler.

Bu durumda yukarıda formülü verilen reaksiyon denkleminin yeniden yazılması gerekiyor.

$K^{+} \rightarrow pt + Ym$

Lederman-Schwartz-Steinberger grubu deney süresince dedektörlerinden saniyede yaklaşık 100 milyon (10^{8}) nötrinonun geçtiğini tahmin ettiler. Üç yüz saatlik bir operasyon sonunda yirmi dokuz nötrino yakalayabildiler. Muonun nötrinolarını yakalamak elektronunkiler kadar kolay değil!

Tau

1960'larda fizikçiler, leptonla ilgili çok şey düşündüler. Dört tane leptona ait elektron, muon, bunların nötrinoları ve bu leptonların karşıt parçacıkları var. Aslında burada her şey bitmeli. Özellikle üç kuarkın kanıtı ve dördüncüye inanmak için teorik nedenler olduğundan beri. (Dördüncü kuark 1974'de keşfedildi). Kısacası, fizikçiler dört leptonun olduğunu biliyordu ve dört kuarkın olup olmadığından şüpheleniyordu. Tekrar barış mı? Sadece çok kısa bir süre için evet.

Kaliforniya'daki Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezinde Martin Perl, muondan çok daha ağır bir yüklü lepton

* Doğru okudunuz: 44 feet kalınlığında (13.41 m.)!



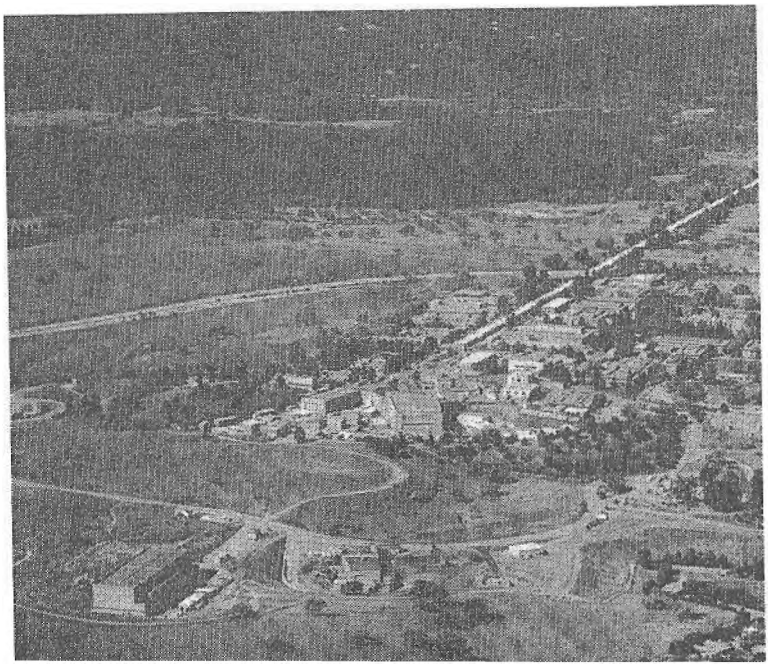
Martin Perl (doğum 1927), 1981. Foto: Martin Perl'ün arşivi.

jMartîn Perl (doğum 1927), 11981. Foto: Martin Perl'ün cifşivı.

arayarak bilinmeyen bölgeyi keşfetmeye karar verdi. Perl hem politikada hem bilimde eylemci bir kişiydi. 1960'larda Vietnam Savaşına karşı yapılan protestolara katıldı ve ülkedeki sosyal adalet için çalışmalar yaptı. 1970'lerin başlarında, Amerikan Fizik Örgütü'nde bilimsel ve toplumsal konularda çalışmalar yapılması için bir birimin kurulmasındaki başarılı mücadeleyi yönetti. Stanford'da Perl'ün bazı meslektaşları, onun ağır bir lepton bulmaya çalışmasındaki kararlılığı mantıksız buldu. Ona teorinin değil merak ve ümidin rehberlik ettiğini düşündüler. Hiçbir teorisyen ona kesinlikle başaracağını söyleyemezdi. Birlikte deneyler yaptığı meslektaşları ona kesinlikle kaybedeceğini söylediler.

Gerçekten de Perl'ün tau'yu keşfetmekle sonuçlanan araştırması yıllarca sürdü. Yeni leptonu aramaya 1960'ların sonlarında başladı ve ilk kanıtı bulduğunu 1975 'de duyurdu.

İlk kanıt biraz zayıftı. Perl ve diğerlerinin bulguyu doğrulayacak ilave deneyler yaptıkları 1978'e kadar fizik otoriteleri tau gerçeğini tam olarak kabul etmedi. (Bu arada iki kuark daha bulunmuştu, böylece kuarkların sayısı beşe çıktı. Perl'in



Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezi'nin (SLAC) havadan görünüşü. İki mil uzunluğundaki bir borudan (arkada) gönderilen yüksek enerjili elektron ve protonlar yeraltı dairelerinde (önde) depolanır.
Foto: SLAC arşivi.

1995'de aldığı Nobel Ödülü onun kararlılığının ve direncinin ispatıydı.

İşte Perl'ün tau'yu nasıl bulduğunun hikâyesi: Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezine bağlı bir "depolama dairesinde çarpışan elektron ve pozitronların (karşıt elektronların) ışınları üzerinde çalışmalar yaptı. Aygıtta, elektron ve pozitronlar, etrafı büyük bir yuvarlak çörek şeklinde çevrili bir yerde toplanıp "depolardı" (kısaca!) ve manyetik alanlar tarafından gizli koşu yollarının etrafındaki farklı yönlere yönlendirildi. Perl'ün deneyinde, bir elektronun bir pozitronla her çarpışmasında toplamı 5 GeV'ye kadar çıkan bir enerji oluştu, bu enerjinin bir bölümü yeni parçacıkların kütlesine dönüştürülebildi. Bir parçacık çifti yok olduğu zaman, onların

kütle enerjisinin (ya da "hareketsizlik enerjisi"nin) açığa çıktığını düşünmeye alışığız.

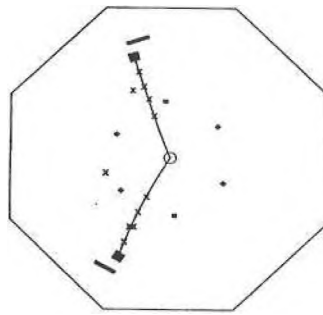
Ancak Stanford Doğrusal Hızlandırıcı Merkezinde, parçacıkların kinetik enerjileri kütle enerjilerini (en fazla 1 MeV olan) çok büyük miktarda geçer. Parçacıklar yok olduğunda sadece *kütle enerjileri* değil kinetik enerjileri de yeni bir kütle oluşturma işine girişirler. Tablo B.1'e göz gezdirdiğimiz zaman 5 GeV'in aslında bir tau-karşıt tau çifti yaratmak için gerekli olan (2 x 1.777 MeV) veya 3,55 GeV'den çok daha fazla olduğunu görürüz.

Gözlemlenen reaksiyonlar tau'nun "imzası" diye şöyle yorumlanmıştır:

$e\sim + e^{+} \rightarrow e\sim + fi^{+}$ + görünmeyen parçacıklar (1)

$e\sim + e^{+} \rightarrow e\sim + j£$ + görünmeyen parçacıklar (2).

Çiftler halinde ortaya çıkan elektron ve muonların ölçülen özelliklerine dayanarak Perl şaşırtıcı miktarda bilgi verdi: yu-



Şekil 5 - Tau leptonu gerçeğini göstermeye yardım eden bir olayın bilgisayarda yapılandırılmış şekli. Ortadaki küçük daire ışın tüpüdür. Elektron ve pozitronlar tüpte farklı yönlere doğru hareket ederler -elektronlar vizöre doğru, pozitronlar ise vizörden uzağa. Aşağıya doğru kavis yaptıran bir elektron, sekizgen bölge içinde durdurulur. Yukarı doğru kavis yaptıran bir muon, içine iki blok madde daha alarak yoluna devam eder. Bir elektron ile pozitron merkezdeki küçük daireyle çarpıştığında görünmeyen ama kızılötesi olan bir tau-karşıt tau parçacığı yaratılır. Şekil Martin Perl arşivi.

karıda gösterilen reaksiyonların "öncesi" ve "sonrası" arasında derhal yeni bir tür ağır parçacık ve karşıt parçacık oluştu ve hemen dönüştü, "görünmez parçacıklar" denen dönüşümden ortaya çıkan bu parçacıklar iki nötrino ve iki karşıt nötrinodan oluşan en az dört parçacıktı.

Perl'ün analizinin gücüne dayanarak şimdi sizlere yukarıda gösterilen reaksiyonda soldan sağa neler olduğunu anlatabilirim. İlk olarak, çarpışan elektron ve pozitron yok olurken yerlerine bir tau-karşıt tau parçacığı geçer.

$e + e^* \rightarrow r + t.$

Şimdi korunum kanunlarına bir bakalım. Öncesinde ve sonrasında yük sıfır. Parçacık-karşıt parçacık çifti yüzünden, tam elektron çeşnisi tam tau çeşnisi de önce ve sonra sıfır. Çok sayıda yeni kütle üretildi, çünkü bunu sağlayacak yeterli kinetik enerji vardı. Tau parçacığı bozunur (süratle!). Negatif taunun dönüşümü için olabilecek formül:

$T \rightarrow C + Vr + Ve.$

Pozitif taunun dönüşümü için olabilecek formül:

$t \rightarrow j\ddot{u}^+ + Vr + Vn-$

Resme, bu her iki dönüşüm olayında da hangi nötrino ve karşıt nötrino üretileceğini belirlemek üzere korunum kanunları girer. Örneğin birincisinde, tau çizgisinin korunumu, kaybolan taunun yerine bir tau nötrinosunun geçmesini ister, elektron çeşnisinin korunumu ise bir elektron ile elektron türünden bir karşıt nötrinonun birlikte yaratılmasını ister.

Şimdi bu T ve x^* parçacıklarının dönüşüm modellerini bir araya koyarsam, şöyle bir önce ve sonra modeli ortaya çıkar:

$$e^- + e^* _ \rightarrow e^- + {}_{\nu}T + Ve + fi^* + Vr + Vli. \qquad (3)$$

Bu reaksiyon yukarıda (1) denkleminde gösterilenle aynıdır, yalnız bu defa görünmeyen parçacıklar açıkça gösterilmiştir. Ortadaki r eşit olarak bir negatif muon ve bir muon karşıt nötrinosuna dönüşmüştür, ortadaki t ise eşit olarak bir

pozitron ile bir elektron nötrinosuna dönüşmüştür. Başka bir deyişle, Denklem (3)'ün sağ tarafındaki her e'yi /i'ye ve her /z'yi e'ye dönüştürürseniz, başka bir sonuç elde edebilirsiniz. İşte bu, yukarıda gösterilen Denklem (2)'deki reaksiyonu açıklar.

Kurgu çok ileri gittiğinde fizikçiler buna "hoşça kal" der. Sekiz tane gözlemlenmemiş parçacık (iki tau, iki nötrino ve iki karşıt nötrino) hakkındaki yorumum hoşça kal diye mi değerlendirilmeli? Hayır, değil.

Bunun nedeni ise şöyle açıklanabilir. Bir zamanlar fizikçiler elektron-pozitron çarpışmaları ile oluşan pek çok muon-elektron çiftinin enerjilerini ve seyahat yönlerini ölçmüşlerdi. Bu muon-elektron çiftleri, kendilerinin görünmeyen ama önemli orta bölümünü oluşturan tauların hem kütlesine hem de yaşam sürelerine dikkatle karar vermişlerdi. Elektron ve pozitronun çarpışmasından sonraki en kısa sürede, bir elektron ve bir muon ayrılıp gitti. Bu iki olay arasındaki kısacak sürede ne olduğunu fizikçiler, sizin Clark Kent'in telefon kulübesine girişi ile Süpermen'in kulübeden çıkışı arasındaki sürede ne olmuş olacağını bildiğiniz kadar net bir şekilde biliyorlardı.

Tau Nötrinosu

2000 yılının yazı, daha önce hiç görülmemiş son bir temel parçacığın yani son leptonla ilgili kanıtın ortaya çıktığı dönemdir. Illinois'daki Fermi Laboratuarında (o zamanki dünyanin en güçlü hızlandırıcısı) araştırmacılar bir volfram hedefine, 800 GeV'lik protonlar ateşlediler, bunların yapabildiği tek şey, nötrinolar hariç, oluşan enkazdan kurtulmak oldu. Manyetizma, yüklü parçacıkları yolundan çıkardı. Kalın bir tabaka halindeki yutucular çoğu nötr parçacığı yakaladı. Engelli yoldan geçerek fotoğraf emülsiyon dedektörüne ulaşanlar, her türde çok sayıda nötrinoydu. Bir miktar tau nötrinosu (araştırmacıların tahminine göre yaklaşık bir milyonun mil-

yonda biri kadar) emülsiyonun içinde, yaklaşık bir milimetre uzunluğunda küçük izler bırakan yükleri olduğu için, tau leptonları yaratmak üzere etkileşime girdiler. Dönüşen tauların yarattığı bu izler, parçacıkların da izleriyle birlikte tau nötrinolarımn varlığını ortaya koydu.

Tau nötrinosu görüntülenmeden önce de, hiçbir fizikçi onun varlığından şüphe duymuyordu. Yine de, lepton ailesi dünyasına olan inançları kesin kanıtla taçlandırıldığında içleri rahatladı. Leptonların tam olarak üç çeşnisi vardır ve elimizde beta radyoaktivitesi ve gözlemlenen pek çok sayıdaki diğer fenomeni de kapsayan bu leptonların davranışlarıyla ilgili iyi hazırlanmış bir teori vardır.

Nötrinonun Kütlesi

Pauli ilk olarak 1930'da nötrinonun varlığından bahsederken, onun bir elektronunkiyle yaklaşık aynı kütleye sahip olması gerektiğini ve asla bir protonun kütlesinin yüzde birinden daha fazla kütleye sahip olmaması gerektiğini söyledi.

Nötrinonun hiç kütlesi olamayacağı fikri kısa bir süre sonra, beta dönüşümü deneyleri sonucunda ortaya çıktı. Belirli bir beta dönüşümü olayında, belirli bir miktarda enerji elektron ile nötrino kombinasyonu tarafından alınır. Elektron (gözlemlenen parçacık) bu enerjinin bir kısmını alır; nötrino (gözlemlenmeyen parçacık) ise geri kalanını alır. Eğer nötrinonun kütlesi varsa, en azından kendi sabit enerjisini, mc^2, almalıdır. Radyoaktif çekirdekten belirlenemeyen bir hızda çok yavaş bir şekilde çıksa bile nötrino yine de bu kadar enerji taşırdı. Bu yüzden elektron, *en fazla* toplam enerji eksi nötrinonun mc^2'si kadar bir enerjiye sahip olabilir.

1930'larda fizikçiler daha kusursuz deneyleri başarıyla tamamladıklarında, beta bozunumunda çekirdekten fırlatılan en enerjik elektronların enerjinin neredeyse tamamını götürdüğünü buldular. Nötrinonun kütlesi (eğer varsa) çok küçük olmalıydı. (Bugün elektron nötrinosunun kütlesinin üst sınırı,

bir elektronun kütlesinin yüz binde birinden daha aşağıya çekilmiştir). Kütlenin tam olarak sıfır olma/olasılığı Fermi'nin teorisine uyuyordu ve kütlesiz fotonun^zaten yakın bir arkadaş olduğu fikrini veriyordu. Aslında tebrisyenler daha sonra nötronların kütlesiz olduğunu öneren, Fermi'nin teorisinin bir versiyonunu geliştirdiler.* Böylece daha sonraki onlarca yıl nötrinoların kütlesiz parçacıklar olduğu fikrine genel olarak inanıldı.

Kütlesiz bir nötrino fikri basit olduğu kadar aynı zamanda çekici bir fikir. Ama acaba doğru mu? Görünüşte değil. Bugün nötrinoların küçük kütleleri olduğuna dair iyi bir kanıtımız var. Tablo B.1 güncel üst sınırları göstermekte. Nötrinoun kütlesiyle ilgili kanıta bakmadan önce gelin fizikteki basitlik konusuyla ilgili kısa bir tur atalım.

Basitliğe Olan Güven

Basitliğe olan güven, bilim insanlarını özellikle de fizikçileri yüzyıllardır motive etmiştir. Bu ne anlama geliyor?

Doğanın basit kurallara göre işlediğine inanan biz insanlar, bu kuralları bulur, bunları matematiksel şekle çoğunlukla da az sayıda kâğıt parçalarına dökeriz.

Bir dizi gözlem için yapılan iki önermeden daha basit olanına güveniriz. "Basif'in ne olduğu tabii ki bir görüş meselesidir, ama bilim insanları onun bilinç, kavram ekonomisi, matematiksel ifadelerin kısa yolu ve uygulamanın genişliği anlamlarına geldiği yönündeki aynı görüşü paylaşırlar. Bilim insanları basitliğin güzellik olduğu sonucunu çıkarırlar.

Bir örnekle açıklayayım. Merkezinde güneşin olduğu şişirilmiş dev bir küre düşünün. Küre şişirildikçe yüzeyi tam olarak yarıçapının karesi kadar büyüyor. Yarıçap (güneş ile küre arasındaki mesafe) iki katına çıktığında, yüzeyi dört kat bü-

*Bir keresinde bir konferansta, çalışmalarını deneyler yaparak sürdüren bir fizikçiden şu sözleri duymuştum: Eğer Dünya'yı uzaydan bombardımana tutan büyük piyanolar tespit edilseydi, bazı teoristler yirmi dört saat içinde büyük piyanoların temel kozmik radyasyonun esas parçalan olduğunu söyleyen şık bir teori geliştirirlerdi.

yüyor; mesafe üç katına çıktığında, yüzey dokuz kat büyüyor. Bu bir geometrik gerçekliktir. (Üç boyutlu Öklit uzayında). Aynı zamanda Newton'ın yerçekimi gücü kanununa göre, güneşin yerçekimsel gücü, mesafenin karesinin tersi oranında azalır. Mesafe iki katma çıkınca güç dört kat azalır; mesafe üç katken güç dokuz kat azalır. Bu bir fizik kanunudur. Olabilecek daha basit bir kurgu yok. Yarıçap mesafesinin üssü *r* 2,1 veya 2,0000004 değil, Newton'a göre *tam* 2'dir. Maxwell'in elektromanyetizma teorisine göre, aynı ters kare kanunu yüklü parçacıklar arasındaki elektrik kuvveti için de geçerlidir.

Ancak yirminci yüzyılda fizikçiler daha derinleri araştırdıkça Newton ve Maxwell'in mükemmel basitlik yaklaşımının sadece tahmini olduğunu gördüler. Einstein'ın görelilikle ilgili genel teorisi bize yerçekimindeki r'nin gerçek üssü'nün *tam olarak 2* olmadığını (aslında gezegenler ve yıldızlar için bu sayı oldukça yakın) gösterir. Sonuç olarak bir yıldızın yörüngesinde dönen ideal bir gezegen olsaydı, elips biçimindeki bu yolunu her turunda değiştirmezdi (Newton'un kanununda olduğu gibi) ama her seferinde spiral biçiminde çok az farklı bir yol izlerdi. Atomun derinliklerinde ise, kuvantum mekaniğinin bir özelliği olan, gelip giden "görünmez parçacıklar", elektrik gücünü çekirdeğe yakın bir yerde ters kare kanunundan çok az bir farkla oluştururlar. Bunun sonuçlarından birine göre, Paul Dirac'ın 1928'de tahmin ettiği şekilde, hidrojen atomunun içindeki elektronun belirli iki devinim durumunda enerjisi kesinlikle aynı olmalıydı (basitlik!), ama o güne kadarki çok küçük olan enerji farkı arttı (çok da basit değil).

Bu ilişkileri açıklamak için izlenebilecek yollardan biri; belirli bir tahmin düzeyinde (çok iyi bir tahminde) doğa bize basitliğin çarpıcı kanunlarını, ama daha derinlere inersek de büyük karmaşıklıkların kanunlarını gösterdiğini bilmekti. Bir başka örnek verecek olursak: John Wheeler ve diğer araştırmacıların teorilerine göre, yeterince kısa zaman dilimlerinde uzayın yeterince küçük bölgelerine baktığımızda, bizim sıradan dünyamızdaki uzay ve zamanın basitliği kuvantum köpü-

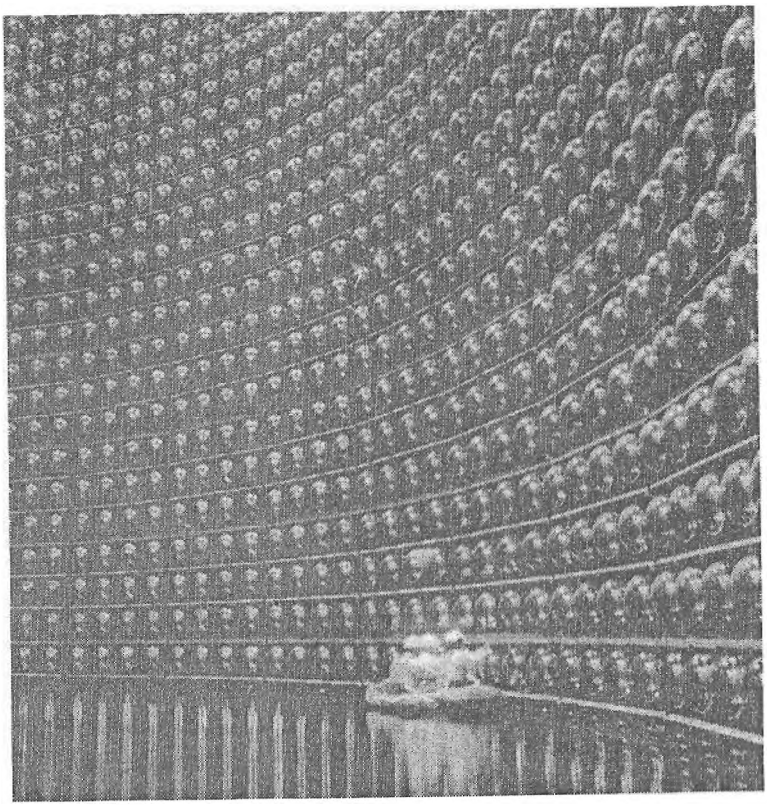
güne neden olur.

Bizim etrafımızdaki sıradan fiziksel dünyanın büyük bölümü o kadar basit değildir. Bilim insanlarının fiziksel çevremizi basit terimlerle açıklanmaktan uzak olduğunu bilmek için sadece yerel hava durumunuza Bakmanız yeterli. Sudaki dalgalar, ağaçlarda titreyen yapraklar, bir kamp ateşinden çıkan duman -hepsi de basit tanımlara meydan okur.

Bu nedenle, genel anlamda üç tane karmaşıklık katmanımız var. En üstteki katman -görünen katman- en karmaşık olanıdır (Dalgalanan su, titreyen yapraklar, hava durumu). Bu katmanın altındaki ise geçtiğimiz birkaç yüzyılda bilim insanları tarafından açığa çıkarılmış şaşırtıcı düzeyde basit olan katmandır (Newton'm yerçekimi, Maxwell'in elektromanyetizması, Dirac'ın kuvantum elektronu). En alttaki katmanda ise karmaşıklık tekrar başını kaldırır. Basitlikten küçük sapmalar görülür. Ancak bunlar bizim yakın çevremizdeki karmaşıklıklar gibi değildir. Daha derin, daha usta bir basitlik yansıtırlar. Örneğin çoğu fizikçi, kısaca birkaç satır olan Einstein'ın genel görelilik denkleminin mükemmel bir basitliği olduğunu söyler. (Bu fizikçiler yerçekimini sadece uzay ve zamana dayanarak açıklarlar ve boyları ya da bileşikleri ne olursa olsun bütün düşen nesnelere yerçekiminin niçin eşit hızlanma sağladığını ilk defa gösterirler.) Ancak bu denklemler bize Newton'ın ters kare kanununun pek doğru olmadığını gösterir. Modern kuvantum teorisi ise güzel ve basit temel denklem ve kavramlarıyla bize, vakum -hiçlik- dediğimiz şeyin aslında parçacıkların sürekli olarak yok edildiği ve yaratıldığı canlı bir yer olduğunu açıklar. Basitlik ustalıktır, onun yanında yer alan güzellik de.

Nötrino Kütlesine Dönüş

Böylece, bize modern fiziğin öğrettiği karmaşıklık ve basitlik katmanlarına dayanarak nötrinolar tamamıyla kütlesiz olsa "iyi" olurdu diyebiliriz ancak daha derin -belki de en basit- teoriye dayanarak eğer bunların küçük bir kütlesi olduğu



işçiler bir sal üzerinde bir miktar suyla doldurulmuş olan Kamiokande dedektörünün içini denetliyor. Fotoğraf Tokyo Üniversitesi, Kamioka Gözlemevi, Kozmik Işın Araştırma Enstitüsü.

söylenirse şaşırmamalıyız.

Bilim insanları son dönemlerde nötronların kütlesi olduğu ve bu kütlenin küçük ve farklı nötronların farklı kütleleri olduğu sonucuna vardılar.

Nötrino kütlesi ile ilgili ilk kanıt 1990'da Japonya'da Süpek Kamiokande adındaki dev yeraltı dedektörünün ölçümleriyle ortaya çıktı ve 2001 ile 2002 yıllarında yine yerin çok derinlerinde bulunan SNO, Sudbury Nötrino Gözlemevi'nde (Kanada'da) yapılan ölçümlerde desteklendi.

Japonya'da çalışan uluslar arası bir grup, cihazlarından geçip giden nötrinolar tarafından yaratılan muonları yaklaşık

olarak saatte bir gözlemlediler. Nötrinolar ise atmosferin yüksek kesimlerinde kozmik ışınlar tarafından yaratılmıştı. Dünya nötrinolar için çok şeffaf olduğundan, çalışmayı yürütenler nötrinoların etkisinin hem baş üstünden hem de "ayak altı"ndan geldiğini gördüler, yani bunlar Dünya'nın bir ucu olan atmosferden olduğu kadar bu ikisinin arasında kalan diğer tüm yerlerden de geliyorlardı. Ayak altından gelen muon nötrinolarının baş üstünden gelenlere oranında bir "hesap açığı" vardı. Daha uzaklara giden muon nötrinoları ise -bazıları sekiz bin mil daha uzağa gider- "kaybolurlar". Peki bu, nötrinoların kütlesi olduğunu nasıl açıklar? Şimdi birkaç dakikalığına kemerlerinizi bağlamanızı istiyorum.

Bir kuvantum sistemi aynı anda iki "durum"da var olabilir. Bundan daha da ötesinde, bir muon parçacığı hiç de "saf bir parçacık olmayabilir, tanımlanabilen basit bir kütlesi bile olmayabilir. Belirli kütleleri olan iki ayrı parçacığın karışımından oluşmuş olabilir. Buna karşılık, tau nötrinosu da, karışımı oluşturan bu iki parçacıktan oluşan bir parçacık, ama farklı bir parçacık olabilir. Eğer karışımı oluşturan bu iki parçacığın kütlesi aynı olsaydı, kalışımla ilgili bütün bu kurgu, ölçülemeyen sonuçlan olan bir sürü matematik işlemi olurdu. Ancak bu iki farklı parçacığın kütleleri de farklı olursa, sahneye parçacıkların dalga dünyası çıkar. Kuvantum dalgaları, farklı frekansta dalgalanan iki bileşik parçacığı ile benzerdir (çünkü frekans enerjiye, enerji de kütleye bağlıdır). Bu durum muon nötrinosunun kademeli olarak (belki de yüzlerce millik bir uçuş mesafesinden daha fazla) bir tau nötrinosuna (belki de bir elektron nötrinosuna) dönüşmesini, sonra yeniden muon nötrinosuna dönüşmesini ve böyle devam etmesini sağlar, bu olaya *nötrino dalgalanması* denir.

Bu durumun müzikte şöyle bir benzeri olabilir: Bir orkestradaki iki kemancı "a"yı çalarak kemanlarını akort ederlerse ve a'larının frekansı (perdesi) aynı değilse, "tempolu bir ses" duyarlar yani bu iki frekansın *farkındaki* yoğunluğun yavaş dalgalanması.

Kemancılardan biri perdeleri aynı olana kadar akort etme-

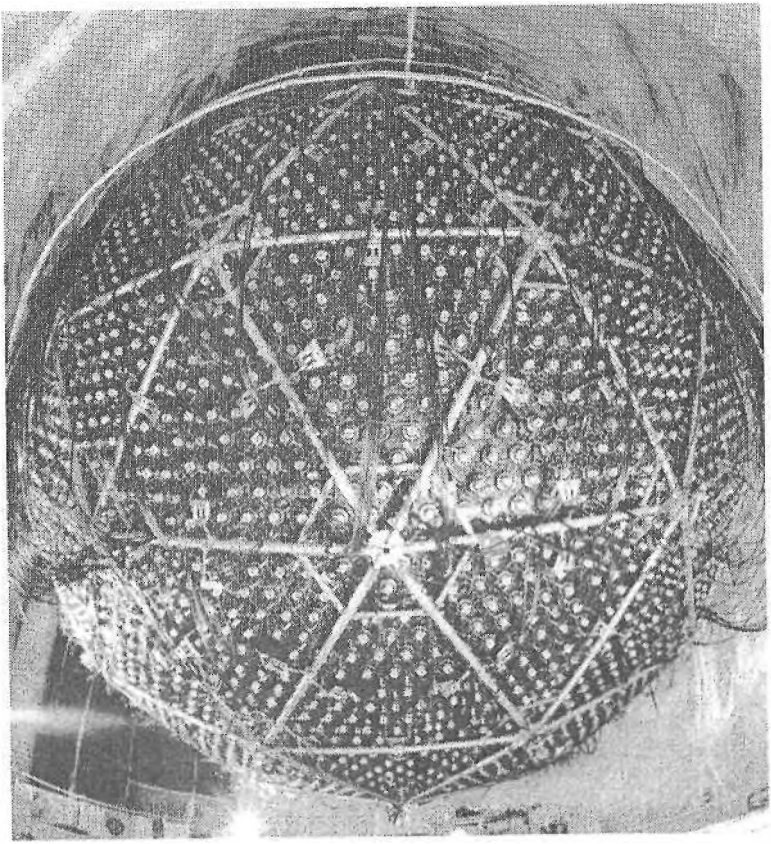
ye devam ederse tempolu ses yok olur. Benzer şekilde, iki "karışık" nötrinonun kuvantum dalgaları sadece, bileşik parçacıkların kütleleri aynı değilse yavaş bir dalgalanma üretmek üzere "tempo" tutar. Nötrino kütlesinde dalgalanma *gerekmez,* ama eğer dalgalanma görülürse bu sadece nötrinonun kütlesi olduğu anlamına gelir, yani en az iki nötrinonun kütlesi farklıdır ve muon nötrinoları veya elektron nötrinoları ya da tau nötrinoları dediğimiz parçacıklar kendi başlarına diğer "saf kütle"lerin karışımıdır.

Bütün bunlar, ayak altı nötrinosundan daha fazla baş üstü nötrinosu görme olayından çıkan sonuçlardır. Ancak nötrinonun hesap açığı dediğimiz şey, açıya ve nötrino kütlesi için kesin kanıt sağlayan enerjiye bağlıdır. Daha sonraları SNO'da farklı bir uluslar arası takımın yaptığı çalışmalar, nötrino kütlesi meselesini daha sağlam bir zemine oturttu.

Ontario'daki bir nikel madeninin bir buçuk milden daha derinine kurulan SNO dedektörü, bin metre ton (909,000 kg) ağır su* içerir ve güneşten gelen nötrinoları incelemek için son derece uygundur. Astrofizikçiler, teorik hesaplamalara dayanarak, Güneş'ten gelen nötrinoların Dünya'ya hangi oranda ulaştığını ve güneşte yaratılan nötrinoların sadece bir çeşnisi olduğunu biliyorlar. Sadece elektron nötrinoları güneşe gücünü veren termonükleer reaksiyonlar tarafından üretilebilir. Amerikalı fizikçi Ray Davis'in çalışmasının önderliği sayesinde, bilim insanları Dünya'ya ulaşan elektron çeşnili nötrinoların sayısının sanılandan çok daha küçük olduğunu uzun yıllardır biliyorlardı.t SNO çalışmasının sonuçlan bunun nedenini açıkladı. Nötrino dalgalanması nedeniyle, güneşten çıkan elektron çeşnili nötrinolar, Dünya'ya gelirken değişime

* Ödeneği çok iyi olan bir fizik grubu bile, bin metre ton (909.000 kg.) ağır su alacak bir bütçeye sahip değildir. Bu nedenle SNO takımı, suyu Kanada'nın nükleer reaktör programından Ödünç aldı. SNO takımı günün birinde bu suyu saf ve nötrino bombardımanının deney amacıyla yol açtığı etkilerden arınmış olarak iade edebilecek.

t Yıllar önce, Princeton İleri Araştırmalar Enstitüsü'nde astrofizikçi olan John Bahcall rivayete göre, "Eğer deney yapan fizikçiler birazcık daha güneş nötrinosu görselerdi, güneşin parlamadığını kanıtlamış olurlardı." demiş.



SNO dedektörünün dış yapısı. 1 8 metre (59 feet) çapında ve içe doğru bakan yaklaşık 9.600 dedektör tüpü var. Bu fotoğraf çekildikten sonra iç bölüm bir milyon kilogram ağır suyla doldurulduu. Fotoğraf SNO arşivi.

uğrarlar, sürekli olarak muon nötrinoları ve/veya tau nötrinolarına ve tekrar elektron nötrinolarına dönüşürler. Bu *dönüşümün* sonucunda Dünya'ya ulaşan güneş nötrinoları, belki de eşite yakın parçalar şeklinde, üç çeşniye bölünürler.

SNO takımının yaptığı işin nasıl bir şey olduğunu anlamanız için, üzerinde çalıştıkları iki reaksiyondan bahsedeceğim. Her iki reaksiyonda da ağır hidrojenin çekirdeği olan deuteron var. Bu, ağır suyu "ağır" yapan ağır hidrojendir.

Bir deuteron, bir proton ve bir nötrondan oluşur, ben sem-

bolünü [pn] olarak göstereceğim. Reaksiyonlar:

Ve + {pn} —> e + p + p /

ve

v + {pn} —> v + p + n.

İlk reaksiyonda nötron protona ve elektrona dönüşür. Çeşninin korunması gerektiği için, ilk reaksiyon elektron çeşnili nötrinoların bombalanması şeklinde olur. Araştırmaların bulgularına göre, eğer güneşten dünyaya gelen nötrinoların hepsi yolda çeşnilerini koruyabilseydi, bu tür reaksiyonların ancak üçte birinin olması beklenirdi. İkinci reaksiyonda, nötrino, proton ve nötronu açığa çıkarmak için enerjisinin bir kısmını vererek deuteronu zorla açar. Bu reaksiyon herhangi bir çeşnili bombardıman nötrinoları için devam edebilir. Araştırmacılar, eğer tüm güneş nötrinoları (gerekli enerjiye sahip) Dünya'ya ulaşsaydı, bu türden çok sayıda reaksiyonun beklenmesi gerektiğini buldular.

Sonuç: Güneş, teorinin yaması gerektiğini söylediği miktarda nötrino yayıyor (burada astrofizikçiler rahat bir nefes alabilir). Nötrino dalgalanmasıyla, elektron nötrinoları muon ve tau nötrinolarına dönüşüyor; ayrıca nötrinoların sıfırdan farklı ve eşit olmayan kütleleri var.

Bu deneyler nötrinoların kütlelerinin ne kadar olduğunu tam olarak açıklayamaz. Bildiğimiz tek şek küçük oldukları-dır. Tablo B.1 güncel sınırları göstermekte. (2003 itibariyle).

Niçin Üç Çeşni? Başka Var mı?

Kimse, parçacıkların niçin üç çeşnisi olduğunu bilmiyor. Yay teorisyenleri bunların özelliklerinin günün birinde bir cevap bulmaya yardımcı olacağına inanıyor. Kuramsal fiziğin bu güçlü topluluğunun üyeleri, her temel parçacığın proton veya atom çekirdeğinin boyutuna göre hayal edilemeyecek kadar, küçük ölçüde titreşim ya da dalga yayı içerdiği şeklin-

deki ilginç ama riskli bir görüş üzerinde çalışıyorlar.

Eğer bu yay teorisyenlerinin görüşü doğruysa, yerçekimi parçacık teorisiyle birleştirilecektir; temel parçacıkların sayısı, kütlesi ve diğer özellikleri tahmin edilebilecek; lepton ve kuarkların da artık birer boyutu olacaktır. Bütün bunlar, küçüğün doğasıyla ilgili görüşümüze devrim niteliğinde bir katkı sağlayacak.

Eğer daha önce hiçbir kaşifin gitmediği bir yere gitseydiniz ve eğer üç tane uzak köyden geçseydiniz, doğal olarak ilerilerde başka köylerin olup olmadığını merak ederdiniz. Bilinmeyen, haritası olmayan bir bölgede bunu bilme şansınız kesinlikle yok. Ancak yürüyüp öğrenebilirsiniz. Benzer şekilde, fizikçilerin de, parçacıkların üç çeşnisini keşfettikten sonra, dördüncü, beşinci ya da sonsuz sayıda başka çeşnilerin keşfedilmek üzere bekleyip beklemediği hakkında hiç fikirleri olmadığını tahmin edersiniz. Zaten ikinci çeşninin ortaya çıkması bir sürprizdi. (Rabi'nin muonla ilgili sorusunu hatırlayalım: "Bunu kim emretti?"), üçüncüsü de öyle (Martin Perl, tau'yu ararken şüpheciliğe karşı gelmek zorunda kalmıştı). Şaşırtıcı bir şekilde, fizikçiler üçüncü çeşninin uzaklardan değil, kuyruğun sonundan işaret verdiği! için rahatladılar.

Nasıl oluyor da fizikçiler kaşiflerin aksine, uzaklardaki el değmemiş bölgelerde hiç sürpriz olmadığına (en azından daha fazla çeşni olup olmadığı konusunda) emin olabiliyorlar (en azından bir miktar emin olabiliyorlar)? Güneşten gelen nötrinoların toplam sayısının, gelen elektron nötrinolanndan tam üç kat fazla olduğu gerçeği üçün sınır olduğunu destekleyen bir görüş. Başka bir görüş ise kuvantum teorisinde görünmeyen süreçler denen, çok genel anlamda görünmeyenin görünene olan etkisi diye açıklanabilen durumdur. Kuvantum teorisi şöyle der: "Önce" (çarpışması yakın iki parçacık diyelim) ile "sonra" (çarpışmayla aniden ortaya çıkan yeni yaratılmış parçacıklar diyelim) arasında akla gelebilecek her şey belirli korunum kanunları çerçevesi içinde olur. Gerçekleşen ortalama olaylar arasında her tür parçacığın yaratılması ve

hızla yok olması vardır. Bu ortalama parçacıklar görünmemesine rağmen, gerçek sonucu etkilerler, yani önce ile sonradan "sonrası"nı. Eğer bir ya da daha fazla ilave çeşni olsaydı, bunlar bu görünmez dansta rol alırlardı ve varlıkları tespit edilirdi. İlave çeşnili bir parçacığın olduğuna dair hiçbir kanıt yok.

Belki de ilave çeşnilere karşı en ikna edici kanıt, ağır bir nötr parçacığın dönüşümüyle oluşan, bir protondan yüz kat daha büyük olan Z°'dır.

İşte bir başka kuvantum etkisine giriş. Z°'m ölçülen kütlesi farklı değerlere sahiptir. Yani Z°'ın kütlesi her ölçüldüğünde, farklı bir değer elde edilir. Deneyi yapan fizikçiler aynı parçacığın ölçülen tüm kütle değerlerini bir araya getirdiklerinde, *kütlenin belirsizliği* denen bir farklı kütle değerleri ortalaması dağılımı görürler. (Belirsizlik anlamlı bir sözcük, çünkü bu en basit bir ölçümdeki hata olasılığından da geniş. Gerçekten de bu parçacığın tek bir kütle sayısı yok.) Heisenberg'in belirsizlik ilkesine göre, kesin bir değeri olmayan bu kütle kesin olmayan bir zamana bağlıdır: birinin çok olması demek diğerinin az olması demektir. Bu nedenle eğer kütlenin kesin olmayan değeri büyükse Z°'m sadece çok kısa bir süre yaşaması gerekir. Eğer kütlenin kesin olmayan değeri küçükse, Z° daha uzun yaşar. Aslında Z°'ın ömrü saatle ölçülemeyecek kadar kısadır. Kütlenin belirsizliği, onun bir saat gibi hizmet vermesini sağlar. Kütle ölçümlerinin dağılımlarına bakarak araştırmacılar parçacığın yaşam süresini tam olarak belirleyebilirler.

Şimdi kanıtın devamı geliyor. Yüklü parçacıklar üreten Z° bozunumunun belirli şekilleri gözlemlenebilir. Görünmeyen şekiller arasında nötrino-karşıt nötrino çiftine dönüşüm vardır. Görünen (yüklü) parçacıklara dönüşümün oranını bilen ve birleşik dönüşümün tüm şekilleri için ortalama yaşam süresini bilen fiziçiler, görünmeyen parçacıklara dönüşüm oranını bulabilirler. Z°'ın iki, dört, beş veya başka bir sayı değil, tam olarak üç tür nötrino-karşıt nötrino çiftine (elektron, muon ve tau çeşitlerine) dönüşebileceğini hesaplarlar. Üçten faz-

la çeşni olabilmesi için, eğer dördüncü veya daha sonraki çeşnili nötrinolar beklenmedik düzeyde büyük olsaydı -diyelim ki protonun kütlesinden çok daha büyük- bilinen üç nötrinonun kütlesi protonun kütlesinden çok daha küçük olurdu.

Böylece çeşniler üçte *duruyor*. Ama niçin? İşte bu, heyecanlandıran bir soru.

4. bölüm
Geniş Ailenin Diğer Üyeleri

Kuarklar

Kuarklar gerçekten tuhaf yaratıklardır. Temel dediğimiz sınırlı sayıdaki parçacık arasında yer alırlar, ama şimdiye kadar onlardan bir tanesini bile kendi başına görmediğimiz gibi, göreceğimizi de sanmıyoruz. Kuarkların kütlesiyle ilgili belirsiz bir fikrimiz var (tartmak için bir tane bile yakalayamadığımız için) ve en ağır olanının en hafif olanından niçin on binlerce kat daha ağır olduğuyla ilgili hiçbir fikrimiz yok. Ama oradalar işte, altı tanesi ve üç grupta, bir dizi leptonla eşleşen bir dizi kuark. Leptonlar gibi, onların da bir-yarım birimlik dönüşü var. Yine leptonlar gibi ölçülebilen fiziksel büyüklükleri yok; söyleyebildiğimiz kadarıyla nokta olarak bulunuyorlar. Bunun dışında leptonlardan çarpıcı bir şekilde ayrıldıkları özellikler var, güçlü etkileşimleri var (leptonların yok) ve parçacık oluşturmak üzere, tıpkı pion, proton ve nötronlarda olduğu gibi, bizim görebileceğimiz şekilde ikişer üçer birleşiyorlar (leptonlar ise başka parçacıklar oluşturmak için birleşmez).*

Bütün işleri, iki veya üç kişilik gruplar halinde at, inek veya zürafa kostümü giyip sahneye çıkmak olan aktörler hayal edin. Seyircilerin arasında olan siz, digital fotoğraf makinenizi çıkarıp bu "hayvanlaf'ın fotoğrafını çekip bu fotoğrafları inceleyebilirsiniz. Bu yaratıklar hakkında pek çok şey öğre-

* Bir pozitron ile bir elektron, pozitronyum adındaki hidrojen gibi bir atom oluşturmak için güçlerini birleştirirler, ama bu dev atom boyutundaki varlık bir parçacık değildir.

nebilirsiniz -boylarını, renklerini, davranış şekillerini ve (sahnede görevli arkadaşlarınızın yardımıyla) ağırlıklarını. Her bir hayvanın içinde kaç aktör olduğunu anlayabilirsiniz. Ancak bu hayvan kostümleri içindeki aktörlerin fiziksel özelliklerini, cinsiyetlerini ve tenlerinin rengini bilemezsiniz. Sizin bu durumunuz, bir fizikçinin proton, nötron ve diğer birleşik parçacıkları (daha temel varlıklardan oluşan parçacıkları) inceleyerek kuarklar hakkında bir şeyler öğrenmeye çalışması gibidir.

Bu sahne hayvanları benzetmesi çok uygun değildir, çünkü aslında fizikçiler kuarklardan birini dahi tek başına görmenin avantajı olmadan bile onlarla ilgili pek çok şey öğrendiler. Üstelik, protonun içindeki kuarklarla, hayvan kostümü içindeki aktörler arasında büyük bir fark var -kütlelerinin ölçüsü. Eğer pek çok hayvanın rolünü oynama yükünün altı aktörde olduğunu ve bunların farklı gruplar kurduğunu bilseydiniz, her bir aktörün ağırlığını bulmak için, her sahne hayvanının ağırlığını ölçüp bireysel ağırlıkları bulana kadar bu ağırlıklarla uğraşıp dururdunuz (kostüm ağırlıklarının izniyle). Bunun nedeni, yaşadığımız dünyada kütlelerle basit bir şekilde toplama işlemi yapılabilmesi. Eğer George 160 pound (72,6 kg) ve Gracie 120 pound (54,4 kg) ağırlığındaysa, bir tartının üzerinde ikisinin toplam ağırlığı 280 pound (127 kg)'dır. Bu sıradan gerçek, kimyagerler için çok yararlı olan kütlenin korunum ilkesinde de çok değerli bir yere sahiptir.

Ancak kütle, diğer pek çok şey gibi, atomun içindeki dünyada kütle ve enerji eşitliği nedeniyle farklı davranır. Üç tane kuark bir proton oluşturmak üzere bir takım oluşturduğunda, protonun kütlesinin sadece küçük bir bölümü bu kuarkların kütlesinden oluşur. Kuarkların kütlesinin büyük kısmı protonun içinde hapsolmuş saf enerjiden oluşur. Bu, sanki at kostümü giymiş George, Gracie ve Gloria'nın ortak ağırlığının 400 pound (181,6 kg), atın ağırlığının ise onbeş ton olması gibidir. Zavallı fizikçi, protonun kütlesini on milyonda bir görülenden daha doğru ölçtükten sonra, sözlerini değiştirerek protonun içindeki kuarkların, çarpanı ikiden büyük veya kü-

çük olan ortalama kütlelere sahip olduklarını söyledi.

Ek B'de Tablo B.2'de bu altı kuarkm adları ve özellikleri gösterilmekte.

İlk grupta yer alan *yukarı* ve *aşağı* sözcükleri rasgele seçilmiştir (Hiçbir yönle ilgisi olmayan sıradan isimlerdir). İkinci grup için fizikçiler daha esprili davranmış ve bu kuarklara *tuhaf ve tılsım* isimlerini vermişler (üzgünüm, biri sıfat, biri isim). 1940'ların sonlarında, kozmik radyasyonun içinde umulmadık düzeyde uzun ömürlü, protondan ağır parçacıklar görüldü. Bu "tuhaftı. Bu parçacıklar tuhaf parçacıklar oldular ve biz bugün onların niçin saniyenin on milyarda biri kadar yaşadıklarını anlıyoruz. Çünkü onlar, nötron ve protonda bulunmayan bir tür kuark içeriyorlar: *"tuhaf kuark"*. Daha sonra, oldukça ağır bazı meson ve baryonların saniyenin trilyonda biri kadarlık bir süre yaşadığı bulunduğunda (çok daha hızlı yani saniyenin trilyonda birinin milyarda biri ya da daha kısa bir sürede bozunmaları "gerekirken"), bu "tılsımlı" bir şey olarak kabul edildi. Bu parçacıkların yaşadıkları hayattan dolayı, bunların farklı bir tür kuark oldukları düşünülerek onlara *"tılsım kuark"* dendi.

1977 ve 1995'de keşfedilen oldukça ağır üçüncü gruptaki kuarklara gelindiğinde, fizikçiler korkuyordu. Bir süre bu son iki kuarka "doğruluk" ve "güzellik" dendi. Ancak korunum kazandı. "Doğruluk" "zirve" ve "güzellik" "dip" oldu. (Bu yeni isimlerin kuramsal bir mantığı vardı. Ancak ne yazık ki doğruluk ve güzellik kayboldu.)

Gözlemlenen her parçacık sıfır, +1, -1, +2, -2 gibi elektrik yükü taşırken (proton yükü birimleri), kuarklar ve karşıt kuarklar +1+3, -1+3, +2+3, -2+3 gibi kesirli yük taşırlar. Ancak gözlemlenebilen varlıklar oluşturmak için daima sıfır ve tamsaylı yüklerle birleşirler.

Kuarklar tarafından "kesirleştirilmiş" olan bir başka sayı baryon sayısıdır (bazen elektrik yükü anlamında baryonik yük sözcüğü kullanılır). Proton ve nötronlar baryondur (özgün anlamının "ağır parçacık" olduğunu hatırlayalım). Baryon sayısının en önemli özelliği *korunmasıdır*. Ağır bir bar-

yon daha hafif bir baryona dönüşebilir. Böyle olduğunda, dönüşümden önceki ve sonraki baryon sayıları aynıdır. Baryon sayısı denen şey kaybolmaz. (Benzer şekilde, elektrik yükü de korunur. Reaksiyondan sonra da reaksiyondan önceki kadardır.) Evrenin yapısı ve biz insanların şansına, en hafif baryonun gidebileceği hiçbir yer yoktur. Sabittir, çünkü dönüşebileceği kendinden daha hafif bir baryon yoktur. Bu en hafif baryon protondur.

Proton sonsuza dek yaşayacakmış gibi görünüyor.* Protonun en yakın komşusu ondan biraz daha ağır olan nötrondur. Bu, nötronun sabit olmadığı anlamına geliyor: nötron baryonun korunum kanunu ya da enerjinin korunum kanununa karşı gelmeden daha küçük kütleli protonlara (ve elektron ile karşıt nötrinoya) dönüşebilir. Yalnız kaldığında nötron, üç farklı parçacığa dönüşmeden önce ortalama on beş dakika yaşar. Yine biz insanların şansına, nötron atom çekirdekleri içinde sabitlenir, böylece 209 kadar proton ve nötron kombinasyonu bir araya toplanarak sonsuza kadar yaşar. Bunun anlamı, dünyamızın sadece hidrojen elementinden değil, çok sayıda farklı elementten oluştuğudur. Bunun tek nedeni ise kütlenin enerji, enerjinin de kütle demek olduğudur. Aslında, sabit bir çekirdeğin içindeki nötronun kütlesi potansiyel enerjisi sayesinde dönüşemeyecek kadar küçülür. (Nötronlar sabit olmayan bazı çekirdeklerde *dönüşebilir.* Bu süreç beta radyoaktivitesine neden olur.)

Bu konu bizi tekrar kuarklara döndürdü. Kuarklarm her biri 1+3'Kik baryon sayısı taşır. Böylece bir proton ya da ıjötron oluşturacak üç kuarkın baryon sayısı 1 olur. Bir karşıt kuarkm baryon sayısı -1+3 olduğundan, bir kuark ile bir karşıt kuarkın baryon sayısı sıfırdır. Bu tür kuark-karşıt kuark kombinasyonları mesonları oluşturur. Bu nedenle karşıt kuark gö-

* Son dönemlerde geliştirilen bazı teoriler, protonun zaten sabit olamayacağını, ama on dört milyar yaşındaki evrenin içinde bu kadar uzun ömürlü bir parçacığın dönüşme şansının çok küçük olduğunu söyler. Proton dönüşümünü araştıran fizikçiler, henüz protonun dönüşümüyle ilgili bir bulguya rastlamamıştır.

rülmemiş bir şey değildir. Parçacıkların büyük sıralamasındaki yerini almıştır. (Ancak bu parçacıklardan hiçbiri sabit değildir).

Tablo B.2'de görüldüğü gibi, kuarkların, yukarı ve aşağı kuarkların birkaç MeV'lik ağırlığından, 170.000 MeV'lik zirve kuarkının ağırlığına kadar çok geniş bir kütle ağırlık yelpazesi vardır. Daha önce de belirttiğim gibi, kimse bunun niçin böyle olduğunu bilmiyor.

Kuarkların Tablo B.2'de gösterilmeyen başka bir önemli özelliği ise *renktir.* (Üzgünüm, bir tane daha rasgele seçilmiş isim -gördüğünüz renklerle hiç ilgisi yok). Renk daha çok, elektrik yükü gibidir (ve aslında bazen *renk yükü* denir); asla kaybolmayan ve yok edilemeyen bir parçacık tarafından taşınan bir maddedir. Kuarklar "kırmızı", "yeşil" ya da "mavi" olabilirler. Karşıt kuarklar ise karşıt kırmızı, karşıt yeşil ya da karşıt mavi. Kırmızı, yeşil ve mavinin eşit karışımı ise "renksizdir. Aynı miktarlardaki karşıt kırmızı, karşıt yeşil ve karşıt mavinin karışımı ise yine renksizdir.

Bileşik Parçacıklar

Kuarklar, hayret verecek derecede ilginçtir; kendilerini gizlerler, taşıdıkları renkleri de. Kuarklar ikili ya da üçlü olarak birleştiklerinde laboratuarda renksiz bileşik parçacıkların oluştuğunu görürüz.* Tablo B.3'de, bildiğimiz yüzlerce bileşik parçacığın bir miktarı görülüyor.

Tablodaki varlıklar iki parçacık türüne ayrılmıştır. Üç kuarktan oluşan ve yarım-tek-tamsayılı dönüşü olan (1*2; 3*2, 5*2 gibi) baryonlar ve kuark-karşıt kuark çiftlerinin oluşturduğu tamsayılı dönüşü olan (0,1,2 gibi) mesonlar. 3. Bölümde tanıtılan sözcüklerden bazılarını hatırlayacak olursak: baryonlar *fermion* adındaki parçacığın bir çeşididir, mesonlar ise

* 2003'te Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'daki araştırmacılar bir penta kuarkın izine rastladıklarını bildirdiler. Penta kuark: dört kuark ile bir karşıt kuarktan oluşan bir varlık (aslında bir baryon).

bozon adındaki parçacığın bir türüdür. Fermion ve bozonlann davranışları arasındaki oldukça şaşırtıcı farkı anlatmayı 7. Bölüme bırakıyorum. Tablodaki her parçacık bir *hadrondur,* yani güçlü etkileşimi olan bir parçacıktır. Bunun basit bir nedeni var: hadronlar güçlü etkileşimi olan kuarklardan oluşur.

Bildiğimiz en hafif baryonlar, her atomun tam merkezinde buluan proton ve nötronlardır. Daha sonra Yunanca sözcüklerle anılan -lambda, sigma, omega (ve daha pek çok) gibi baryonlar gelir. Proton ve nötronlar yukarı (y) ve aşağı (a) kuarklardan oluşur. Tablodaki diğer baryonlar bir ya da daha çok sayıda tuhaf (s) kuark içerir. Halen daha ağır olan baryonlar (listede yok) tılsım (c) ve dip (b) kuarkları içerir.

Zirve kuarkı içeren baryona henüz rastlanmamıştır. Tılsım kuark içeren en hafif baryon protonun kütlesinden yaklaşık iki buçuk kat ağırdır. Bugüne kadar bilinen, dip kuark içeren *tek* baryonun kütlesi, protonun kütlesinin altı katıdır.

Proton hariç baryonların hiçbiri sabit (radyoaktif) değildir. Tablo tipik dönüşüm sayılarını ve ortalama ömürleri göstermektedir.

Nötronun 886 saniyelik ortalama ömrü neredeyse "sonsuzluk" demektir. 10^{-10} saniyelik ortalama ömürler bile atomun içindeki dünyanın standartlarına göre olağanüstü uzundur. 10"un milyarda bir anlamına geldiğini hatırlayalım, böylece 10^{-10} saniye demek saniyenin on milyarda biri demektir. Tablo B.3'ün daha altlarına, meson bölgesine baktığınızda, *eta* parçacığının ortalama ömrünün yaklaşık 10" saniye olduğunu göreceksiniz. Bu, biz insanlar için düşünülemeyecek kadar kısa bir süre, ancak etanın ölmeden önce bir atomun içinde salına salına gezineceği kadar uzun bir süredir.

Tablo B.3'e, bilinen düzinelerce meson arasından sadece en hafif kütleli olan üç tanesini seçip koyalım. İçlerinde en hafifi olan pion, bir protonun kütlesinin yaklaşık yedide biri kadar ağırlıktayken, bir elektronun kütlesinin 270 katı kadardır. Daha önceki bölümde belirtildiği gibi, pion ilk olarak 1940'larm sonlarında tanımlandığında, bunun 1930'larda Yukawa'nın varlığını haber vermiş olduğu, proton ve nötronlar

arasındaki değişiminin şiddetli nükleer gücü açıkladığı varsayılan parçacık olduğu düşünüldü. Yukawa değişim teorisi tamamıyla yanlış değildi ama, bu teorinin yerine kuarklarla yer değişen gluanların teorisi büyük oranda geçti. Bu yüzden pion, parçacık dansının baş balerini olacağına, bale topluluğunun "sıradan" bir üyesi oldu.

Şimdi sizlere tablodaki pion bileşiğinin -daha doğrusu yükleri +1, -1 ve 0 olan *üç* pionun- işaret ve sayı sistemini açıklayayım. Pozitif yüklü pion bir yukarı kuark ile bir karşıt aşağı kuarktan oluşur. Bu kombinasyonu ud şeklinde yazarız. Eğer Tablo B.2'yi incelerseniz, bu kombinasyonun yükünün aslında +1 olduğunu (bir karşıt-aşağı kuarkın yükü +İ4-3 olduğu için) ve baryon sayısının sıfır olduğunu (bir karşıt kuarkın baryon sayısı -l-f-3 olduğu için) fark edeceksiniz. Tüm mesonların baryon sayısı sıfırdır. Negatif yüklü pion bir aşağı kuark ile bir karşıt-yukarı kuarktan oluşur ve du şeklinde yazılır. Nötr, ya da yüksüz pion ise bir bölümü bir yukarı kuark ile bir karşıt-yukarı kuark, bir bölümü ise bir aşağı kuark ile bir karşıt-aşağı kuarktan oluşan bir karışımdır, bu nedenle bu karışımı uu&dd şeklinde yazarız. Benzer işaret sistemi pozitif, negatif ve nötr türleri olan kaonlar için de geçerlidir, (kaon keşfedilen ilk "tuhaf parçacıklardan biridir. Eta, bir bakıma nötr pion'un ortağıdır. Onun karışımı da uu&dd'dır.

Mesonlar, diğer olasılıkların yanı sıra, tamamiyle leptonlara dönüşebilirken, baryonlar baryon korunum kanunu tarafından sınırlandırıldıkları için bunu yapamazlar. Bir baryon, nötronun yaptığı gibi, lepton üretebilmesine rağmen, dönüşüm sonrası parçacıkları içinde daima başka bir baryon bulundurmalıdır.

Güç Taşıyıcıları: Olayların Gerçekleşmesini Sağlayan Parçacıklar

İşte fiziğin ne işe yaradığını tanımlamak için bir yol. Fizik ne (varlıklar) ve *ne olduğu* (olaylar) ile ilgilidir. Gördüğümüz

parçacıklar (leptonlar, baryonlar ve mesonlar) ile görmediğimiz (kuarklar) ama yine de üzerinde çalıştığımız parçacıklar neyi oluştururlar. Güç taşıyıcıları dediğimiz başka tür parçacıklar ise *ne olacağına* karar verir. Burada şunu da belirtmeliyim ki, *ne olmadığı* en az *ne olduğu* kadar ilginçtir. Gerçekleşmeyen pek çok süreç vardır (ve biz bunların gerçekleşemediğini düşünürüz), örneğin elektrik yükünün hiçbir şeyden yaratılmamış olması, ya da enerjinin ortaya çıkması ve ortadan kaybolması ve belki de protonun radyoaktif dönüşümü.

Tablo B.4 "güç taşıyıcılarını gösteriyor, bu parçacıkların dönüşümü diğer parçacıklar arasındaki bütün etkileşimleri ya da "güçleri" açıklar. Bunların hepsi 1 ya da 2 dönüşlü bozonlardır ve yine hepsi istenilen sayıda yaratılıp yok edilebilir, çünkü hiçbir koruma kanunu onların hiçbirini korumaz. Güç taşıyıcılarından üçünün dev kütlesi vardır, diğer üçünün ise hiç kütlesi yoktur. Bu kütlesiz parçacıklar arasında hâlâ kuramsal olan yerçekiminin güç taşıyıcısı vardır.

Yerçekimsel Etkileşim

Tablo B.4'de artan güç sırasına göre dizilmiş, dört farklı türde etkileşimi olan güç taşıyıcıları gösterilmiştir. Bunlardan en zayıfı yerçekimidir. Ölçebildiğimiz en zayıf yerçekimsel etkileşimde bile milyarlar üstü milyarlar kadar çok sayıda yerçekimi olduğundan, biz sadece yerçekimlerinin toplam etkisini büyük sayılar şeklinde görürüz, tek bir yerçekiminin etkisini asla görmeyiz. Bu nedenle yerçekimini keşfetmek için hiç ümidimiz yok. Nasıl oluyor da doğanın en zayıf gücü bizi Dünya'nın üzerinde tutuyor, dünyayı güneşin etrafındaki yörüngesinde tutuyor ve bacaklarımızı bile kırıyor? Bunun iki nedeni var. Birincisi, yerçekimi sadece çekici, ama ondan çok daha güçlü olan elektrik güçleri hem çekici hem de itici. Elektriksel açıdan Dünyamız o kadar dengeli bir pozitif ve negatif yüke sahip ki, kurak bir günde bir halı üzerinde ayaklarınızı sürüyerek yürüyüp elektrik yüklenseniz bile, sizi yere doğru çeken fark edilebilir bir elektrik gücü hissetmezsiniz.

Eğer Dünya'daki negatif yükün tamamı sihirle yok edilip pozitif yük bırakılsaydı (ve eğer siz ayağınızı halıya sürterek yürüdüğünüzdeki kadar az negatif elektrikle yüklü olsaydınız), dev bir elektrik çekimiyle derhal öldürülürdünüz. Eğer, tam tersine, Dünya'daki bütün pozitif yük sihirle yok edilip negatif yük bırakılsaydı, olabilecek en hızlı roketten bile daha hızlı bir şekilde, elektriksel güçle uzaya doğru fırlatılırdınız. Bu aynı güzel denge (çekici ve itici güçlerin mükemmele yakın bir şekilde iptal edilmesi), yönetim gücünü yerçekimine bırakarak, tüm evrene hakim olur.

Yerçekiminin, zayıflığına rağmen bizim için çok belirgin olmasının diğer nedeni ise bizi aşağıya doğru çeken *kütlenin çok olmasıdır.* Biz yere altı bin milyar milyar ton kadar maddenin yerçekimiyle tünmüyoruz. Aslında her bir madde parçası, bir diğeri tarafından yerçekimsel olarak çekiliyor. Sıradan büyüklükteki nesnelerin yerçekimine bakarsak yerçekiminin zayıflığı daha kolay anlaşılır. Bir marketteki kasiyerden üç feet (91,44 cm) uzakta durduğunuzda, kendi ağırlığınızın milyarda birinden daha az bir yerçekimi gücüyle kasiyere doğru çekiliyorsunuz demektir. Başka bir şekilde açıklayacak olursak, sizi dikey olarak aşağıya doğru çeken dünyanın gücü, sizi yana doğru çeken kasiyerin gücünden bir milyar kattan daha fazladır. Bu "yanal" çekim gücünü ölçmenin, yani laboratuarındaki iki nesnenin arasındaki yerçekimsel gücü ölçmenin fizikçiler için ne kadar zor olduğunu anlamak hiç de zor değil. Yerçekiminin güçsüzlüğünün sonucu olarak, yerçekiminin gücünün ölçüsü olan Newton'm yerçekimi katsayısının fizikteki diğer temel sabit sayılara göre daha az kesinliği olan bir sayı olduğu bilinir.

Yerçekiminin güçsüzlüğünün bir başka sonucu ise, onun atomun içindeki dünyada bilinen bir rolü olmamasıdır. Bir hidrojen atomunda bulunan proton ve elektronlarda rol alan elektrik gücü, yerçekimi gücünü kesinlikle dev olabilecek bir çarpanla yani KP'dan daha büyük bir sayıyla dışarı iter (10^{39} ne kadar büyük acaba? Atomların peş peşe dizilerek, evrenin en uzak noktasına bin kez gidip gelecek kadar). İnanılmaz de-

recede zayıf olmasına rağmen yerçekimi, protondan çok daha önemsiz bir rol mu oynuyor acaba? Bugün hayal etmesi zor olduğu halde, yerçekimi kuvantum teorisine bağlanabilir mi? Öğrendiğimiz zaman muhteşem olacak.

Zayıf Etkileşim

Etkileşim hiyerarşisi içinde bir sonraki etkileşim, radyoaktivite içindeki elektronların (beta ışınlarının) yayılımı ve nötrinoların içinde olduğu diğer pek çok dönüşümden sorumlu olan zayıf etkileşimdir. İsminden de anlaşılacağı gibi, yerçekiminden çok daha güçlü olmasına rağmen zayıftır. (Elektromanyetik ve güçlü etkileşimlere oranla). Tablo B.4'de gösterildiği gibi, zayıf etkileşim W ve Z parçacıkları tarafından, bir protondan seksen kat daha fazla kütleye sahip olan (özgün adıyla "ağır" parçacık) büyük bozon çürümelerinde "arabuluculuk" (daha sonra arabuluculuğu açıklayacağım) yaptırılır.

Enrico Fermi 1934'de beta bozunumu ile ilgili ilk teorisini geliştirdiğide, proton, nötron, elektron ve nötrino dörtlüsü arasında doğrudan zayıf etkileşim olduğunu düşünmüştü. Bundan yıllar sonra, fizikçiler bir veya daha fazla dönüşüm parçacığının ya da artık bunlara güç taşıyıcıları diyebiliriz), nötronun nötron olduğu zaman ile parçacığın bir proton, elektron ya da karşıt nötrino olmak üzere yok olduğu anın arasında geçen zaman kadar olan kısa ömürlerinde bu sürece dahil olabileceklerini düşünmüşlerdir. Ancak fizikçiler W ve Z parçacıklarını, Cenevre'deki CERN'de* büyük bir proton sinkrotonu yardımıyla 1983'de keşfettiler. Bu parçacıklar, tıpkı bir zamanlar büyük nükleer güçlerde güç taşıyıcısı olduğuna inanılan pozitif, negatif ve nötr pion üçlüsü gibi, pozitif, negatif ve sıfır yüklü üç kardeş gibidir. Ancak W-Z üçlüsü ile pion üçlüsü arasında birkaç büyük fark vardır. Pionlar,

* CERN, Fransızca Centre Europeen pour la Recherche Nucleaire sözcüklerinin baş harflerinden oluşan, Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi'nin kısaltılmış şeklidir. CERN'deki sinkroton, dünyadaki benzerleri gibi, elektrik gücünün, yol üzerindeki işaretleri hızla geçen parçacıklara geçiş anında uygulandığı bir koşu pisti hızlandırıcısıdır.

kuark-karşıt kuark çiftlerinden oluşan belirgin fiziksel ölçüye sahip bileşik parçacıklardır. W ve Z parçacıkları ise, sanıyoruz ki, temel fiziksel boyutu olmayan, kendinden daha küçük olan herhangi bir şeyden oluşmamış parçacıklardır. Üstelik pionlara oranla W ve Z parçacıkları son derece büyüktür.

Elektromanyetik Etkileşim

Tablo B.4'teki diğer varlık olan fotonun, 1905'te Albert Einstein tarafından "icat edilmesi"nden bugüne kadar gelen çok ilginç bir tarihçesi vardır. 1920'lerde gerçek bir parçacık olmayan bir "zerre" olarak kabul edilmiş, 1930Tar ve 1940'larda fizikçiler onu elektron ve pozitronlarla bağdaştırarak kuvantum elektrodinamiği adındaki güçlü teoriyi oluşturduklarında çok büyük önem kazanmıştır. Günümüzde ise fotonu, elektromanyetizmanın güç taşıyıcısı olarak çalışan, gerçek sıfır kütlesi ve gerçek sıfır büyüklüğü olan temel bir parçacık olarak görürüz. Aslında siz fotonları gece-gündüz, her an gerçekten "görürsünüz". Güneşin enerjisini dünyaya taşırlar ve gözünüze yansıyan her yıldızın, gezegenin, mumun, ampulün ve şimşeğin yaydığı ışığı size ulaştırırlar. Her saniye milyarlarca foton şu anda okuduğunuz sayfadaki bilgiyi size taşır. Ayrıca görmediğiniz -radyo, televizyon ve kablosuz telefon dalgaları, sıcak duvarlardan yayılan ısı, vücudunuzdaki X ışınları gibi- pek çok foton vardır. Evren, kozmik zemin radyasyonu denilen Büyük Patlama'dan geride kalan düşük enerjili fotonlarla doludur. Özet olarak, evrendeki her bir madde parçacığında yaklaşık bir milyar foton vardır.

Henüz Tablo B.4'ün gizlediği bir şeyden bahsetmedim: dört tür güçten ikisinin muhteşem birleşimi; zayıf ve elektromanyetik güçlerin birleşimi. Yıllar önce Yukawa, bir dönüşüm parçacığının ne kadar büyük olursa, gücün alanının ve erişiminin o kadar az olacağım fark etmişti. Kendinizi kaprisiniz yüzünden dönüşüm parçacığının kütlesini değiştiren bir tanrı olarak düşünürseniz, başka hiçbir şeyi değiştirmeden sadece bu parçacığı gitgide büyütseydiniz, gücün gitgide daha zayıfladığını görürdünüz (gücün alanı da gitgide daralırdı).

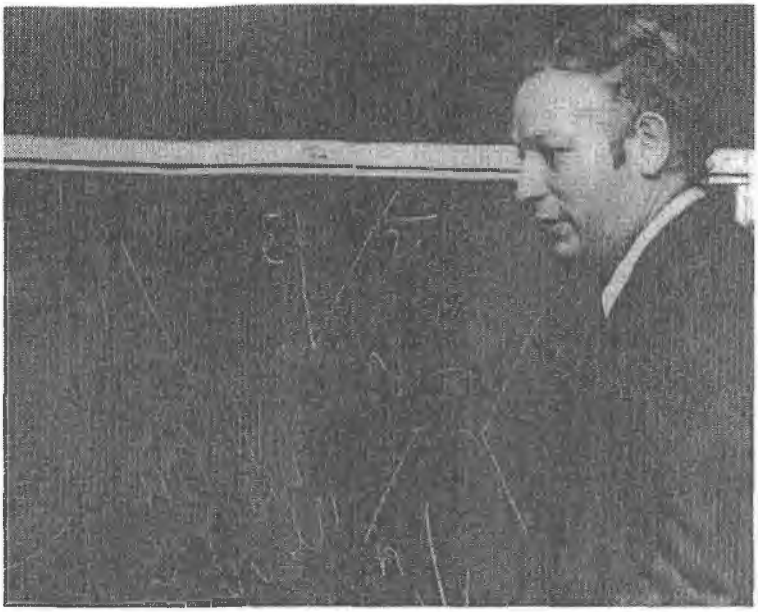


Abdus Salam (1926-1996) 1978, AIP Emilio Segrè Görsel Arşivi, Bugünün Fiziği ve Weber Kolleksiyonları ve W.F. Meggers Nobel Ödülü Alanlar Galerisi Arşivi.

1970'lerde üç seçkin kuramsal fizikçi -Abdus Salam, Steven Weinberg ve Sheldon Glashow-, zayıf ve elektromanyetik etkileşimlerin basit bir temel etkileşimin farklı yüzleri olduğu fikrini büyük bir cesaretle ortaya atmışlardır. Bu fizikçiler, bu iki tür etkileşim arasındaki temel farkın sadece güç taşıyıcılarının doğasmdaki fark olduğunu söylediler. Elektrik gücünün alanı geniştir (metrelerce hatta kilometrelerce uzaktan farkedebiliriz) ve oransal olarak güçlüdür çünkü bu gücün taşıyıcısı kütlesiz bir parçacık olan fotondur.

Zayıf etkileşimin alanı küçüktür (bir protonun çapından daha küçük bir alana ulaşır) ve oransal olarak zayıftır, bu nedenle çok büyük güç taşıyıcılarına ihtiyacı vardır. W ve Z parçacıklarının keşfinin üzerinden çok zaman geçmeden, bu parçacıklar, bu "elektrozayıf' teori için gerekli bilgiyi sağladılar.

Bir bakıma, zayıf ve elektromanyetik etkileşimler birdir ve aynı güçtür. Ancak pek olmasa da, her tür parçacığı etkileyen zayıf etkileşim evrenseldir. Elektromanyetik etkileşim ise sadece elektrik yükü olan parçacıkları etkiler.



Steven Weinberg (doğum 1933). 1977,
Foto: AIP Emilio Segre Görsel Arşivi, Weber Kolleksiyonu.

Bu birleşim fikrini başarıyla ortaya koyan fizikçiler 1979 yılında Nobel Ödülü aldılar. Pakistanlı olan Salam, Londra Imperial College'in kuramsal fizik bölümünün başkanıydı (1961-62 yıllarında Londra'da onun grubunda çalışma ayrıcalığını yakalamıştım).

Ayrıca, Trieste'de Uluslararası Kuramsal Fizik Merkezi'nin kurulması sırasındaki çalışmalara başarıyla liderlik etti. Bu merkezden dünyanın daha az gelişmiş bölgelerinde zor koşullarda çalışan fizikçilere yardım etmek ve onları cesaretlendirmek için hiç durmadan çalıştı.

Elektrozayıf teori üzerinde çalışırken Harvard'da olan Weinberg, daha sonra Austin'deki Teksas Üniversitesi'ne*

* Fizikçiler arasındaki bir söylentiye göre, Weinberg Teksas Üniversitesi'ne geçtiğinde, buradan "insafsız" bir maaş talebinde bulunmuş: Bir futbol antrenörü kadar ücret talep etmiş. Bu hikayenin doğru olup olmadığını, eğer doğruysa, üniversitenin onun bu isteğini karşılayıp karşılamadığını bilmiyorum.



Sheldon Glashow
(doğum 1932)
1980, Foto: AIP
Emilio Segre Görsel Arşivi,
Segre Kolleksiyonu

geçti. Kuramsal fiziğe olan katkıları çok geniş bir alanı kapsar. Ayrıca, fizikle ilgisi olmayan okuyucular için çok zarif ve etkili bir yazardır. Weinberg ve Glashow, New York'ta aynı okulda okuyan iki arkadaşken daha sonra birlikte Harvard Üniversitesi profesörleri olmuşlardır.

Hiç ünivetsite eğitimi almamış Rus Yahudisi bir ailenin oğlu olan Glashow, sadece parçacık fiziğine önemli atkısı olan kişilerden biri değil, aynı zamanda fizik ana dalında okumayan öğrencilerin de popüler ve etkili bulduğu bir öğretmendi.

Güçlü Etkileşim

Tablo B.4'teki son birim, sekiz parçacıktan oluşan (eğer karşıt parçacıkları da sayarsanız on altı) bir settir. Bunlar isimlerine uygun bir şekilde güçlü etkileşimin "yapışmasını" sağlayan kanıtlardır. Elektrikle yüklü olmamalarına rağmen, kırmızı-karşıt yeşil ya da mavi-karşıt kırmızı gibi tuhaf karışımlı renk yükleri taşırlar. Bu sekiz gluonu tanımlayan, sekiz bağımsız renk-karşıt renk kombinasyonu vardır.* Bir kuark

* Kırmızı, yeşil ve mavi, artık güçlü etkileşim "renkleri"nin standart isimleridir. Bir zamanlar farklı ülkelerin fizikçileri, ülkelerinin bayrağı üzerindeki renkleri kullanmayı tercih etmişlerdir.

ile bir gluonun etkileşime girdiği her seferde, kuarkın rengi değişir. Bu tıpkı, her defa tişört satmak için durduğunuz tezgahta (ya da etkileşim kurduğunuz tişört tezgahıyla), bir öncekinden farklı bir renkte tişört giyerek durmanız gibidir.

Yüklü parçacıkların aracılığıyla, birbirleriyle dolaylı olarak etkileşim kuran fotonların aksine, gluonlar kuarklar üzerinde güç kullanmasına ilave olarak birbirleri üzerinde de dolaysız güç kullanırlar.

Niçin fizikçiler kuarklar, gluonlar gibi görünmeyen varlıklar ve renk gibi şeyleri öne sürerler? Çünkü bunlar işe yarar. Altı kuark, sekiz gluon, üç renk -bu dizi sanki tüplerle bir arada tutulan bir kaleydoskopu çağrıştırıyor. Ancak bu şemayı açıklayan gerçeklerin sayısı altı artı sekiz artı üçü çok aşıyor. Binlerce olmasa bile yüzlerce parçacık ve bunların karşılıklı etkileşimleri, bu güçlü etkileşimin "resmi" tarafından düzenleniyor.

Gluonları gözde olabildiğince net canlandırmak için tek bir protonun bir basketbol topu ölçüsünde şişirildiğini düşünün. Şimdi yuvarlak bir yığın kalacak şekilde "deri"sini toptan ayırın. Bu yuvarlak yığının üzerinde hiç ayrılmadan dönen şey üç tane kuarktır. Bunların hiçbirinin ölçüsü yoktur, ancak kütle, renk, dönüş, elektrik yükü ve baryon numaraları vardır. Bunların üç farklı neşeli renge boyanmış parçacıklar olduğunu düşünmenizde hiçbir sakınca yok -ancak bir detay hariç: kuarklar birer noktadır. Bu kuarklar gezinirken sürekli olarak gluon yayar ve yutarlar. Bu nedenle basketbol topunun içindeki alan, sadece üç değil düzinelerce çılgınca dans ederek hareket eden, yaratılan ve yok edilen parçacığı içerir. Gluonlar da kuarklar gibi birer noktadır. Rengi, karşıt rengi ve başka renkleri"nin standart isimleridir. Bir zamanlar farklı ülkelerin fizikçilerini, ülkelerinin bayrağı üzerindeki renkleri kullanmayı tercih etmişlerdi. Gluonlar özellikleri olan, ama kütlesi olmayan noktalardır. Mucizevi bir şekilde, ya da göründüğü kadarıyla, gluon topluluğu bir bütün olarak rengin nötrlüğünü korur. Ayrıca, toplam bir birimlik elektrik gücünü (bu bir proton), toplam bir birimlirk baryon sayısını ve top-

lam bir-yanm birimlik dönüşü korur.

Eğer bir kuark özgün basketbol topunun yüzeyinin sınırlarından dışarı çıkmaya başlarsa, gluonlar tarafından kuvvetle geri çekilir, tıpkı belirli bir oyun alanının dışına çıkmakta olan bir çocuğun, tetikte olan bir öğretmen tarafından geri çekilmesi gibi. Bu büyük güç oldukça dikkate değer bir güçtür. Yerçekiminin (uzayan mesafelerde gücü zayıflar) ya da elektrik gücünün (bunun da uzayan mesafelerde gücü zayıflar) aksine, gluonlarm çekiş gücü mesafe arttıkça *çoğalır.* Bu yüzden protonların içindeki alanda bulunan kuarkların ve gluonlarm kapladığı alanın "deri"ye ihtiyacı yoktur. Gluonlar, hiçbir parçacık dışarıya kaçmasın diye insafsızca ve her seferinde daha büyük güçle sınırlarda polislik yapar.

Her bir kuarkın, protonun ortasında nispeten özgün bir şekilde gezindiğine dair kanıt vardır (oyun alanının ortasında, güvende olduğu için öğretmeni tarafından ilgilenilmeyen bir çocuk gibi).

Şimdiye kadar bir kuark ya da gluonu asla tek başına incelemedik. Mesafe uzadıkça güç arttığı için, parçacıklardan birini diğerlerinden koparmak imkânsız. Eğer bununla bir lastik parçası arasında benzerlik kuracak olursak; lastik parçasını ne kadar fazla güçle çekersek, o kadar uzar. Şunu merak edebilirsiniz: Güçlü gluon bağı bile lastik parçası gibi kopup, bunun sonucunda bir kuark açığa çıktığına göre, bir protona çok fazla enerji yükleyip yeterli bir enerji çekişiyle kopması sağlanarak ucuna ekli olan her ne ise serbest kalamaz mı? Çoğunlukla olduğu gibi, bizim sıradan dünyamızdaki olaylar ile atomun içindeki dünya arasında pek benzerlik yoktur. Bir kez daha, kütleyle enerjinin eşitliği kendini hissettirir. Evet, protona yeterince enerji verilirse (diyelim ki bir hızlandırıcıdan ateşlenen başka bir proton ile çarpışaşarak), gluon-kuark zinciri kırılabilir. Ancak gluon ve kuarkların buna karşı savaşma yöntemleri vardır. Bir kuarkın kopması için gereken bu enerji, başka parçacık çeşitleri yapmak için yeterlidir. Eğer, örneğin, büyük bir enerji yüklemesiyle bir kuarkı serbest bırakmayı başarabilirseniz, bu enerjinin bir kısmı kendisini başka

kuark ve karşıt kuarklara dönüştürecektir. Yeni karşıt kuarklardan biri, serbest kalmak üzere olan kuarkı saracaktır ve siz de ölçme aletinizde serbest bir kuark değil bir pion göreceksiniz. Siz kuarkı protondan kurtardınız, ama o, sizin onu tek görme arzunuza karşı gelerek, bir karşıt kuarkla arkadaş oldu.

Feynman Şemaları

Fiziğe olan müthiş katkılarının* yanı sıra zekâsı ve yazılarıyla da ünlü olan Amerikalı fizikçi Richard Feynman, atomun içindeki dünyadaki olayları şemalandırma yöntemini icat ederek, orada neler olduğunu gözümüzde canlandırmamız için bize büyük bir yardımcı kazandırmıştır.



Richard Feynman (1918-1988). Los Alamos yaka fotoğrafı 1943. fotoğraf Los Alamos Ulusal Laboratuarı ve AIP Emilio Segrè Görsel Arşivi.

Richard Feynman (1918-1988). Los Alamos yaka fotoğrafı 1943. fotoğraf Los Alamos Ulusal Laboratuarı ve AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

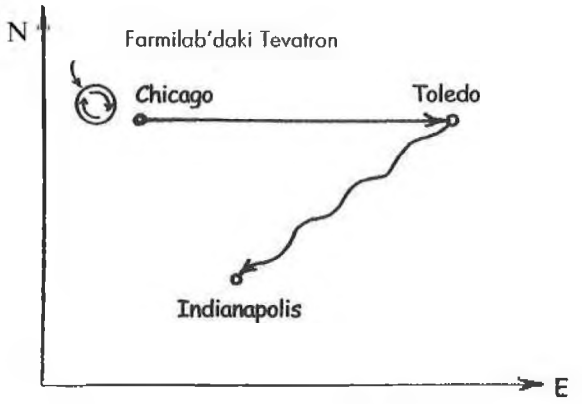
"Feynman şemaları" özellikle bir güç taşıyıcısının diğer iki parçacıkla dönüşürken, "gerçekten" ne olduğunu düşünme

* Bir keresinde Caltech'de konuşma yapma ayrıcalığına eriştiğimde, ön sırada oturan Feynman galiba uyuyordu. Konuşmamı bitirdiğimde, elini kaldırdı ve öyle akıllı bir soru sordu ki, ben çok şaşırdım. Cevabı bulmak için eve gidip uzun süre çalışmam gerekti.

şeklimizi, bunların arasındaki etkileşimi açıklayarak ortaya koyar. Elinde Feynman şemaları olan bir kuramsal fizikçi için bu şemalar, gözde canlandırmaya yaramaktan çok daha öte bir şeydir. Bu şemalar parçacıklar arasındaki olası reaksiyonları katalog haline getirme ve hatta pek çok reaksiyonun benzerliklerini hesaplama konusunda yol gösterirler. Ancak ben onları burada, güç taşıyıcılarının çalışmasıyla dönüşüm gücünün nasıl üretildiğini daha iyi görebilmeniz için, sadece görsel yardımcı olarak kullanacağım.

Bir Feynman şeması, minyatür bir uzay-zaman haritasıdır. Bu görüş üzerinde ilerleyecek olursak, gelin sade, sıradan bir haritayla, atlaslarda bulunan bir "yol haritası"yla başlayalım. Bu tür bir harita iki boyutludur, kuzeyi yukarıyı, doğusu sağı gösterir. Haritanın üzerindeki bir çizgi belirli bir yol izler, ya da bir matematikçinin deyimiyle yoldan geçerek rotanın zeminine izdüşümü yapar. Şekil 6'daki çizgiler Chicago Midway Havaalanından doğuya, Toledo'ya uçan bir uçağın yolunu; Toledo'dan Indianapolis'e güney batı yönünde giden bir otomobilin yolunu ve Fermilab'daki Tevatron'da daireler çizen bir protonu (yolu oldukça genişletmiş) göstermekte.

Çizgiler üzerindeki oklar hareketin olduğu yönü göstermekte. Eğer uçağın uçuş irtifasını ya da daireler çizen protonun içindeki mesafeyi bilmek isteseydik, haritaya "yukarı-aşağı"yı gösteren üçüncü bir boyut eklememiz gerekirdi. Bu durumda bile bu haritaya dayanarak, uçak, otomobil ya da

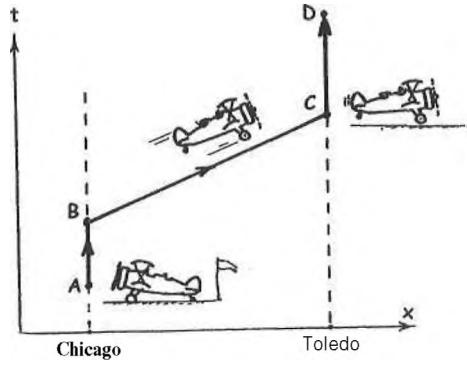


Şekil 6.
Yol Haritası

protonun *ne zaman* belirli bir noktada olacağım söyleyemezdik. Harita üzerindeki çizgiler sadece yoldan geçen rotaları gösteriyor. Yere zamanı da eklemek istersek dört boyuta ihtiyacımız olur. Bu, bizim görebilme gücümüzün ötesindeki uzay-zaman alemidir. (Görelilik konusunda çok deneyimli bir fizikçi bile dört boyutlu bir şeyi görme konusunda ortalama bir insandan farklı değildir).

Uzay-zaman haritasının iki boyutlu bir versiyonu, iki boyutlu bir yol atlası kadar kullanışlıdır. Şekil 7'de kısaltılmış bir uzay-zaman haritası gösterilmiştir. X ile gösterilen yatay eksen doğu-batı hattının uzunluğunu ölçer, t ile gösterilen dikey eksen ise zamanı ölçer. Eğer kıpırdamadan dururşanız, sıradan bir yol haritasında "rota"nız bir noktadır. Yani tam "oradasınız. Uzay-zaman haritasında ise bu durum geçerli değil, çünkü zaman ilerledikçe biz karşı konulamayacak bir şekilde ilerliyoruz. Bu nedenle Chicago'da pistte duran uçak, kalkıştan önce dik bir hat izler (şemada AB ile gösterilmiştir). Yerdeki pozisyonu sabittir, ama zamandaki pozisyonu değil. Daha sonra uçak kalkar ve Toledo'ya yaklaşık olarak aynı hızda uçar. Uzay-zaman rotasında (şemada BC ile gösterilmiştir), sağa doğru yukarıya meyilli bir çizgi görüyor musunuz? Çizgi sağa doğru gider çünkü uçak bu yöne doğru uçmaktadır. Çizgi yukarıya doğru gider, çünkü zaman geçmektedir.

Eğer uçak daha yavaş uçsaydı, rotası dikeye daha yakın



Şekil 7 -
Uzay Zaman Haritası

olurdu (gösterilen dikey çizgide hiç hareket yoktur). Eğer uçak daha hızlı uçsaydı, rotası yataya daha yakın olurdu (aynı mesafeyi daha az sürede geçerek). Sonunda uçak Toledo'ya iner ve park eder. Böylece uzay-zaman rotası yine dik bir çizgi olur. (şekilde CD ile gösterilmiştir).

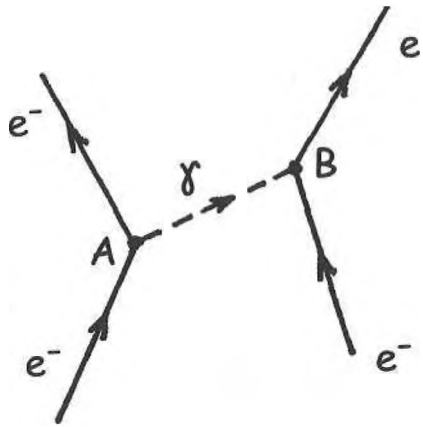
Uçağın uzay-zaman rotası olan ABCD'ye *dünya çizgisi* denir. Bu çizginin hareket etmediğini unutmayalım. O sadece "orada", tıpkı sıradan bir haritadaki bir çizgi gibi. Bu çizgi uzay ve zamanda yolculuğun tarihçesidir. (Tabii, tahmin edersiniz ki sadece bilinen herhangi bir zamandan sadece bu zamana kadar olduğu için dünya çizgisi "gelişiyor". Aynı şekilde, eğer seyahat ederken rotanızı bir yer haritasından takip etseydiniz, rotanın ileride nereye yöneleceğini bilmeden, sadece başlangıç noktanızdan geldiğiniz yere kadar olan rotanızı izlemiş olurdunuz. Böylece bir uzay-zaman haritası bize, bir "şeyin" -bir uçak, otomobil, ya da atom içi parçacığı- yerini ve zamanını söyler. Bir uçak ya da otomobilde, dünya çizgisinin açıkladığından daha çok olay oluyor olabilir; bir hostes yemek ikram ediyor ya da arka koltukta oturan çocuklar oynuyor olabilir. Ancak, temel parçacıklarda hiçbir gizli aktivite yoktur. Dünya çizgisinin her bir parçası bilinmesi gereken her şeyi açıklar. Ama bir parçadan diğer parçaya geçilirken etkileşimin olduğu bir noktada, işler değişir.

Görelilik kuramında bir "olay" belirli bir uzay-zaman noktasında olan şeydir, yani uzayda belirli bir noktada ve belirli bir anda olur. Şekil 7'deki B ve C noktaları olayları temsil ediyor (yaklaşık olarak). B'de bir şey oluyor: Uçak hareket etmeye başlıyor ve kalkıyor. C'de de bir şey oluyor: uçak iniyor ve duruyor. Bu uçak "olayları"ndan hiçbiri tabii ki uzayda belirli bir noktada ya da anda olmuyor, ama fikri tarif ediyor. Parçacık dünyasında olayların, uzaya ve zamana yayılmadan, belirli uzay-zaman noktalarında gerçekleştiği görülür. Aslında deneyler şunu gösterir: atomun içindeki dünyada olan her şey, eninde sonunda gerçekleşecek olan uzay-zaman noktasındaki küçük patlamalar nedeniyle olur, üstelik bunun sonucunda hiçbir şey hayatta kalmaz. Bu noktaya ge-

lecek olan şey, bu noktadan gidecek olandan farklıdır.

Parçacıklarla ilgili uzay-zaman şemalarına dönmeden önce, uçağın dünya çizgisindeki bir özelliğine daha bakalım. Şekil 7'de bu çizgi oklarla gösterilmiş. Bu gereksiz değil mi? Zaten uçağın A ve B noktaları arasında "hareket" halinde olabileceği tek yön var: yukarı, çünkü bu zamanın ilerlediği yön. Bir uçak sadece bir bilim kurgu filminde zamanda geriye gidebilir. Öyleyse bu oklar niçin kullanılıyor? Çünkü bu görüşleri parçacıklar için kullandığımızda bu oklara ihtiyacımız var. Atomun içindeki parçacıkların yaşadığı dünya bazen bilim kurguya benzeyen bir bilim tarafından yönetiliyor. Parçacıklar, aslında, zamanda geriye gidebilir ve bunu sürekli olarak, etkileşim dansını başarıyla yaparken gerçekleştirir. Parçacıkların zamanda geriye doğru hareket ettiğini ileri süren kişi Feynman'ın öğretmeni John Wheeler'dı; Feynman bu görüşü kendi adını taşıyan bir şemaya dönüştürdü.

Şekil 8-12'de parçacık süreçleriyle ilgili olan Feynman şemalarından bazı örnekler görülmekte. Her çizimde zaman aşağıdan yukarıya doğrudur. Bir cetveli bir şemanın altına yatay olarak koyduğunuzu ve zamanın geçtiğini göstermek için yukarıya doğru hareket ettirdiğinizi düşünün. Örneğin Şekil 8'de birbirlerine yaklaşan iki elektron görüyorsunuz. Ve sonra, etkileşimleri bittiğinde, birbirlerinden uzaklaştıklarını görüyorsu-



Şekil 8
Elektron-elektron yayılımı.

nuz. Buna elektron *yayılımı* denir ve şöyle ifade edilir:

e~ + e"i? e~ + er.

Şema sayısız seçenek içinden sadece en basitini gösteriyor ama bu şemadaki olayın gerçekleştiğinden kesinlikle eminiz.

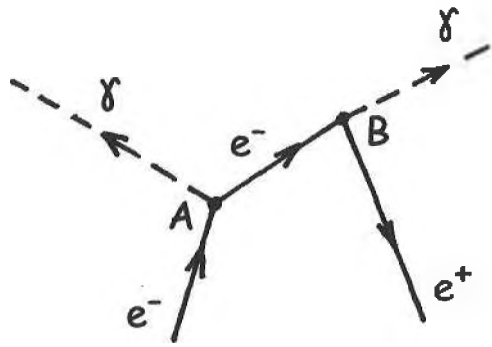
A noktasında, bir elektron bir foton (bir gamma ışını) gönderiyor ve B noktasında bu foton diğer elektron tarafından yutuluyor. Bir foton alışverişi yapılmış ve bunun sonucunda elektronlar hız ve yön değiştirmiş oluyor. İşte bu, elektromanyetik etkileşimin işleyiş şeklidir.

Bu şemada, diğer bütün Feynman şemalannda da görülen, biri açık diğeri pek açık olmayan iki özellik var. Açık olan A ve B etkileşim noktalarında üç parçacık çizgisinin birleştiğidir. A ve B gibi noktalara *doruk* denir, buradaki durumda ise bu noktalara, üç uçlu doruk denir. Etkileşimin gerçekleştiği yer, uzay-zaman noktasıdır. Diğer şemalara da göz atarsanız, onların da üç uçlu dorukları olduğunu görürsünüz. Üstelik bunlar iki fermion çizgisi ile bir bozon çizgisinin birleştiği özel türde doruklardır. Bu şemalardaki fermionlar ya lepton ya da kuarktır, bozonlar da (foton, W bozonu, ya da gluon) güç taşıyıcılarıdır. İşte fizikçilerin artık gerçek olduğuna inandıkları şaşırtıcı bir genelleme: Dünyadaki her etkileşim, bozonların (güç taşıyıcılarının) leptonlar ve kuarklar tarafından uzay-zaman noktalarında yayılımı ve emilimiyle sonuçlanır. Üç uçlu doruk her etkileşimin tam kalbindedir.

Şekil 8'de pek açık olmayan özellik ise, her parçacığın ya yok edildiği ya da yaratıldığı etkileşim olayının gerçek bir felaket olduğudur. A noktasında, gelen elektron yok edilir, bir de *yeni* elektron yaratılır.

Şekilde, yukarı sola doğru uçan elektronun, sol alttan şemaya giren elektronla aynı olduğu söylenemez. *Benzerdirler,* çünkü her ikisi de elektrondur, ama ayrılanla varanın *aynı* olduğunu söylemek anlamsız. Şekil 9-12'de, bir dorukta birbirleriyle birleşen üç parçacık görüntüsü daha belirgindir.

Şekil 9'da gösterilen bir elektronla karşıt parçacığının, yani pozitronun buluşma ve iki foton yaratmak üzere yok olma yönteminin süreci şöyle ifade edilir:



Şekil 9.
Elektron-pozitron yok oluşu

$e' + e^* \rightarrow 2\gamma$.

Bir kez daha, iki etkileşim doruğu görülmektedir. Bunlar iki fermion çizgisi ile bir bozon çizgisinin buluştuğu A ve B noktalarıdır. A'ya gelen elektron bir foton yayar ve yeni bir elektron yaratır, bu B'ye uçar, buraya gelen bir pozitronla karşılaşır ve bir başka foton yaratır. Bu sürecin zaman içindeki ilerleyişini hayal etmek için, yine yatay duran bir cetveli, *okları dikkate almayarak,* yukarı doğru yavaşça hareket ettirdiğinizi varsayın. Doğal olarak sorabilirsiniz: Niçin okları dikkate almıyorum? Çünkü onlar etikettir. Amaçları çizginin parçacığa mı yoksa karşıt parçacığa mı ait olduğunu göstermektir. Bu nedenle, sağdaki çizgi üzerindeki aşağı yöne doğru olan ok zamanda ilerleyen, yani şekilde yukarı doğru olan, bir pozitronu temsil ediyor. Ancak (işte tam burada Wheeler-Feynman görüşü devreye giriyor), zamanda ilerleyen bir pozitron, zamanda geriye doğru giden bir elektrona eşittir.

Bu nedenle bu şema gözle görülenden daha farklı bir şekilde de yorumlanabilir. Soldan gelen bir elektron, zamanda ilerleyerek A ve B'de foton yayıyor ve zaman içindeki yönünü ters çeviriyor. Garip ama gerçek. Wheeler ve Feynman, zamanda ileri giden pozitron ile zamanda geriye doğru giden elektron tanımlarının her ikisinin de "doğru" olduğunu göstermiştir, çünkü bunlar matematiksel olarak eşittir ve bunla-

rm ayırt edilmesi olanaksızdır. Yine de bu düşünceye karşı olabilirsiniz, çünkü sizin ve benim zamanda ileri ya da geri gitmek gibi bir şansımız yok. Biz karşı konulmaz bir şekilde ileriye doğru hareket ediyoruz, tıpkı şemanın üzerinde yatay duran cetveli yukarıya doğru kaydırdığımız gibi. Şekil 9'da yolunun üzerindeki bir elektronla çarpışmadan önce sola doğru hareket eden bir pozitron *görüyoruz.* Kuvantum dünyasıyla ilgili bilgilendirilmiş olmamıza rağmen, gördüğümüz şeylerin elektronun zamanda geriye doğru gitmesi ve zaman ilerledikçe sağa doğru gitmesi şeklinde açıklanmasına inanmaya hazırız.

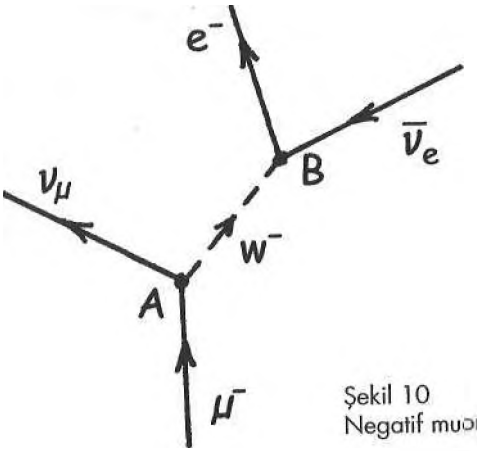
Negatif muonun dönüşümünü gösteren şekil 10'daki Feynman şeması, iş başındaki zayıf etkileşimin bir örneğidir ve şöyle ifade edilir:

j£ —» e~ + Vfl + Ve .

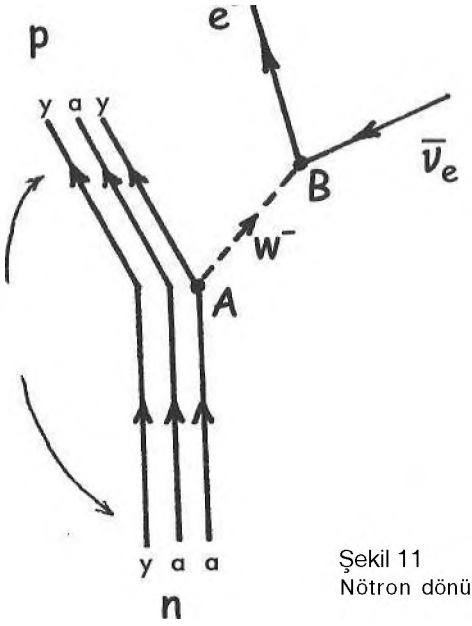
Burada W- bozonu bir dönüşüm parçacığı olarak ortalama bir rol oynar. Her dorukta korunum kanununun işbaşında olduğunu görebilirsiniz. A noktasına bir birimlik negatif yük gelir ve bir birimlik negatif yük bu noktadan gider; muon çeşnili bir parçacık gelir (muonun kendisi) ve biri gider (muon nötrinosu). B noktasında yük yine korunur, ayrıca elektron çeşnisi de korunur (sıfır öncesi ve sıfır sonrası) çünkü yaratılan elektron ve yaratılan karşıt nötrinonun elektron çeşni sayıları sırasıyla +1 ve -1'dir. Okların gösterdiği ve bizim yukarıda anlatılanlardan çıkardığımız sonuca göre, B zirvesine de, zamanda ileriye doğru giden elektron olmak için bir W- parçacığı yutarak, zamanda geriye doğru giden, bir nötrinonun bulunduğu bir nokta olarak bakabiliriz.

Şekil 10'da gösterilen muon dönüşümüne aslında beta bozunum süreci diyebiliriz çünkü bir elektron, tıpkı radyoaktif çekirdekteki beta dönüşümünde olduğu gibi, yaratılır ve yayılır. Şekil 11 benzer süreci olan nötron dönüşümünün resmidir ve şöyle ifade edilir:

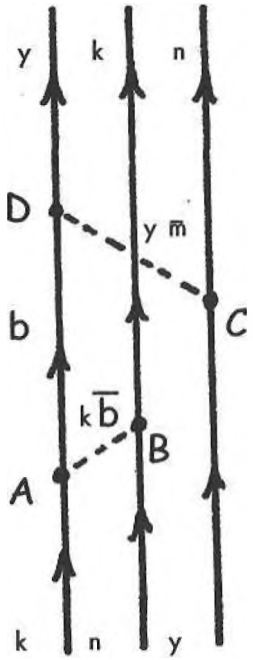
n —» p + e" + *vl.*



Şekil 10
Negatif muon dönüşümü



Şekil 11
Nötron dönüşümü



Şekil 12. Kuarklarla gluonların değişimi-"Renkli" kuarklar

Gördüğünüz gibi şekil 10 ve 11 birbirlerine çok benziyor. Birinde, negatif bir muon zayıf etkileşim ile bir muon nötrinosuna dönüşüyor. Diğerinde, bir aşağı kuark yine zayıf etkileşimle bir yukarı kuarka dönüşüyor. Dönüşüm olayında güçlü etkileşim rol almıyor; ama başlangıçtaki nötron ve finaldeki protonda üç kuarkı bir arada tutuyor.

Son olarak, şekil 12, şematik olarak, gluon değişiminin üç kuark (bir proton ya da bir nötrondan oluşan) arasında nasıl gerçekleştiğini gösteriyor. Bu defa bu üç kuarkı, renk yüklerinin baş harfleriyle gösteriyoruz: kırmızı için *k,* yeşil için *y* ve mavi için *m.* Etkileşim sürerken çizginin "yukarı" ya da "aşağı" oluşu değişmez. Bu nedenle, soldaki çizgide gösterilen kırmızı, mavi ve yeşil arasında dolaşan kuark, ya daima yukarı kuark ya da daima aşağı kuark olarak kalır.

Şemada dört tane etkileşim doruğu örneği gösterilmiştir (bunlardan her biri iki fermion çizgisiyle bir bozon çizgisinin buluştuğu üç uçlu doruktur). A'da, kırmızı kuark, bir kırmızı-karşıt mavi gluonu (km ile gösterilmiştir) yayarak bir mavi kuarka dönüşür. Daha sonra D'de, bu mavi kuark, bir yeşil kuark olmak için bir yeşil-karşıt mavi gluon yutar. B'de, bir mavi kuark, bir kırmızı kuark olmak için A'dan gönderilen kırmızı-karşıt mavi gluonu yayar. C'de ise, bir yeşil kuark, bir mavi kuark olmak için bir yeşil-karşıt mavi gluon yayar. Bu yayma, yutma ve renk değiştirme dansının basit bir protonun içinde bir saniyede milyarlarca kez olduğunu hayal gücünüzü zorlayarak düşünün. Birbirlerinden uzaklaşan parçacıkları, doğası gereği daha kuvvetli bir şekilde birbirlerine doğru çeken büyük kuvvet yüzünden kuarklar, deneseler bile özgürlüklerine kavuşamazlar. Bu şekilde dansetmeyi sonsuza kadar sürdürürler.

5. bölüm

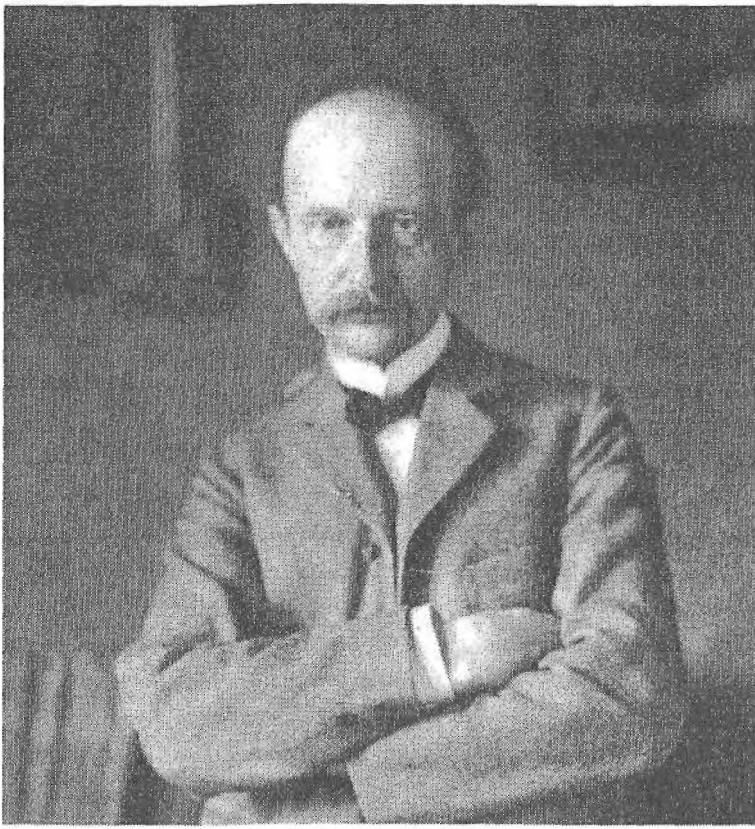
Kuvantum Kümeleri

Max Planck devrimci olmak için yola çıkmadı. 1900 yılının Aralık ayında Berlin'deki Prusya Akademisinde radyasyon teorisini açıkladığında ve şimdi ünlü olan *h* sabit sayısını tanıttığında, katı bir yüzeyde küçük bir çatlak oluşturur gibi, klasik teoriye renk katacağını düşünmüştü. (Bunu izleyen yıllarda onun başlattığı kuvantum devrimi hız kazandığında, o bununla ilgilenmedi. Başlattığı şeyi benimseyemedi.)

Elektromanyetizma ve termodinamik teorileri birbirlerine karıştırıldığında, Planck, ortaya çıkan bir problemi çözmeye uğraşıyordu. Elektromanyetizma, elektrik ve manyetizmayla olduğu kadar, ışıkla da (ve diğer radyasyonla da) ilgilidir. Termodinamik ise sıcaklık ve kompleks sistemler içindeki enerji akışı ve dağıtımıyla ilgilidir. On dokuzuncu yüzyıl fiziğinin temel taşları olan bu iki teori, belirli bir sıcaklıktaki kapalı bir yerin içindeki radyasyonu yani "boşluk radyasyonumu açıklayabilecek durumda değildi.

Planck ve aynı dönemdeki fizikçiler herhangi bir sıcaklıktaki herhangi bir nesnenin radyasyon yaydığını biliyordu. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, yayılan radyasyon o kadar *yoğun* ve bu radyasyonun *frekansı* o kadar yüksek olur. Bu kurallar biraz karışık gibi gözükse de, sıradan tecrübeler bunları doğrular.

Düşük sıcaklıktaki bir ortamda, elektrikli sobanın ısıtma elementi, çoğunlukla kızılötesi frekanslarında radyasyon yayar, elinizi bu elementin üzerine doğru tuttuğunuzda, bu radyasyonu ısı olarak algılarsınız. Yüksek sıcaklıktaki bir ortamda, ısıtma aracı daha yoğun radyasyon yayar ve artık bu rad-

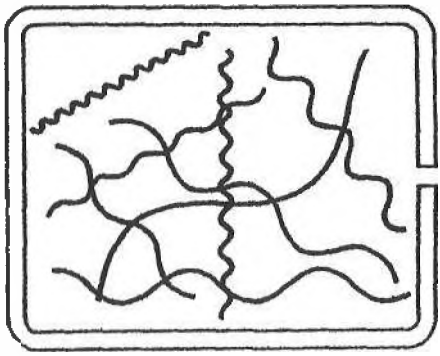


Max Planck (1958-1947). Fotoğraf R. Dühskopp; AIP
Emilio Segre Görsel Arşivi, W.F. Meggers Nobel Ödülü Alanlar Galerisi.

yasyonun bir kısmı, düşük frekanslı kızıl ötesinden daha yüksek frekanslı görülebilir hararetli kırmızı ışığa dönmüştür. Soğuk bir ortamdaki radyasyon, daha az bilinen bir şeydir, ancak Kuzey Kutbundaki buzul tepeleri bile radyasyon yayar.

Bunu, ısıtma aracından çok daha az yoğunlukta ve daha düşük frekansta, ama dünyanın enerjisin tekrar uzaya gönderebilecek yeterlilikte yaparlar.

Bir "boşluk" içinde (örneğin salonunuz) farklı frekanslardaki radyasyon, iç duvarlar tarafından yayılarak ve yutularak sıçramalar yapar. Planck'in çalışmasından önce bilim insan-

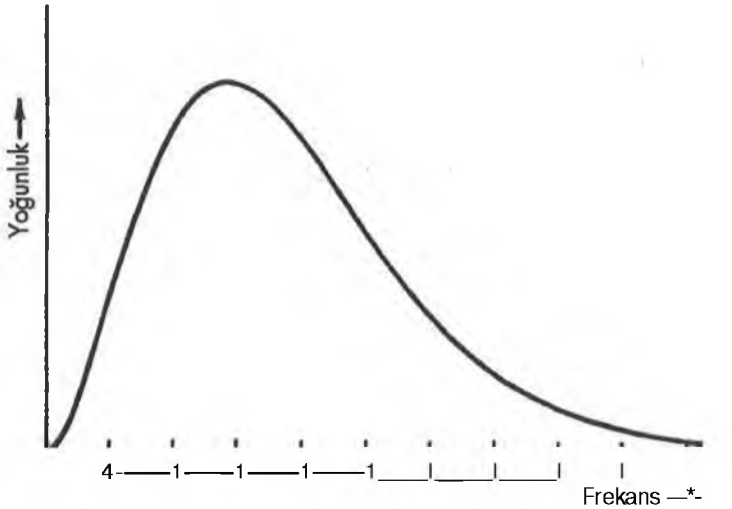


Şekil 13.
Boşluktaki farklı frekanslar

lan bu radyasyonla ilgili önemli bir gerçeği öğrenmişlerdi: radyasyonun özellikleri kendini meydana getiren materyallere değil, sadece etrafındaki duvarların sıcaklığına bağlıdır. Bu şaşırtıcı basitliğe rağmen, yoğunluğun farklı frekanslarda nasıl dağıldığının açıklanabilmesi tüm çabalara rağmen mümkün olmadı.

1900 yılının Ekim ayında Planck, radyasyon enerjisinin boşlukta dağılımı konusuna gerçekten şaşırtıcı şekilde uyan bir formül bulmuştu. Ancak bu formül kuramsal temellere dayanmıyordu. Fizikçilerin deyimiyle "boşluk dolduruyordu". Planck, çok işe yarayan bu formülün doğru olması gerektiğini düşünüyordu -ama bu formül niçin işe yarıyordu? Atomlarla moleküllerin radyasyonla etkileşimde olduğu bu durumu açıklayacak katmanda neler oluyordu? İşe koyuldu. Sonradan şöyle demişti: "Hayatımın en yoğun çalışma döneminden birkaç hafta sonra karanlık bitti ve yeni ve hayal edilemeyecek yeni bir görüntü aydınlanmaya başladı." Boşluk radyasyonun gözlemlenen özelliklerini, titreşen bir yükün radyasyonu bir yangın hortumundaki su gibi düzenli olarak yaymadığını; bunun yerine, bir beysbol aracındaki beysbol topları gibi yığınlar halinde yaydığını varsayarak açıkladı. Bu yığınlara "kuvanta" adını verdi. Böylece kuvantum teorisi doğdu.

Planck, özellikle titreşen bir yükün yayabildiği asgari enerji miktarı, titreşimin frekansıyla doğru orantılıdır diye varsaymak zorundaydı; böylece iki kat frekans demek iki kat



Şekil 14. Boşluk radyasyonunun yoğunluğu

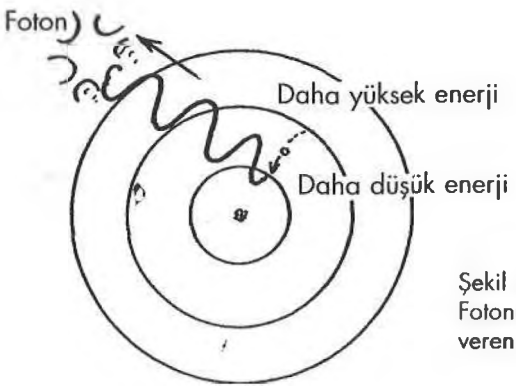
asgari enerji, üç kat frekans, üç kat asgari enerji demekti. Oranın değişmezliği basit bir denklemle gösterilebilir. Formül şöyledir:

$E = hf.$

E enerji miktarı,/frekans, h ise bugün Planck'in sabit sayısı dediğimiz orantısallığın katsayısıdır. Planck h'nin sayısal değerini eldeki verilere uydurarak bulmuştu. Bulduğu sayı bugün doğrusunu bildiğimiz sayıdan sadece yüzde birkaç farklıydı.

Bu formülü 3. bölümde bir fotonun enerjisi olarak görmüştünüz. Bu 1905'te Einstein'ın yorumuydu. Bundan beş yıl önce ise bu formül, Planck tarafından sadece titreşen bir yükün radyasyon enerjisi tarafından nasıl yayıldığını açıklamak için kullanılmıştı.

Planck, radyasyon enerjisinin kendine ait bir miktarı (yığını) olduğunu önermemiştir; sadece enerjinin büyük miktarların içine eklendiğini söylemiştir. Bu tıpkı bir yüzme havuzuna bir kova su ya da iki, üç veya herhangi bir sayıda kova dolusu su eklemek gibidir, ama bir kovadan daha az miktar-

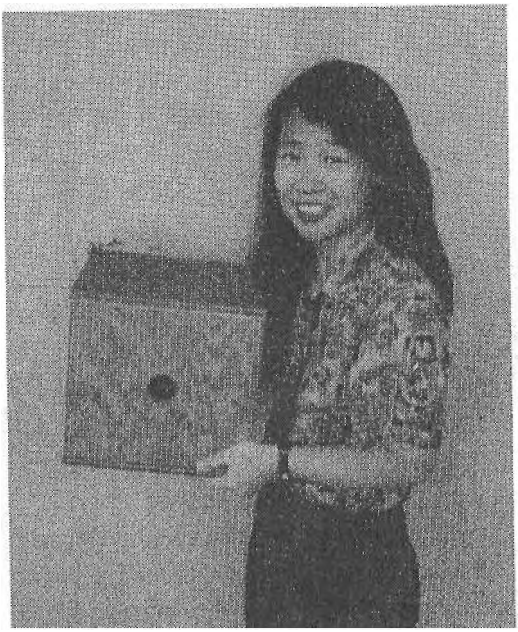


Şekil 15.
Fotonun frekansına karar veren enerji yükü.

da olmamak kaydıyla. Yine de havuzdaki su istediğiniz miktarlara bölünebilir, kova ölçüsü kullanmanız gerekmez (foton öncesi durumun açıklanması).

Planck, tıpkı bir banco (bir çeşit telli saz) tarafından yayılan sesin frekansının banco telinin titreşiminin frekansıyla aynı olması gibi, yayılımı yapan yükün titreşim frekansının, yayılan radyasyonun frekansıyla aynı olduğu yorumunu yapan klasik düşünceyi hiç sorgulamadan kabul etmiştir. (Einstein aynı tahmini incelediği fotonlar için yapmıştır). 1913'de Niels Bohr miktarla ilgili görüşleri hidrojen atomuna uygulayana kadar, yayılan radyasyonun frekansına yaydım sistemi içindeki *enerji yükünün* karar verdiği bilinmiyordu. Bohr'a göre bir elektron ışık yaymadan önce belirli bir frekansta, ışığı yaydıktan sonra ise bu elektron frekanslarından birisi olmayan, yayılan ışığın frekansı ile titreşiyor olabilirdi. Planck'in formülü, bu değişen görüşle de hayatta kalmayı başardı, ama yine farklı bir yorumla. Bohr'a göre $E = hf$ formülündeki E madde sisteminin enerji değişimi ve/ise maddenin titreşim frekansı değil yayılan radyasyonun frekansıdır. (Bohr, 1913'de Einstein'm fotonunu pek kabul etmemişti; bu nedenle bu konuyu tartışmadı. Ama bugün diyebiliriz ki, madde sistemindeki enerji E kaybı yaratılan fotondan kazanılan enerjiye eşittir.)

Boşluk radyasyonu çoğunlukla *kara-vücut radyasyonu* diye adlandırılır. İdeal bir "kara vücut", ona çarpan tüm rad-





Kutunun beyaz olan iç kısmı kenarındaki delikten bakılınca siyah gözükür çünkü içeri giren ışığın neredeyse tamamı emilir ve bir daha bu ışık dışarı çıkmaz. Kutuda boşluk radyasyonu vardır.

Foto: Robert Douglas Carey; Pearson Eğitimcilik ve Helen Yan arşivi.

yasyonu emendir. Böyle bir vücut, enerjiyi boşluk radyasyonunu tanımlayan yoğunluk ve frekans dağılımıyla aynı miktarda yayar. Bunun basit bir nedeni vardır. Bir boşluk içinde zıplayıp duran radyasyon sonunda tamamen emilir, bu nedenle boşluğun içi "kara"dır (beyaza boyalı olsa bile!). Rengi siyah olmaktan çok uzak olsa da, güneşin yüzeyi bir kara vücut olmaya çok uygundur. John Wheeler 1968'de maddenin tamamıyla çökme durumu için "kara delik" terimini kullandığında, aklından onun kara vücutla olan benzerliği geçmişti. Kara vücut kendisine çarpan tüm radyasyonu yutar, ama ayrıca enerji de yayar. Bir kara delik ise kendisine çarpan her şeyi yutar (hem radyasyon hem de madde), ancak buna karşılık hiçbir şey yaymaz.*

Planck kuvantum fikrini ortaya attığı 1900 yılında, çoğu kuramsal fizikçinin en önemli çalışmasını yaptığı yaşın çok ötesinde, kırk iki yaşındaydı (3. Bölümde belirttiğim gibi Cari Anderson'a göre bunun için en ideal yaş yirmi altıdır). Çeyrek yüzyıl kadar sonra, 1924-1928 döneminde, kuvantum mekaniğinin tam teorisini geliştiren fizikçiler arasında, Planck'in devrimi başlattığı zamanda henüz doğmamış olanlar bile vardı. 1900'de Max Born, Niels Bohr ve Erwin Schrödinger onlu yaşlardaydı, Satyendra Nath Bose altı yaşındaydı, Wolfgang Pauli ise bebekti. Werner Heisenberg ve Enrico Fermi 1901'de, Paul Dirac ise 1902'de doğdu. Kuvantum mekaniğinin (atomun içindeki dünyanın) teorisi, 1920'lerin ortalarında çoğu genç olan bu insanlar tarafından "yaratıldı" ya da "tamamlandı". Bir bakıma bu doğru, ama hâlâ gizemini koruyan şeyler var. Çoğu fizikçi kuvantum mekaniğini hâlâ gelişen bir konu olarak görür. Böyle görmelerinin nedeni, kuvantum mekaniğinin yanlış yorum yapması, kuarklar gibi parçacıklarla, renk gibi kavramlarla başa çıkamaması, ya da trilyon-voltluk enerjiler değildir. Tek nedeni, bu teorinin belli bir mantığının olmayışıdır. John Wheeler,

* Kara delik hemen hemen hiçbir şey yaymaz. İngiliz kuramsal fizikçisi Stephan Hawking kara deliklerin artık, az miktarda ışıma yaptığını keşfetti. Sebep? Gizli bir kuvantum etkisi. 10. Bölüme bakınız.

"Kuvantum da neymiş?" diye sorar. Bir rivayete göre Niels Bohr, "kuvantumu düşündüğünüzde başınız dönmüyorsa onu anlamamışsınız demektir," demiştir.

Ve kuvantum mekaniğini en az herkes kadar iyi anlamış olan atılgan ve parlak Amerikalı fizikçi Richard Feynman, "Onu öğrencilerim de anlamıyor, Bunun nedeni benim de anlayamamam"* diye yazmıştır.Birçok fizikçi, kuvantum mekaniklerinin, zekâsının keşfedilmesini beklediğine inanıyor.

Zamanın sınavından geçip, Berlin'de Aralık 1900'dan günümüze kadar ayakta kalmayı başaran tek şey Planck'in sabit sayısıdır. Bu sayı, kuvantum teorisinin temel katsayısı olması yanında, yayılan enerjiyi yayılan frekansa bağlayarak orijinal rolünün çok ötesine geçmiştir. Daha önce de belirttiğim gibi, bu sayı atomun içindeki dünyadaki ölçüleri düzenler ve atomun içindeki dünyayı bizim yaşadığımız "klasik" dünyadan ayırır.

Kitabın bu bölümü şu ana kadar sadece bir tanesini açıkladığım kuvantum yığınlarıyla ilgili: yayılan enerjinin yığınının (ya da miktarının) foton diye bilinen yayılan enerjinin yığınına (ya da parçacığına) dönüşmesi.

Doğada iki tür yığılma olur: *varlıkların* taneciklerinin oluşturduğu ve bu varlıkların belli *özelliklerinin* tanecikleri-nin (farklılıklarının) oluşturduğu. Bir madde parçasının sayısız miktarda bölünemeyeceğini herkes bilir. Eğer yeterince bölerseniz, atoma ulaşırsınız ("atom" sözcüğü özgün şeklinde "bölünemeyen" anlamında kullanılmıştı) ve eğer atomları bölerseniz, elektronlara ve atom çekirdeklerine ve son olarak da kuarklara ve gluonlara ulaşırsınız. Bu, bölerek gidebildiğimiz en son noktadır. Elektronların ve kuarkların ölçüsünü ve yapısını bilmiyoruz. Şöyle sorabilirsiniz: "Bunun nedeni daha derine gitmeyi henüz öğrenememiş olmamız mı? Neden dünyaların içindeki dünyaların içinde dünyalar olmasın?" Bilim insanlarının, "gerçeklerin bilinmesinin temelinde, açığa

* Richard, Feynman, QED (Princeton N.J.: Princeton University Pres, 1985), sayfa 9.

çıkarılması gereken pek çok katman var ve biz bu temele henüz ulaştık ya da ulaşmak üzereyiz," diye inanmalarının pek çok nedeni var.

Nedenlerden biri, temel bir parçacığı tam olarak tanımlamak için birkaç ölçünün yeterli olmasıdır. Örneğin bir elektron, kütlesi, yükü, çeşnisi, dönüşü ve zayıf etkileşimde güç taşıyıcısı olan bozonlarla girdiği etkileşimin gücü ile tanımlanır, hepsi bu kadar. Fizikçiler, "eğer elektronun hâlâ keşfedilmeyi bekleyen özellikleri varsa bunlar sadece birkaç tanedir", diye düşünerek rahatlarlar. Bu nedenle bir elektron hakkında bilinmesi gereken her şeyin tanımı için sadece kısa bir liste gereklidir. "Basit" bir çelik bilyeyi tam olarak tanımlamak için ise gerekli olan liste oldukça uzundur.

Normalde, bu bilyenin kütlesini, yarıçapını, yoğunluğunu, elastikiyetini, yüzey sürtünme katsayısını ve belki de birkaç özelliğini daha bilirsek, bilmemiz gereken her şeyi bildiğimizi söyleriz. Ancak bu özellikler, bilyeyi tam olarak tanımlamak için yeterli değildir. Eksiksiz tanım için, içeriğinde kaç tane demir atomu olduğunu, kaç tane karbon ve diğer pek çok elementin olduğunu, bu atomların nasıl dizildiğini, sayısız elektronun bu madde içindeki dağılımını, atomları hangi titreşim enerjilerinin titreştirdiğini ve daha birçok şeyi bilmemiz gerekir. Bu bilgiyi baştan sonra tanımlayan bir listede alt alta yazılmış milyarların ötesinde milyarlar kadar veri kaydı görürsünüz. Maddenin tanımı, katmanlarını soydukça daha basitleşiyormuş gibi görünür, ama temel parçacıklar için olan tanımlamadan çok daha basit bir şekle dönüşemez.

Maddenin gerçek merkezine yakın olduğumuza inanmamızın bir başka nedeni -tanımlamanın basitliğiyle yakından ilgili bir neden- parçacıkların *kimliğidir.* En mükemmel üretim standartlarında bile, iki bilyenin tam anlamıyla birbirinin aynı olması mümkün değildir. Yine de tüm elektronların, tüm kırmızı kuarkların vb. tamamıyla aynı olduğunu düşünmek için iyi bir nedenimiz var. Elektronların, Pauli'nin reddetme ilkesine uyması gerçeği (bu ilke, elektronların hiçbir çiftinin aynı hareketi halinde asla yapmayacağını söyler) eğer elekt-

ronlar aynı ise anlaşılabilir, ama eğer elektronlar herhangi bir şekilde birbirlerinden farklıysa anlaşılamaz. Eğer açığa çıkarılması gereken sayısız madde katmanı olsaydı, elektronların hiçbir çifti aynı olmayan ve her birinin tam olarak tanımlanması için çok geniş bir bilgi yığını gereken bilyeler kadar karışık bir yapıya sahip olmasını beklerdik. Ama böyle bir şeyin olması söz konusu değil. Temel parçacıkların basitliği ve kimliği, maddenin "gerçeğine" tam olarak ulaşmaya yakın olduğumuza inanmamız için çok iyi bir nedendir.

Şimdi varlıkların *özelliklerinin* çeşitliliğine dönelim.

Yük ve Dönüş

Size tanıttığım, ölçüsü olan maddelerden biri elektrik yüküdür. İncelenen bazı parçacıkların hiç yükü yoktur. Diğerleri ise protonun yükünün *e* tamsayüı bir çarpanı olan (pozitif ya da negatif) bir yük taşır. Dönüş de başka bir benzer özelliktir. Yükü ya sıfırdır ya da açısal momentum birimi (l-r2)/£ olan elektron dönüşünün tanısaydı bir çarpanıdır. Bileşik parçacıkların da dahil olduğu parçacıkların e ve (1~2).# birimlerinin çarpanları 0,1 ya da 2'dir, ancak etrafımızda gördüğümüz nesnelerin yükleri, e'den ve açısal momentumları (l-f-2)^'den çok daha büyüktür. Yığın, ya da miktar, varlığın kabul edilen değerleri arasındaki farkın sınırlı sayıda olması demektir. Bu, mümkün olan değerler için sadece bir sonlu sayı olduğu anlamına gelmez. 2, 4, 6 gibi çift sayıların sınırlı bölümü olduğu halde, bu sayılar sonsuza kadar gidebilir, yüklerin ve dönüşlerin sınırlı bölümü, ama sonsuz sayıda değeri vardır.

Belirli bir yük miktarının büyüklüğünü anlayamıyoruz. Parçacık dünyası standartları için bile oldukça küçük. Bu miktar, yüklü parçacıklar ile fotonlar arasındaki etkileşimin gücünü gösterir. Bu etkileşim (elektromanyetik etkileşim), kuark -gluon etkileşiminden (anlaşılabilir olması için *güçlü*

etkileşim diyelim) yaklaşık yüz kat daha zayıftır*. Buna dayanarak, her iki etkileşim de zayıf etkileşime göre son derece güçlü olduğu halde, bu elektron yüküne küçük deriz. Ancak buradaki önemli nokta, yük kümesinin miktarının ölçülebilen bir miktar olmasıdır. Sahip olduğu değere niçin sahip olduğunu bilmiyoruz.

Benzer şekilde, *ti* miktarının büyüklüğü (dönüş kümelerinin büyüklüğüne hazırlar), kuramsal bir temele dayanmayan bir miktar ölçüsüdür. 1920'lerde geliştirilen kuvantum mekaniği teorisi, dönüş ve açısal momentum katsayısının varlığını açıklar, ama miktar birimi büyüklüğünü değil.

Bohr, 1913 yılındaki çalışmasında, açısal momentumların *Krim* tamsayü çarpanları olduğun varsaymıştı. Daha sonra kuvantum teorisi dönüşün kümelenmesiyle ilgili üç kural önerdi.

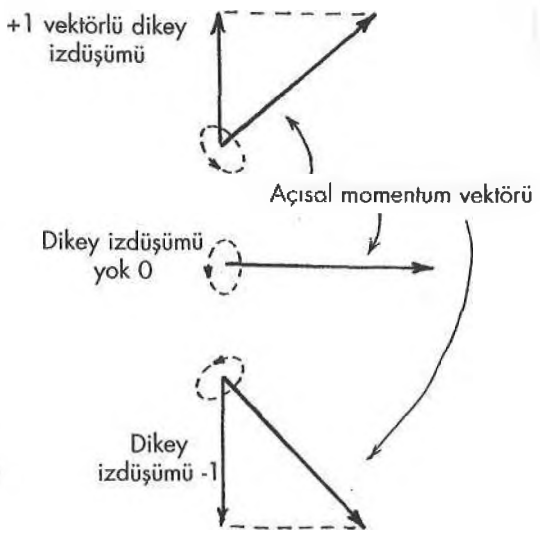
1. Fermionlar (leptonlar ve kuarklar gibi) *fi* birimleriyle 1-f2, 3-^2, 54-2, gibi ifade edilen yarım -tek tamsayü dönüşe sahipken bozonlar (fotonlar ve gluonlar gibi) 0, 1,2, gibi birimleri olan tamsayılı dönüşe sahiptir.

2. Yörüngesel açısal momentum her zaman ^'nin tamsayılı bir çarpanıdır. (0, 1,2 gibi).

3. Açısal momentum, ister dönüşe ait ister yörüngesel olsun, belirli yönleri gösterir ve seçilmiş bir eksen üzerindeki açısal momentumun izdüşümleri bir sonrakinden tam olarak *h* kadar (bir birim) farklıdır.

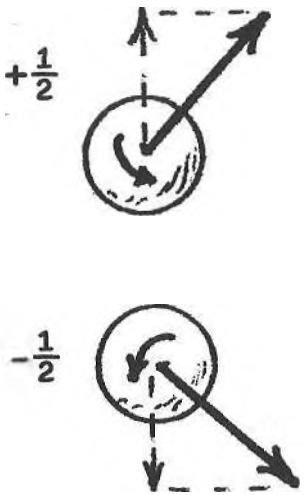
Üçüncü kural son derece ilginçtir. Dönüşün belirli bir yönü "gösterildiğini" söylediğimizde bu, dönüş *ekseni* bu yönü gösteriyor anlamına gelir. Örneğin dünya Kuzey Yıldızı yönünde dönüyor dersek, dünyanın ekseni bu yönü gösteriyor demektir. "İz düşümü" görünüşü Şekil 16'da gösterilmiştir. Oklar çeşitli

* Farklı etkileşimlerin güç oranlan tam olarak kryaslanamaz, çünkü farkta matematiksel şekiller vardır. Çok genel olarak, bu sanki bir odada gördüğünüz A kişisinden, B kişisine göre daha güçlü bir şekilde etkilenmeniz ama onlara yaklaşınca A'dan, B'ye göre sadece çok daha az farka etkilenmeniz gibidir. "Çekim gücünün oranı" tam olarak değil, yaklaşık olarak belirlenebilir.



Şekil 16.
Yörüngesel açısal momentumu 1 olan iz düşümleri.

yönleri gösteren açısal momentumu temsil ediyor. Okların ucundan eksene dik olarak çizilen çizgiler, bu eksen üzerindeki açısal momentumun izdüşümlerini gösteriyor. Bu biraz karışık olabilir, ama uygulamaları anlamak kolaydır. "Yöntemin miktarı" (Kural 3), belirli bir açısal momentum için sınırlı sayıda yönelme olabileceği anlamına gelir.



Şekil 17.
Dönüşü 1^-2 olan izdüşümleri

Örneğin, eğer belirli bir yörüngesel açısal momentum 1 ise üç tane yönelim ihtimali olduğundan bu açısal momentum "yukarı"yı, "aşağı"yı ya da bunların arasında ortak bir yeri gösterebilir. Bir elektronun ya da bir -yarım dönüşü olan başka bir parçacığın sadece iki yönelim ihtimali vardır; l-=-2'lik izdüşümlü "yukarı" ve -l-f-2'lik izdüşümlü "aşağı" yönelim, (kural 3'e göre iki izdüşümünün farkı 1 olmalıdır.)*

Renk Yükü

Renk yükü, elektrik yükü gibi miktar birimlidir; kümeler halindedir. 4. Bölüm'de açıkladığım gibi, bir kuarkın "rengi" kırmızı, yeşil ve mavi olarak kabul edilen üç renkten biri olabilir. Karşıt kuarkların renkleri ise karşıt kırmızı, karşıt yeşil ve karşıt mavidir.

Eğer iki kırmızı kuark birleşmek üzere olsalardı (pratikte olmaz), bu bileşik iki kırmızı birimli renk yüküne sahip olurdu. Üç kırmızı kuark birleşseydi, üç kırmızı birimli renk yüküne sahip olurdu vb. Aynı işaretli yükler için de aynı kural geçerlidir. İki elektron, toplam -2 birimlik, üç elektron, toplam -3 birimlik vb. yüke sahiptir. Rengin "iptal edilmesi" ise biraz daha karmaşıktır. Eşit pozitif ve negatif, yüklerin kombinasyonu sıfır olduğu için, kırmızı, yeşil ve mavi ya da karşıt kırmızı, karşıt yeşil ve karşıt maviden oluşan üç renkli kombinasyonlar renksiz bir varlık yaratır. Yani doğada gözlemlediğimiz her şey renksizdir. Bunun anlamı, geniş ölçekli dünyada kendini hissettirecek renk yığılması olmadığıdır. Tam tersine, ister saçımızı taradığımız tarak olsun, ister Dünya'ya şimşek çakması olarak ulaşacak bir fırtına bulutu olsun, elektrik yükü etrafımızda gördüğümüz yüklü renkleri üretmek için çok büyük miktarlarda kümelenebilir ve kümelenir.

* Belirli bir açısal momentumun mümkün olan yönelim sayısını gösteren bir matematik formülü var *(fi* birimi cinsinden). Açısal momentumu ikiye çarpıp bir ekleyin. Bir yarım dönüş için bu formül 2'yi 1 dönüş için 3'ü, 2 dönüş için 5'i verir.

Kütle

Her parçacığın kendi özel kütlesi olduğu için, bir bakıma en belirgin miktar kümesi kütledir. Aslında her bileşik varlık, örneğin atom çekirdeği ya da bir protein molekülü, kendine ait belirli bir kütleye (ve böylece sayısal miktarı olan bir kütleye) sahiptir. Ancak enerjinin kütleye olan katkısı nedeniyle, bir bileşik parçacığın kütlesi, kendini oluşturan parçacıkların kütlelerinin toplamına eşit değildir. Örneğin basit bir nötron, kendini oluşturan üç kuarkm (artı herhangi bir sayıda kütlesiz gluonun) kütlelerinin toplamından oldukça büyük bir kütleye sahiptir. Ya da, bir proton ve bir nötrondan oluşan bir deuteron (ağır hidrojenin çekirdeği) düşünün. Kütlesi kendini meydana getiren proton ve nötronun kütlesinden biraz daha *azdır.* Yine enerji yüzünden -ama bu defa kütleye negatif etkisi olan *bağlayıcı enerji* yüzünden. Bir deuteronu kendisini oluşturan parçacıklara ayırmak için ona, bağlayıcı enerjiyi dengelemeye yetecek miktarda enerji eklenmelidir. Yük ve açısal momenttim daha basittir. Bir nötrünün yükü (sıfır), kendisini oluşturan kuarkların yüklerinin toplamına eşittir.

Deuteronun dönüşü, kendisini oluşturan proton ve nötronun dönüşlerinin toplamı kadardır (büyüklük kadar yön de dikkate alınarak vektörler toplanır). Bütün parçacık kombinasyonları için durum aynıdır. Bileşik kütlelerinin toplanamayacağı gerçeği, en alt seviyedeki bileşik varlığın basit bir parçalar kombinasyonu *değil* tamamıyla yeni bir varlık olduğunu hatırlatır.

Eğer Ek B'deki Tablo B.l ve Tablo B.2'ye bakarsanız, temel parçacıkların kütlelerinde açıkça anlaşılmayan bir düzen göreceksiniz. Bilim insanları da bu düzeni henüz bulamadılar (bazı bileşik parçacıklar için bilinen yaklaşık bir düzen olduğu halde). Niçin bir muonun kütlesi bir elektronun kütlesinden iki yüz kat daha fazladır? Niçin zirve kuarkının kütlesi yukarı kuarktan yaklaşık elli bin kat fazladır? Cevabı kimse bilmiyor. Kütle'nin miktarı orada keşfedilmeyi bekliyor.

Enerji

Son olarak, fizik kavramları içinde en çok karşımıza çıkan kavram olan enerjiye gelelim. Enerjinin sayısal değeri kuvantum teorisinin başlangıç noktasıdır ve sonraki tüm adımlarda rol almıştır. Planck ve Einstein, enerjinin yayılımıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Bohr bu çalışmalara madde enerjisini eklemiştir. Bir *çizgi tayfı* (spektrum) oluşturmak için hidrojen atomu tarafından ışık yayıldığı çok uzun süredir biliniyordu. Bunun anlamı atomların sadece belirli frekanslarda ışıma yaptığıdır (bunlar çizgiler halindedir, çünkü frekansları çeşitlenmeden önce ışık dar bir delikten geçer), kuvantum öncesi günlerde bu hiç de şaşırtıcı değildi. Bu, bir armonika, obua ya da flütün içindeki havanın ya da piyano tuşları veya keman tellerinin yaptığı gibi, atomun içindeki yük sadece belirli frekanslarda titreşir diye yorumlanmıştı. Atomun gürültü değil müzik yaydığını düşünebilirsiniz.

Bohr'un çalışmaları sırasında, yeni bir açıklama isteyen iki gelişme, atomun çizgi tayfını daha zor anlaşılır bir hale getirmişti. Bu gelişmelerden ilki, Planck ve Einstein'ın enerji-frekans bağlantısıydı. Eğer atom sadece belirli frekanslarda yayılıyorduysa, sadece belirli miktarlarda enerji kaybediyor olmalıydı. İkinci gelişme ise, 1911'de Ernest Rutherford ve meslektaşlarının, atomun elektronlarla çevrili, merkezinde küçük bir çekirdeğin bulunduğu çoğunlukla boş bir alandan oluşan bir yapı olduğunu keşfetmeleriydi.

Klasik teori bu durumla başa çıkamadı. Bir hidrojen atomunun içindeki çekirdeği saran bir elektron, olabilecek en yüksek frekansta durmadan enerji yayarak ve çekirdeğe yaklaşık olarak saniyenin 10^{-8}'i kadar olan bir sürede girecek şekilde içeriye doğru bir sarmal yaptığı tahmininde bulundu. Ülkesi Danimarka'dan misafir araştırmacı olarak İngiltere Manchester'daki Rutherford'un laboratuvarına gelen yirmi altı yaşındaki Bohr, tamamıyla yeni fikirlere ihtiyaç duyulduğunu gördü. Bunun nedeni ise bir hidrojen atomunun içindeki



Niels Bohr (1885 - 1962), 1922 Fotoğraf AİP Emilio Segre Görsel Arşivi, W.F. Meggers Nobel Ödüllüler Galerisi.

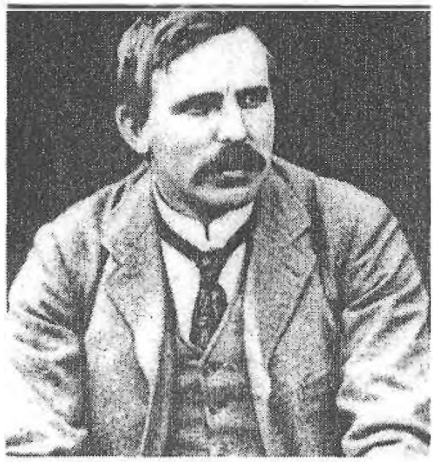
elektronun enerjisini kademeli ve sürekli olarak kaybedememesiydi. Önce bir süre *sabit durumda* var olmalıydı, ardından, artık daha fazla yayılamayacağı en temel seviyeye ulaşmadan önce, daha düşük enerji durumuna gelmek için bir *kuvantum sıçraması* yapmalıydı. Devrim niteliğindeki üç görüş birbirine bağlandı. Bohr'un açısal momentumun *fi* birimiyle sayısal hale dönüştürüldüğüyle ilgili görüşü dördüncü bir devrimsel görüş olarak bu listeye eklendiğinde, o hidrojen çizgi tayfında gözlemlenen frekansları nicel olarak açıklayabilmişti.

Bohr'un tanıttığı ve kullandığı başka bir görüş ise, miktarı oluşturan taneler (kümeler) orantısal küçülme olursa, kuvantum sonuçları klasik fiziğin sonuçlarına yakın olur diyen *uygunluk ilkesiydi.* Şimdi sizlere pek bilimsel gözükmeyen "orantısal küçülme" ve "yakın olmak" sözcüklerini açıklayayım. Hidrojen atomu için kullanılırsa, "orantısal küçülme" yakın ölçülü miktarlar arasındaki *kesirsel değişim* küçüktür

anlamına gelir. Eğer iki yakın durumun enerjileri ya da iki yakın durumun açısal momentumu; diyelim ki yüzde 1 oranında farklıysa, bunlann taneciklilığı orantısal olarak küçüktür diyebiliriz. Eğer yakın durumların enerjilerinin farkı yüzde birin yüzde biri kadar olursa, taneciklik orantısal olarak daha da küçük olur. Hidrojen atomu içindeki elektronun en düşük enerji oluşumlarında ise miktar düzeyleri orantısal olarak büyüktür. Klasik muhakeme burada, tamamıyla kaybeder. Ancak "heyecanlı" durumlar dediğimiz elektronun çekirdekten gitgide uzaklaşan daireler çizmesi durumunda, birinden diğerine doğru olan *oran değişimi* gitgide küçülür. Sonra klasik muhakeme yine geçerli olmaya başlar. Bu durumlarda kuvantum sonuçlarının klasik sonuçlara "yakın olduğunu" söylediğimizde, gerçekten de taneciklilik miktarı küçüldükçe (yüzdelik ifade şekliyle), kuvantum sonuçları ile klasik sonuçlar arasındaki fark da küçülüyor anlamına gelir. Daha sonra kuvantum sonuçları klasik sonuçlara "uygun" hale gelir.

Uygunluk ilkesi tam doğru değildir. Hatta bu ilke için belirsiz bile diyebiliriz. Ancak kuvantum teorisine sınırlama getirdiği için güçlü bir ilkedir. Klasik teorinin geçerli olduğu durumlara kuvantum teorisi uygulandığında, kuvantum sonuçlarının klasik sonuçları tekrarlamasını (yakın bir şekilde) ister. Bu sanki on şeritli bir otoyoldan bir dizi şehir sokağına geçmeye benzer. Trafik mühendisi trafiğin akışını, bir sistemden diğerine dereceli ve yumuşak bir şekilde geçecek şekilde düzenlemelidir. Mühendisin "uygunluk ilkesi", şerit sayısı azaldıkça yolun otoyol kurallarından şehir için trafik kurallarına uyması gerekliliğidir.

Bohr çalışmalarının taslağını danışmanı Rutherford'a (o zaman kırk bir yaşında) sorduğunda, ona bu çalışmasını yayınlamayı istemediğini çünkü çalışmada sadece hidrojen tayfını açıklayabildiğim, daha ağır başka herhangi bir elementin tayfını açıklayamadığını söylemişti. Rutherford ise ona bu çalışmayı yayınlamasını öğütlemiş ve rivayete göre, "eğer hidrojeni açıklayabilirsen, insanlar gerisine de inanacaktır," demiş.



Ernest Rutherford (1871-1937), 1906.
Foto: Otto Hans ve Lawrence Badash hediyesi, AIP Emilio Segrè Görsel Arşivi.

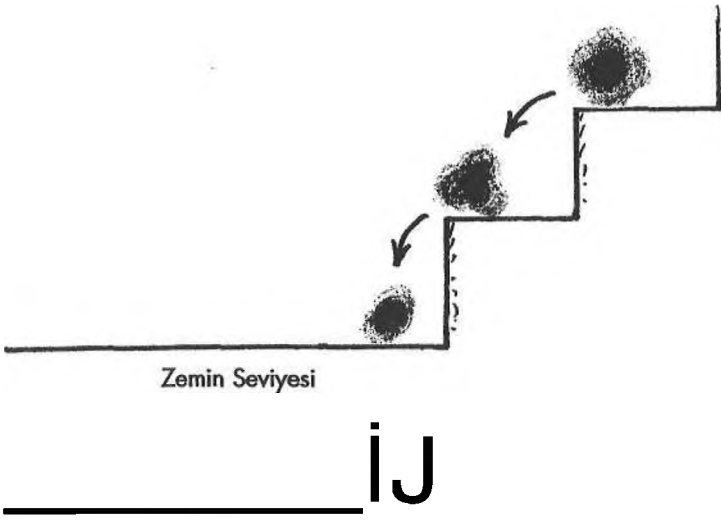
ce Badash hediyesi, AIP
Emilio Segre Görsel Arşivi.

Ancak Bohr'un çalışmasındaki bir şey Rutherford'u şaşırtmıştı*. Şöyle yazdı, "Anladığım kadarıyla elektronun nerede duracağım önceden bildiğini varsayıyorsun." Rutherford'un bu şaşkınlığının kuvantumun gizemi içinde haklı bir yere sahip olması, gelecek bölümün konusudur.

"Sabit durumda" olan bir elektron gerçekten sabit ya da hareketsiz değildir. Boş bir alandan yüksek hızla uzaklaşabilir, ama enerjisi ve açısal momentumu sabit değerlere sahiptir. Bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine, daha sonra daha da düşük bir enerji seviyesine geçen elektron, merdivenleri inerken her basamakta duran bir insana benzer. Bu insan bir basamaktan diğerine inerken potansiyel enerji kaybına uğrar, bekler, yine potansiyel enerji kaybeder ve bu durum en alt basamağın sonuna gelene kadar bu şekilde devam eder. Elektron da en alta kadar iner. Temel seviye dediğimiz en alt enerji seviyesi vardır. Ve bu temel seviye çıkartılamayan bir enerji olan *sıfır nokta enerjisine* sahiptir.

Elektron hâlâ büyük bir çabayla ve çok fazla kinetik ener-

* Laboratuvarında yüksek sesle şarkı söylemeyi seven Yeni Zelanda'lı büyük, boğuk sesli Rutherford'un, aklında canlandıramayacağı hiçbir matematik teorisine tahammülü yoktu. Bohr'un sabit durumları ve kuantum sıçramaları devrimsel olsa da Rutherfor'un testlerinden geçmişti.



Şekil 18. Daha düşük bir enerji seviyesine geçen elektron.

jiyle ilerlemeye çalışır, ancak kuvantum mekaniğinin kuralları daha düşük bir enerji seviyesi olmadığı için onu bu düşük enerjili seviyede, enerjisini hiç kaybetmeden korunmasını sağlayarak tutar. Bu, tıpkı merdiven basamaklarının en altına gelip de daha aşağıda gidebileceğiniz bir yer olmaması gibidir. Yeri kazmanız (böyle diyelim), yasaklanmıştır. Şu an zemin kattasınız. Prensipte, kullanabileceğiniz çok fazla ek enerjiniz olmasına rağmen, örneğin maden kuyusundan Dünya'nın merkezine doğru ilerlediğinizde, bu enerjiyi kullanmanız engellenir. Zemin katta saplanıp kalırsınız.

Sıfır noktası enerjisi kavramı, maddelerin mutlak sıfır noktasına kadar soğutulmasını düşündüğümüzde de karşımıza çıkar. Mutlak sıfır noktası gerçekte ulaşılabilir bir değer değildir, ancak fizikçiler bunun milyonda birinden daha az sıcaklıklar elde etmeyi başarmışlardır. Mutlak sıfır noktasını, maddeden elde edebileceğimiz en uç ısı (enerji) derecesi diye tanımlayabiliniz. Madde bir bütün olarak, tıpkı basit bir atomda olduğu gibi zemin seviyesindedir. Oradaki enerjisi (kullanılamamasına rağmen önemli olabilen) kendi sıfır noktası enerjisidir.

Görünen o ki, kuvantum teorisi, sadece atom, moleküller ve atom çekirdekleri gibi sistemlerin yer aldığı boşluklarla sınırlı sistemlerin enerji miktarlarını açıklar. Sistem ne kadar çok sınırlanırsa, devinim seviyelerinin enerji farklılıklarının o kadar büyük olması genel bir kuraldır*. Böylece, küçük çekirdeklerdeki enerji durumları genellikle yüzlerce bin ya da yüzlerce milyon elektron voltluk (eV) bir farklılık gösterirken, daha büyük atomlardaki enerji seviyeleri genellikle birkaç eV ile birbirlerinden ayrılır. Ancak moleküler enerji boşlukları hâlâ küçük olabilir, çünkü moleküller atomlardan daha büyüktür.

Yukarıdaki kuraldan çıkarılacak sonuç şudur: Eğer sınırlama olmasa, izin verilen enerji seviyelerinde farklılık olmaz. Boşlukta özgürce ve sınırlama olmadan gezinen bir elektron herhangi bir enerjiye sahip olabilir, ya da farklı bir bakış açısıyla, elektrona izin verilen devinim seviyeleri arasındaki enerji farkı sıfırdır. Bir metal parçasındaki iletken elektron (elektrik yükünü taşımakla görevli olan elektron) çok az sınırlandırılmıştır, sadece birkaç santimetre kadar ileriye gidebilir. Ancak bu mesafe atomsal ve çekirdeksel boşluklara göre son derce büyük bir mesafedir, iletken elektron burada sınırlandırılmamıştır. Yakın enerji durumları arasındaki fark söz konusu edilemeyecek kadar küçüktür.

Şimdi temel parçacıklarla ilgisi olan önemli bir noktaya geldik. Acaba biri temel seviyede, diğeri heyecanlı seviyede olan iki hidrojen atomu, aynı varlığın iki ayrı versiyonu mudur yoksa bunlar farklı iki varlık mıdır? Genellikle bunları aynı varlığın farklı iki versiyonu olarak kabul ederiz, çünkü ortak çok fazla özellikleri vardır. Ama en derin perspektiften bakıldığında, bunlar farklı varlıklardır. Bir foton yayarak heyecanlı seviyeden temel seviyeye dönen bir hidrojen atomu, prensipte, bir nötrino ve bir karşıt nötrino yayarak bir elektrona

* Bu kuralla ilgili açıklama, 9. Bölümde bahsedeceğim maddenin dalga dünyasında var.

"dönüşen" muondan farklı davranmamış demektir. İkinci süreçte yani parçacık sürecinde, muonun yok edildiğini ve nötrino, karşıt nötrino ve elektronun yaratıldığını söyleriz. Aynı şekilde heyecanlı bir hidrojen atomu dönüşürken yok edilir ve temel seviyede bir foton ile bir hidrojen atomu yaratılır. Böylece sonuçta ister atomlardan, moleküllerden, ister çekirdekler, parçacıklardan bahsedelim, değişim süreçleri bir ya da daha fazla varlığın yok edilip, bir ya da daha fazla başka varlığın yaratıldığı süreçlerdir.

Yukarıdaki durum bizi tersine bir soru sormaya yönlendirir. Eğer bir atomun farklı enerji seviyeleri, kesinlikle farklı varlıklar olarak düşünülüyorsa, bu kesinlikle farklı olan parçacıklar, temelde yatan "bir şey"in farklı enerji durumları olarak düşünülebilir mi? Aynı tip kuarkların farklı parçacıklar oluşturmak için farklı şekillerde (örneğin farklı şekillerde dönerek) birleştiklerini biliyoruz. Bu parçacıkların kütleleri sahip oldukları toplam enerjilerini yansıtır ve fizikçiler bu bileşik parçacıkların kütleleri arasındaki, hidrojen atomunun heyecan seviyeleri enerjileri arasındaki ilişkilere benzeyen, ilişkileri yaklaşık olarak bulmuşlardır. Öte yandan, temel parçacık dediğimiz leptonlar, kuarklar ve güç taşıyıcıları için sorunun cevabını bilmiyoruz. Bugüne kadar bu parçacıklar oldukça farklı görünmüşlerdir. Yay teorisine ya da başka bir yönteme göre, bu temel parçacıkların daha derinde yatan şeyin "sadece" farklı enerji seviyesi olup olmadığı keşfedilmeyi bekliyor.

6. bölüm

Kuvantum Sıçramaları

Rutherford'un Bohr'a sorduğu soru güzeldi: Heyecan seviyesindeki bir elektron hangi düşük enerji seviyesine atlaması gerektiğini nasıl bilecek?* Bir soru da ben ekliyorum: Elektron ne zaman atlaması gerektiğini nasıl bilecek? Bu soruların cevaplanması için bir düzineden fazla yıl geçti. 1926'da, Almanya Göttingen'de, yeni kuvantum mekaniğinin yaratılması konusunda etkili olan bir grubun üyesi olan Max Bornt, cevabı bulmaya götürecek bir anlayışa sahipti. "Atomun içindeki dünyanın temel kanunlan, kesinlik kanunları değil olasılık kanunlarıdır," demişti. Kuvantum mekaniği belirli bir atomun içindeki belirli bir elektronun ne zaman bir kuvantum sıçraması yapacağını ya da hangi duruma sıçrayacağını tahmin etmez ve edemez. Başka bir deyişle, elektron ne zaman, nereye sıçrayacağını *bilmez.* Kuvantum mekaniğinin tahmin ettiği şey elektronun sıçrama *olasılığının* olup olmadığıdır.

Olasılık oldukça doğru bir şekilde hesaplanabilir. A heye-'can seviyesindeki bir elektronun, B düşük enerji seviyesine kuvantum sıçraması yapıp yapmayacağı olasılığını *kesinlikle* biliyoruz. Herhangi bir atomda ise, bu kuvantum sıçramasının ne zaman olacağını ya da bu sıçramanın olup olmayaca-

* Tabii ki elektron hiçbir şey bilmez. Bu terminoloji sadece fizikçinin elektronu yöneten kanunlan hakkındaki konuşma biçimidir.

t Born 1933'de Nazi Almanya'sını terk ederek ilk olarak İngiltere'ye sonra da 1936'da İskoçya Edinburgh'a gitmiştir. 1953 yılında emekli olana kadar burada profesör olarak çalışmalarını sürdürmüştür. Torunu Olivia Newton-John ise fizik yerine şarkı söyleyip, film çevirmeyi tercih etmiştir.



MaxBom (1882-1970). AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

ğmı, belki de elektronun bir C seviyesine atlayabileceğini bilmek için herhangi bir yöntemimiz yok.

Şöyle sorabilirsiniz: Olasılığın özünü kesin olmama durumu oluşturduğu için, olasılığın kesin olup olmaması nasıl anlaşılır? Bu soruyu yanıtlamak için içinde yaşadığımız dünyaya dönelim. Yazı - tura atıldığında yazı gelme ihtimali 142 ya da 0,5'tir. Bu tam doğru olasılıktır (tam dengeli bir bozuk para nedeniyle). Yazı gelme olasılığı 0,493 ya da 0,501 değil tam olarak 0,500'dür. Yine de yazı tura atılınca sonuçların ne olacağı tamamıyla belirsizdir. Bu nedenle olasılık, sonuçlar kesin olmadığı zaman doğrudur.

Peki ya bu para, atan kişi bilmediği halde, yazı mı tura mı geleceğini biliyor mu? Sanırım tıpkı elektronda olduğu gibi bu paranın da bunu bilmediğini tahmin etmişsinizdir. Sonuçta, bu para işbaşındaki olasılığı tanımlayan mükemmel bir örnek değil mi? Evet (pratikte) ve hayır (teoride). Yazı tura atan bir futbol hakemi yazı mı tura mı geleceğini bilemez ama pa-

ra bilir -yani bu paranın atılmasıyla ilgili her şeyi bilen bir bilim insanı (fırlatma yüksekliği; paranın kütlesi, başlangıçtaki hızı, yönü ve dönme oranı; rüzgarın hızı; ve havanın direnci gibi), bu bozuk para yere indiğinde hangi yüzünün üstte kalacağını teoride hesaplayabilir. Atılan parayla ilgili sahip olduğumuz şey *bilgisizlik olasılığıdır.* Pratikte yazı ya da tura gelme ihtimaline her biri için yüzde elli deme nedenimiz ve atılan herhangi bir paranın hangi yüzünün üstte kalacağını tahmin edememiz yeterince bilgimizin olmayışındandır. Sonucu hesaplayabilmemiz için gerekli olan detaylardan haberimiz yoktur. Elektronu yöneten miktar olasılığı ise farklıdır. Bu bir *temel olasılıktır.* Heyecan seviyesinde olan bir elektronla ilgili her şeyi biliyor olabiliriz ama yine de ne zaman nereye sıçrayacağını tahmin edemeyiz.

Klasik fizik, *prensipte* her durumda her sonucun tam doğru olarak ölçülebilmesi bakımından, belirsiz değil tam doğrudur. Tek sorun *başlangıçtaki koşulların* yeterince bilinip bilinmemesidir. Güneş sistemindeki bugünkü koşullarla ilgili yeterli bilgimiz, Mars gezegeninin, 1 Ocak 2050 tarihinde tam olarak nerede olacağını rahatlıkla tahmin etmemizi sağlar. Eğer havayla ve Dünya'nın alt katmanlanyla ilgili gerekli her şeyi bilseydik, gelecek haftanın hava durumu bile (prensipte) tam doğru olarak hesaplanabilirdi*. Kuvantum mekaniği de belirsiz değil tam doğrudur ama farklı bir biçimde: kuvantum mekaniğinde *olasılıklar* tam doğru olarak ölçülebilir.^

Bir fizikçinin aslında ne olacağını değil, sadece bir şeylerin olacağı *ihtimalini* ölçebilmesi belirsizdir ve tam doğru (ya da kesin) değildir. Bir elektronun tam olarak ne zaman bir kuvantum sıçraması yapmayı tercih edeceği hesaplamanın öte-

* Ne yazık ki, sadece bugünkü hava durumuyla ilgili yeterli bilgi almanın zorluğu değil, gelecek haftaki hava durumu bu günkü hava durumunun en ufak belirsizliklerinden inanılmaz bir hassasiyetle etkilendiği için, gelecek haftanın hava durumunu tam doğru hesaplamak ümit etmenin çok ötesine kalıyor. *Kaos* dediğimiz fenomen bugünün küçük olaylarını büyüterek gelecek haftaya dev etkiler olarak yansıtıyor.

sinde kalan bir durumdur.

Hesaplanan olasılıkların gerçekten doğru olup olmadığını bulmak için fizikçi ne tür ölçümler yapabilir? Diyelim ki bir hidrojen atomu içindeki bir elektronun A durumundan B durumuna sıçrayış olasılığını ölçmek istiyoruz. Tek bir atomu ya da birkaçı atomu ölçerek bunu hesaplamak imkânsız. Bu olasılık hesabı için, tamamı başlangıçta A durumunda olan ve B durumuna sıçrayan çok büyük miktarlardaki atomların *ortalama* davranışlarını gözlemlemek gerekir. Bunların her biri belirli bir süre sonra bozunuma uğrayacaktır (yani kuvantum sıçraması yapacaktır). Ölçümlenen süreler çok geniş bir alana yayılmış ve çok farklı olabilir. Eğer deneyi yapan fizikçi bir milyon atomun bozunum süresini ölçecek kadar sabırlıysa, bunların *ortalama ömür* dediğimiz ortalama bozunum sürelerini bulabilir. Teorinin geçerliliğini kontrol etmek için ölçülen ortalama ömür, kuramsal ortalama ömür ile kıyaslanabilir*. Bireysel ömrün süresi ortalamadan çok farklı olabilmesine rağmen, bir milyon ölçümden sonra teorinin sayısına yakın bir sonuca varmış olmak gerekir (eğer teori doğruysa).

Benzer kıyaslama yazı tura atılması için de yapılabilir. Yazı gelme olasılığının gerçekten yüzde elli olduğunu kontrol etmek için, daha birçok ölçüye ihtiyacınız vardır. Eğer on kere yazı tura atsaydınız, yazının üç kez geldiğini görebilirdiniz. Bu, yazı gelme şansının yüzde 30 olduğu anlamına gelmez. Bunun anlamı yeteri sayıda yazı tura atmamış olmanızdır. Eğer bin kere yazı tura atsaydınız gerçekten üç yüz kere yazı geldiğini görünce şaşırırdınız. Çünkü "hemen hemen" beş yüz kere yazı gelmesini beklerdiniz.

Eğer bir milyon kez yazı tura atsaydınız ve yazının 499.655 kez geldiğini görseydiniz, yazının gelme olasılığının yüzde elli olduğuna inanmaya hazır olurdunuz.

* Matematikte ortalama ömür, bozunum olasılığının tersidir. Diyelim ki hesaplanan bozunum olasılığı nano saniyede yüzde yirmi (yani her bir nano saniye içinde bir dönüşüm olma ihtimali yüzde yirmidir). Bu olasılık 0,2/nano saniye şeklinde yazılır. Bunun tersi 5 nano saniyedir. Bu ise tahmin edilen ortalama ömür süresidir.

Bir önceki bölümde bahsettiğim gibi, yüksek enerji seviyesinden alçak enerji seviyesine sıçrarken bir atom tarafından yayılan bir fotonun durumu, prensipte, sabit olmayan bir parçacığın dönüşümünden farklı değildir. Bir parçacık dönüşümü gibi, kuvantum sıçraması da "önce" içinde olan şeyin yok olup, "sonra" başka bir şeyin yerine geçtiği gerçek bir mini patlamadır. Enerji gibi belirli miktarlar korunur (sıçrama öncesi ve sonrasında aynı kalır), ama bunun dışında başka çok az şey korunur. Pion ve muon dönüşümünü,

$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$

şeklinde gösterebildiğimiz gibi A durumundan B durumuna atomsal geçişi de şöyle gösterebiliriz:

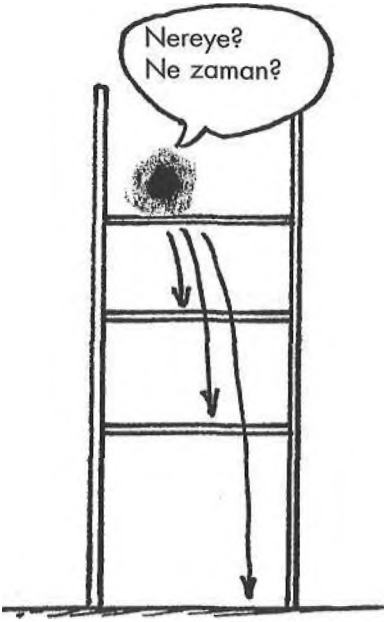
A -» B + *y*

(*y* bir fotonu temsil eder).

Böylece heyecanlı bir atomun dönüşümünde olduğu gibi, hareketli bir parçacığın dönüşümü de olasılık tarafından yönetilir. Herhangi bir pionun ne zaman dönüşüm yapacağı tamamıyla belirsizdir, ama çok sayıda pionun bir ortalama ömrü vardır (Ek B, Tablo B3'de gösterildiği gibi bu ömür 2,6 x 10^{-8} saniyedir).

Olasılık hem bir şeyin *ne zaman* olacağına hem de (eğer birden fazla ihtimal varsa) *ne olacağına* karar verir. Bir atomun içindeki mevcut enerji seviyeleri *{durağan seviyeler* diyoruz) şekil 19'daki gibi bir merdivenle gösterilebilir. En düşük enerji seviyesine "zemin" denir. Daha yüksek enerji durumları merdivenin basamaklarıyla gösterilmekte. Diyelim ki atom kendini üçüncü basamakta buldu. Elektronu yine kişileştirirsek, düşüneceği iki konu var diyebiliriz: ne zaman dönüşeceği ve hangi alt enerji seviyesine dönüşeceği. Büyük bir olasılıkla alt basamaklardaki enerji seviyelerinden herhangi birine dönüşecek. Ancak hangi seviyeye dönüşeceği ve dönüşmeden önce ne kadar bekleyeceği kesinlikle tahmin edilemez.

Bir pionun da (bir parçacık örneği vermek gerekirse), pek çok seçeneği var. Bir pionun bir muon ile bir nötrinoya dönü-



Şekil 19.
Enerji "merdiveni"

şümü yukarıda sembollerle gösterilen duruma çok benzer. Bu benzerlik yüzde 99,998'i bulur.

Ancak bir pion genellikle üç parçacığa dönüşür, bunlardan biri fotondur;

$7t^{+} —>//+ Vn+y,$

ya da bir elektron (bu örnekte bir pozitron görülüyor) ile bir nötrinoya dönüşür:

$TC—> e^{*}+ Ve,$

Bu farklı dönüşüm modellerinin orantısal olasılıklarına *oranların çeşitliliği* denir.

Doğanın temel süreçlerinin kesinlik kanunlan değil, olasılık kanunlarıyla yönetildiği fikri bilim dünyasına bomba gibi düşmüş olmalı.

Sonuçta bu basit fikir, üç yüzyıldan daha fazla bir sürede büyük emeklerle inşa edilen klasik fiziğin sağlam yapısını devirdi. Ancak bu klasik yapıyı yıkan esas şey bir bombanın patlaması değil bir erozyondu. Born, ancak 1920'lerin ortasında geliştirilen kuvantum mekaniğinin matematiksel teorisinden sonra, onun olasılık yorumunu açık bir şekilde belirtebilmiştir*.

1899'da yeni keşfedilmiş olan radyoaktivite fenomenim inceleyen Ernest Rutherford ve diğerleri, radyoaktif atomların dönüşümünün bir olasılık kanununu izlediğini fark ettiler. Tıpkı heyecanlı atom ya da pionlarda olduğu gibi, bunların bir kısmı kısa bir süre, bir kısmı da daha uzun süre yaşıyordu. Tüm gruplar için sadece sabit bir ortalama süre vardı. Üstelik basit bir radyoaktif atomun -örneğin bir alfa parçacığı ya da beta parçacığı yayarak- hayatına son verebilme seçeneğin vardı. Herhangi bir atomun bu seçimini önceden tahmin etmek mümkün değildi. Sadece pek çok dönüşüm olayının incelenmesiyle orantısal olasılığın (oranların çeşitliliğinin) ölçülmesi mümkün oldu. Ancak Rutherford ve diğer fizikçiler evlerin damından, "Doğanın temel kanunları olasılık kanunları olmalı," diye bağırmadılar. Niçin?

Cevabı çok basit. Çünkü *temel kanunlarla* uğraştıklarının farkında değildiler. Olasılık, bilimde yeni bir şey değildi. Yeni olan ve henüz farkına varılmamış olan şey, olasılığın ilk defa doğanın basit temel fenomenleri içinde ortaya çıkıyor olmasıydı.

Şüphesiz, Rutherford bilgisizlik olasılığıyla uğraştığını düşünüyordu. Bildiği kadarıyla atomun içi karmaşık bir yerdi. Şöyle ki; dönüşüm sürecinin belirgin rasyonelliği, farklı atomların içindeki durumun bilinmeyen farklılıklarından kaynaklanıyor olabilirdi. (Henüz atomun içinde radyoaktivi-

* 1924'de, Born'un çalışmasından iki yıl önce, Danimarkalı Niels Bohr, Hollandalı Hendrik Kramer ve Amerikalı John Slater birlikte çalışarak, olasılığın kuantum sürecinde başrollerden birini oynayabileceğini söylemişlerdi. Ancak bu fikri destekleyecek teoriyi henüz tamamlamamışlardı.

tenin merkezi olan çekirdekler olduğunu sezememişti.) Yirminci yüzyılın ilk çeyreğinde olasılığın temel bir kavram olduğunun başka işaretleri de vardı; ama böylesine sıradışı bir fikir, deneyle teori birbirlerine yakınlaşarak bilimi zorlayana kadar kabul edilmemişti. Rutherford (1902'de Frederick Soddy ile beraber) radyoaktivitenin atomda kademeli değil ani bir felaket gibi değişim yarattığını keşfetti. Kendi içinde radyoaktif değiştirilme yaratılması temel bir olaydır*. Einstein'ın 1915'te ışığın sadece farklı yığınlar (fotonlar) içinde emilebildiğini keşfetmesi ve Bohr'un 1913'te bulduğu hidrojen atomunun içindeki kuvantum sıçramaları teorisi de belki de olasılığın temel taşı olduğunun işaretlerini veriyordu. Ama fizik dünyası henüz uyarıları dikkate almaya hazır değildi.

Buraya kadar anlattığım olasılık kendini atomun içindeki olayların rasgeleliğinde ifade eder. Bu rasgelelik kendini, heyecanlı bir atomun ya da hareketli parçacığın *yaşam süresiyle,* mümkün olan farklı sonuçlardaki *oranların çeşitliliğiyle* ve *yayılma* ile ifade eder. Eğer bir parçacık diğerine yakın uçarsa yoldan çıkabilir ya da "yayılabilir". Kuvantum mekaniği sadece belirli bir yayılma olasılığının ölçülmesine izin verir, yayılmanın kesinlik ölçümüne değil. Parçacık etkileşimleri ile ilgili bildiğimiz şeylerin çoğunu yayılma deneyleri sayesinde öğrendik.

Yüksek okul ve üniversite laboratuvarlarmda yaygın olmasına rağmen, çoğu kimse gönüllü olarak Geiger sayacını ve bir zayıf radyoaktif kaynağı tutamaz. Geiger sayacının merkezinde içinde hafifletilmiş gaz bulunan bir tüp ve tüpün eksenini kaplayan bir metal tel vardır. Tüp ile merkezdeki telin arasına bir kıvılcım yaratmak için çok yeterli olmayan bir yüksek voltaj uygulanır (yüzlerce volt). Tüpten yüksek enerjili bir parçacık çıktığında, bu parçacık gaz moleküllerini iyo-

* Ortaçağ simyacılarının hayali olan değiştirilme, bir elementin başka bir elemente dönüşmesidir. Bu olay çekirdeğin yükünün değiştiği her radyoaktif dönüşümde görülür.

nize eder, yani, kıvılcımın sıçrayabilmesini sağlamak için elektriklenmiş gaz yaratarak, moleküllerden elektronların fışkırmasını sağlar. Tüple tel arasındaki kısa akımın bir dış devre tarafından arttırılması, bir tık sesi duyulmasına ve/veya sayacın bir sayı daha kaydetmesine neden olur. Tüp bir sonraki parçacık için hazır olduktan sonra, dış devre ayrıca kıvılcımı saniyenin küçük bir kısmı kadarlık bir sürede söndürür. (Rutherford'un doktora öğrencisi Hans Geiger 1918'de bu tür bir dedektör cihazının ilkel şeklini icat etmiş ve sonra bu cihazı mükemmelleştirmiştir.)

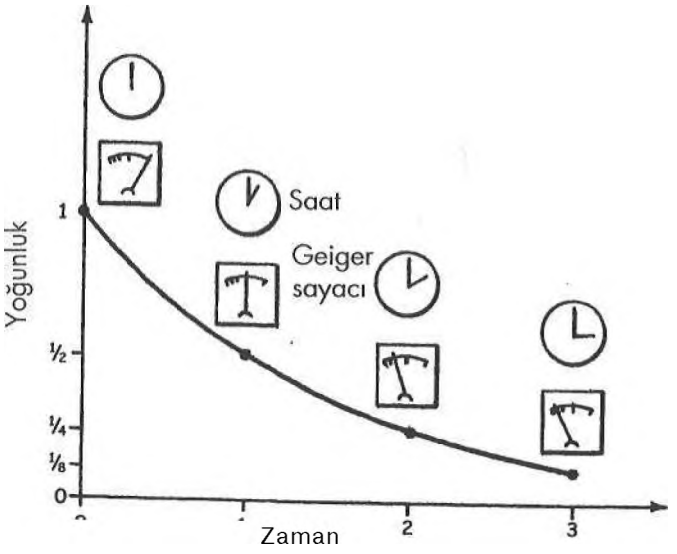
Radyoaktif dönüşüm olaylarını saymak temel olasılıkla doğrudan ilişki kurmak için mükemmel bir yöntemdir. Geiger sayacını radyoaktif kaynaktan, sayaca her yüksek enerjili parçacık girdiğinde bir tık sesi duyacak kadar uzağa koyarsanız, bu tık seslerinin saatin tıkırtısı kadar düzenli olmadığını derhal anlarsınız. Bu tık sesleri düzensizdir. Aslında bir matematiksel analiz bunların tamamıyla rasgele olduğunu gösterebilir. Belirli bir tık sesi son tık sesi duyulduğundan ya da herhangi bir tık sesi olduğu zamandan beri, akan zamandan tamamıyla bağımsızdır. Atomsal standartlara göre gerçek dev yaratıklar olan sizler, atomun içindeki Dünya'dan mesajlar duyuyorsunuz. Duyulabilen her tık sesi, radyoaktif parçacığın içindeki sayılamayacak kadar çok milyarlarca atomun arasında bir yerlerde bir çekirdeğin; yüksek hızda bir parçacık fırlatarak farklı bir çekirdeğe dönüşmeye aniden karar vermiş olduğu anlamına gelir*. Tam anlamıyla bir nükleer patlama olmuştur ve çekirdeğin bu özel dünyasında patlamanın zamanı, olasılık kanunu tarafından özel olarak belirlenmiştir. Komşu çekirdek ise patlamadan sonra uzun bir süre daha yaşayabilir.

Olasılık, açıkça görülmeyen ya da duyulmayan ama biraz

* Duyduğumuz bütün tık seslerinin radyoaktif dönüşüm olayları tarafından üretildiği atom olarak doğru değildir. Bu seslerin bazıları, aşağıya doğru hızla inen çoğunlukla muonlardan oluşan kozmik ışın parçacıkları tarafından çıkarılır.

matematik bilgisi olan bir kişiyi ikna etmeye yetecek bir başka yöntemle kendini ifade edebilir. Bu ifade şekli üssel dönüşüm kanunuyla olur. Rutherford 1899'da henüz basit değiştirilme olaylarını gözlemlemek için hiçbir aracı yokken, radyoaktivitedeki olasılığın rolünü bu yöntemle keşfetti. Rutherford radyoaktivitenin yoğunluğunun zaman içindeki durumunu grafikle ifade ederken, ortaya şekil 20'deki gibi bir eğrinin çıktığını gördü. Buna *üssel* eğri denir. Böyle bir eğrinin en belirgin özelliği herhangi bir değerden dikey olarak bu değerin yarısı kadar olan sabit yatay eksene düşmesidir. Rutherford'un deneylerinde bunun anlamı şuydu: Başlangıçtaki yoğunluğuna bakmadan, radyoaktivitenin yoğunluğunu yarı yarıya azaltmak için belirli bir sabit zamana ihtiyaç vardı. Bu sabit zamana, maddenin *yarı ömrü* diyoruz.

Rutherford'un bildiği ve benim okuyuculardan kabul etmesini istediğim şey, bireysel radyoaktif dönüşüm olaylarındaki üssel eğrinin olasılık kanunlarının davranışlarından ortaya çıktığıdır.



Şekil 20. Radyoaktif örneğin üssel dönüşümü.

Her basit çekirdek için yarı ömür, olasılığın orta noktasını temsil eder. Çekirdeğin bu süreden daha kısa bir sürede bozunma şansı ile daha uzun sürede bozunma şansı yan yarıyadır. Benzer çekirdeklerden oluşan geniş bir koleksiyondaki olasılık kanunu farklı davranırsa, radyoaktif dönüşümün toplam oranı üssel eğrinin aşağısına düşer. Aynı şey parçacıklar için de geçerlidir. Tablo B1 ve B3'te gösterilen her bir ortalama ömür* bu parçacıkların üssel dönüşüm eğrileri incelenerek ölçülmüştür. (Süreler, doğrudan ölçülmemiş olmasına rağmen, parçacıkların hızları ve gittikleri mesafeler ölçülerek bulunabilir.)

Bilinen en kısa yarı ömür ile en uzun yan ömür yelpazesi hayal edilemeyecek kadar büyüktür, 10^{22} saniyeden kısa ve 10^{10} yıldan uzundur. Yarı ömürden bağımsız olarak, her sabit olmayan parçacığın ya da çekirdeğin dönüşümü, karşı konulamayan aynı üssel eğriyi takip eder.

Bir bilim insanının saniyeden yıla kadar geniş bir yelpazeye sahip zaman dilimleriyle yarı ömrü nasıl ölçtüğünü gözünüzün önüne getirebilirsiniz. Modern zaman ölçüm devreleri sayesinde, saniyenin milyonda ya da milyarda biri kadar kısa zaman aralıklarını ölçmenin mümkün olduğunu tahmin edersiniz. Fizikçiler mesafeyi zamanın yerine kullanarak saniyenin trilyonda biri (10^{12}s) kadar veya daha az süren ömürleri bulabiliyorlar. Bir parçacık ışık hızına yakın bir hızda seyahat ederek, 10^{-2} saniyede milimetrenin üçte biri kadar yol kat eder (eğer zamanın orantısal genişlemesi dikkate alınırsa bu mesafe daha da uzun olur). Bir parçacık atomun içinde sadece çok küçük bir mesafe giderken, nasıl olur da bilim insan-

* Genel olarak, ortalama ömür, yarı ömürle aynı değildir. Örneğin, 2000 yılında Amerika'da *ortalama* insan ömrü süresi (ortalama ömür) 77 yıl olarak (kadın-erkek karışık) beklenirken; yarı ömür 80 yıldı. Bunun anlamı 80 yaşına gelmeden bir Amerikalı yaşıtlarının yansı kadar yaşamış sayılmaz demektir. Öte yandan parçacık dünyasında, her yaşta "ölme" olasılığı aynıdır, yarı ömür ortalama ömürden epeyce kısadır (0,694 bu ikisini birbirine bağlayan kesin sayıdır). Ortalama ömrü on beş dakika olan bir nötron, yaklaşık onuncu dakikadan sonra yaşıtı olan nötronların yarısı kadar yaşamış demektir.

lan 10^{-22} saniyelik yan ömürleri ölçebilirler, ya da Büyük Patlama'dan bu yana geçen zamandan daha büyük bir yarı ömrü ölçebilirler? İkinci sorunun cevabı (uzun ömürlerin nasıl ölçüldüğü) daha açık. Cevap, olasılığın işleyişine bağlı. Diyelim ki ortalama ömür bir milyar yıl olan bir radyoaktif atomunuz var. Bunun anlamı bu atomun bir yılda dönüşüm şansının milyarda bir olduğudur. Eğer bu tür atomlardan bir milyar tanesine sahip olsanız, ortalama olarak yılda bir tanesi dönüşür. Eğer bunlardan 365 milyar tanesine sahip olsanız, ortalama olarak günde bir tanesi dönüşür. Ancak 365 milyar tane atom, çok az sayıda atomdur. Pratikte, bir radyoaktif madde, ortalama ömürleri bir milyar yıl bile olsa her saniyede pek çoğunun dönüştüğü pek çok atom içerebilir. Atomların her an olasılık tarafından baskılanması gerçeği sayesinde, çok uzun yan ömürleri ölçmek kolay bir şeydir. Bunların küçük bir yüzdesi, yaşlanmadan dönüşecektir.

Son derece kısa yarı ömürleri ölçmede, kuvantum mekaniğinin tamamıyla farklı bir özelliğinden yararlanılır: *belirsizlik ilkesi.* Parçacığın ömrü ne kadar kısa olursa, enerjisini belirsizliği de o kadar büyük olur. Enerjinin belirsizliği ölçülebilir bir enerji "yayılımı" sağlar. Ölçülen yayılımdan, ömür bulunabilir.

Nükleer atık kuvantum ilkelerinden çok uzak bir konu gibi gözükebilir, ama aslında bu konu halk sağlığı açısından kuvantum sıçramalarına ve olasılığa doğrudan bağlıdır. *Harcanan yakıtta,* yan ömrü, saniyelerden binlerce yıla kadar uzanan sayısız radyoaktif izotop vardır. Bunlardan her biri kendi üssel dönüşüm eğrisini takip eder. Karışımın radyoaktivitesi ilk önce hızlı, sonra daha yavaş bir şekilde azalır. Bir zamanlar güvenli olmayan bir maddenin güvenli bir hale gelmesi için geçmesi gereken belirlenmiş bir süre yoktur. Bunun yerine, daha çok tehlikeliden daha az tehlikeliye dereceli olarak geçiş vardır. Radyoaktivitenin merkezi atomsal çekirdek olduğundan, hiçbir tür kimyasal ya da fiziksel iyileştirme çalışması onu etkilemez. İyi ya da kötü, o orada ve biz onunla ba-

şa çıkmalıyız. Bazı insanlar radyoaktif atıkların roketlere yüklenip Güneşe fırlatılmasını önerdiler. Bu son derece pahalı ve roketin fırlatılması son derece tehlikeli olduğu için, uygulanması pek mümkün gözükmüyor. Geleceğe yönelik başka bir olasılık ise (günün birinden gerçekleşebilir) zararlı maddeyi, çok sıcak olduğundan maddeyi zararsız şekle dönüştürmede kimyasal yerine *nükleer reaksiyon* kullanan bir kazan olan eritme kazanında "pişirmektir". Yakın bir gelecekte, radyoaktif materyal yerkürede öyle bir depolanmalıdır ki, gelecek yüzyıllarda çevreden kolayca ayrılabilsin.

Özellikle şaşırtıcı bir kuvantum sıçraması türü, *"tünel kazma"* denen, delinemeyecek bir engeli geçen kuvantum sıçraması fenomenidir. Diğer kuvantum sıçrama türlerinde olduğu gibi, tünel kazma da olasılık kanunu tarafından yönetilir. Klasik fiziğe göre, eğer bir parçacık kesinlikle delinemeyen bir duvarın bir tarafında duruyorsa, diğer tarafa geçmek için çok küçük bir şansı vardır. 3. Bölümde bahsettiğim gibi, çekirdeklerin alfa bozunumu, tünel kazma fenomeni olarak adlandırılabilir. Alfa parçacığı çekirdeğin içinde, klasik teoriye göre yarılamayacak bir elektrik gücü duvarı tarafından tutulur. Ancak küçük bir olasılıkla, alfa parçacığının aniden çekirdeğin dışına çıkıp gidebildiği, bir gözlemcinin parçacık dedektörü tarafından tespit edilebilir.

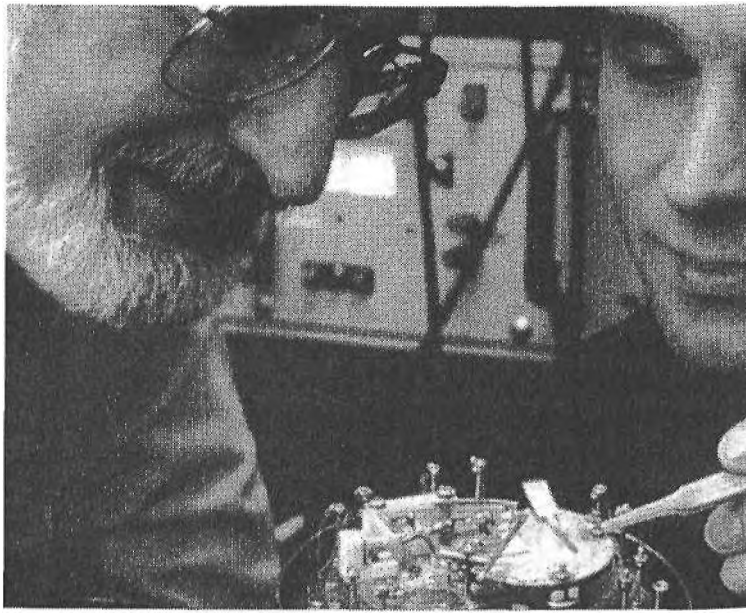
Tünel kazma genellikle çok az bir olasılıkla gerçekleşir. Çekirdeğin içindeki bir alfa parçacığı dışarı çıkmak için saniyede 10^{20} kez "kapıyı çalıyor" olabilir, ancak dışarıya çıkması milyonlarca yıl sonra olabilir. Bizim insan-ölçekli dünyamızda olasılıklar daha da küçüktür.

Hapishane duvarına yaslanan bir mahkumun, aniden duvarın öteki tarafına geçmesinden, bir gardiyanın hiç endişe duyması gerekmez. Sıkıcı bir dersteki öğrencinin sınıf dışına kaçmak için hiç ümidi yoktur. Tünel kazma, parçacıklara tutuldukları çekirdek hapishanelerinden kaçmaları için yardım ederken, size kaçmanız için asla yardım etmez.

Ancak son birkaç on yıllık dilimlerde, bilim insanları tünel kazmayı nasıl yöneteceklerini öğrenmiştir. Eğer iki maddeye aralarında çok az fark olan (genelde bir volttan daha az) elektrik akımı verilirse ve bu maddeler birbirlerine çok yaklaştırılırsa, maddelerden birindeki elektronlar, yine klasik fiziğin elektronların bir maddeden diğerine geçemeyeceğini öne sürmesine rağmen, aralarındaki boşluktan tünel kazarak diğer maddeye geçerler. Bu tekniğin güzel bir uygulaması tünel kazmayı tarayan mikroskop (STM)'tur. Bu mikrosobu Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer Zürih'te bir IBM laboratuvarında geliştirmişler ve bu başarılarından ötürü 1986'da Nobel ödülünü paylaşmışlardır.

STM aslında bir mikroskop değildir ama atom tanelerini yerini gösteren katı bir yüzeyi görüntüleyebildiği için ona mikroskop denir. Üzerinde çalışılan yüzey ince bir metal uca yaklaştırılır, bu uç yüzey üzerinde ileri geri hareket edebilir ("tarama" terimi buradan gelir), ayrıca yukarı ve aşağı da hareket edebilir, yani yüzeye yaklaşıp uzaklaşabilir. Bu hareketler son derce kontrollü yapılır. Uç yüzeye bir nanometre (10^{9} m, on atomsal çaptan daha küçük) kadar yaklaştırılır. Bu mesafeden elektronlar yüzeyden uca tünel kazarlar ve bu zayıf bir elektrik akımı olarak kaydedilir. Yüzey, sahip olduğu atom yığınlarından dolayı tam olarak düz olmadığı için, üzerinde yana doğru hareket ettikçe, yüzeyle uç arasındaki mesafe değişecektir. Mesafe biraz artarsa, tünel kazma akımı azalır. Mesafe biraz azalırsa, tünel kazma akımı artar. Bu aleti mikroskop gibi kullanırken, uçtan yüzeye sabit bir mesafe anlamına gelen sabit bir tünel kazma akımı için, geri besleme devreleri yatay olarak tarama yapan ucu yüzeyde çok yumuşak bir şekilde yukarı aşağı hareket ettirir. Böylece ucun kaydedilen yukarı aşağı hareketi yüzeyin tepe ve vadilerini gösteren bir haritaya dönüştürülebilir. Harita bir atom tanesinin çapı olan yaklaşık bir nanometrenin onda birinden (İCr^{10} m) daha kurursuzdur.

Tünel kazma yönetimindeki başka bir uygulama ise *tünel*

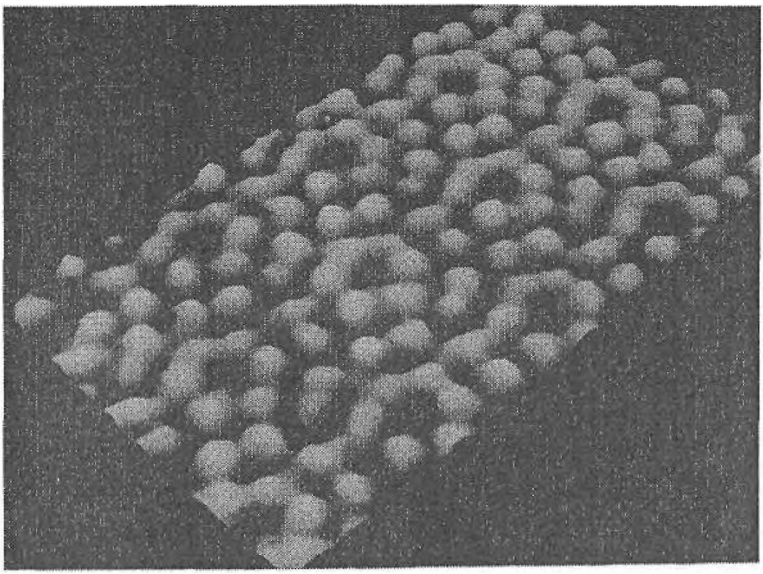


Heinrich Rohrer (doğum 1933), solda, ve Gerd Binning (doğum 1947) ilk tünel kazmayı tarayan mikroskoplarıyla (STM). Fotoğraf IBM Zürih Araştırma Laboratuvarı arşivi.

kazma dioa" udur. Diod, içinde elektrik akımının kendiliğinden sadece bir yöne aktığı bir cisimdir. Bu cismin, metrodan çıkarken veya bir hayvanat bahçesine girerken geçtiğimiz turnike gibi, ters yöne geçiş yoktur.

Diodlar, elektrik devrelerinde yaygın olarak bulunurlar ve genellikle temas halindeki iki aynı iletkenden oluşurlar. Klasik hesaplamalara göre, doğru seçilmiş materyallerle ve iki parça arasında seçilmiş belirli bir elektrik kuvvetiyle, elektrik akımı tamamıyla durdurulabilir. Ama eğer iki materyal arasındaki sınır tabakası yeterince inceyse, bazı elektronlar tünel kazarak diğer tarafa geçerler. Tünel diodları yaygın olarak kullanılır çünkü *negatif direnç* denen ilginç bir özellikleri vardır. Bunun anlamı belirli bir voltaj aralığında, alışılagelmiş durumun aksine, daha çok voltajın daha az akım üretmesidir.

Ne zaman bir kuvantum sıçraması olsa, bu "tepe aşağı" de-



STM'de görüntülenmiş bir silikon yüzeydeki atom taneleri. Fotoğraf IBM Zürih Araştırma Laboratuvarı.

mektir, yani daha fazla kütleli durumdan daha az kütleli duruma geçiştir.

Bu tepe aşağı kuralı, parçacık dönüşümünde açıkça görülür, örneğin, lambda parçacığının bir proton ile bir negatif piona dönüşümü.

$A^{\ddot{u}} - \text{¥} p^{+} + 7T$

şeklinde gösterilir.

Tablo B.3'ten

önceki kütlenin = 1.116 MeV;

sonraki kütlenin^ 938,3 MeV + 139,6 MeV = 1.077,9 MeV

olduğunu öğreniriz.

Kütle, 38 MeV kadar ya da yüzde üç oranında azalır. Yüksüz bir pionun iki fotona dönüşümünde, dönüşümün sonucunda ortaya çıkanlar kütlesiz olduğu için, külte yüzde 100 azalır.

Tepe aşağı kuralı, kütlenin yüzdelik değişimi küçük olmasına rağmen, bir hidrojen atomunun yüksek erierji durumundan daha düşük enerji durumuna geçtiği kuvantum sıçramasına bile uyar. Bir hidrojen atomundaki elektron ilk Ijeyecanlı durumundan temel duruma sıçrarken, atom kütlelerinin yaklaşık 10 eV kadarını kaybeder.

Bu sadece atomun kütlesinin yüz milyonda birlik (ya da yüzde bir milyonluk) bir bölümünde olur. Bu değişim o kadar küçüktür ki hiçbir zaman doğrudan ölçülemez ve görelilik ile kuvantum mekaniğinin gelişmesinden önce tahmin bile edilmemiştir. Ancak bilim insanları, radyoaktif dönüşümün içindekiler de dahil olmak üzere kuvantum sıçramasıyla sonuçlanan başka pek çok kütle değişimi ölçmüşlerdir ve şüphesiz tepe aşağı kuralı atomlara bile uymaktadır.

Neden tepe aşağı kuralı? Kendinizi kayaklarla bir dağda düşünün. Kendiliğinden gidebileceğiniz (yani enerji harcamadan) tek yön aşağıdır. "Tepe aşağı kuralı"na uyarsınız. Enerji korunumu sizin istemeden meyilden sürüklenmenizi önler, tıpkı bir radyoaktif parçacığın kendinden daha fazla kütleli parçacıklara dönüşmesini önlediği gibi. Sabit ve tek başına olan bir radyoaktif parçacığın *toplam enerjisi,* dönüşümünden hem önce hem de sonra, kütle enerjisine eşittir. Bu enerjinin bir bölümü yeni oluşan parçacıklara, bir bölümü de bu parçacıkların kinetik enerjisine gider. Bu, yeni oluşan parçacıkların ebeveyn parçacıktan daha fazla kütlesi olamayacağı anlamına gelir ve pratikte de her zaman böyledir.

Eğer radyoaktif bir parçacık hareket ediyorsa, kinetik enerjisinin bir bölümü kütleye geçerek "tepe yukarı" dönüşümü olur diye düşünebilirsiniz. Görelilik, bunun niye böyle olamayacağını açıklamaya yardım eder. Radyoaktif parçacıkta olması gereken normal şartlara bakalım. Bu normal şartlara göre parçacık hareketsizdir ve normal şartlarda tepe aşağı kuralı işler. Eğer, normal şartlara göre, dönüşüm sonucu ortaya çıkan parçacıkların toplamı ebeveyn parçacığınkinden azsa, parçacığın kütlesi bir şarttan diğerine değişiklik gösterme-

diği için tüm koşullarda bunlann kütlesinin daha az olduğu kabul edilir*.

Şimdi bir süre için sizin dağdaki kayaklı görüntünüze dönelim. Aslında tepe yukarı *gidebilirsiniz.* Depoladığınız kimyasal enerjinin bir kısmını güç enerjisine çevirerek lifte binerek ya da tırmanarak yukarı gidebilirsiniz. Bir parçacık da, eğer bir şekilde enerji eklenirse, "tepe yukarı" gidebilir. Bu, tam olarak hızlandırıcılarda olan durumdur. Bu parçacığın bir başka parçacığa çarpması sonucunda kinetik enerji kütle enerjisine dönüşür. Bu nedenle tepe aşağı kuralı sadece kendiliğinden dönüşümlerde görülür.

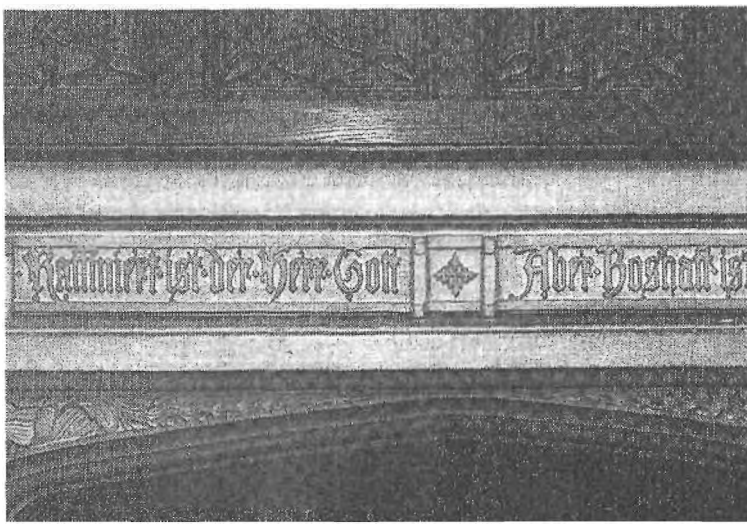
Kitabın bu bölümünde kuvantum sıçramaları ve onları yöneten olasılık kanunları üzerinde durdum. Ancak atomun içindeki alemde her şey belirsiz veya olasılıklara dayalı değil. Örnek vermek gerekirse; bir elektronun dönüşü ve protonun kütlesi gibi sabit sistemde bulunan pek çok şey iyi tanımlanmıştır. Yine de atomlar, çekirdekler ve parçacıklara neler olduğunun bir kısmı olasılığın konusudur. Bu bizi şunu sormaya yönlendiriyor: Eğer küçük ölçekli dünyada olup bitenlerin çoğu olasılık kanunlarıyla yönetiliyorsa, aynı şey niçin büyük ölçekli dünyada da geçerli değil? Sonuçta büyük ölçekli dünya küçük ölçekli dünyanın sayısız parçasından oluşuyor ve bu nedenle kanunlar da aynı olmalı. (Daha önce de belirttiğim gibi, büyük ölçekli dünyada da zaman zaman olasılıkla karşılaşıyoruz, ama bu daima temel olasılık değil bilgisizlik olasılığı dediğimiz bilgi eksikliğimizden kaynaklanıyor.) Temel olasılığın günlük hayatımızda bizden saklanmasının iki nedeni var. Birinci neden, ne zaman yeterince bireysel olasılığı olan olay birikse, sonuç kolay, yorumlanabilir bir değişimdir. Bu bireysel çekirdeklerin kolay ve üssel bir değişim yaratmak için rasgele dönüştüğü radyoaktivite için doğrudur. Diğer neden ise, temel olasılık rakamlannı büyük ölçekli dünya da uy-

* Bu görüşe göre kütle, sabit miktarı olan bir kütledir, yani bu miktar, normal şartlardan bağımsızdır.

gulandığmda sonucun daima sıfıra ya da bire yakın olmasıdır. Kuvantum mekaniğine dayanarak tünel kazarsanız, tuğladan bir duvarı geçme şansınız büyük bir olasılıkla sıfırdır (ama *tam* sıfır değildir). Fırlatılan bir beysbol topunun umulmadık bir şekilde zikzaklar çizmeyip düz bir yoîizleme şansı büyük bir olasılıkla birdir, yani yüzde 100 (ama *tam* bir değil).

Son olarak daha derin bir soru: Olasılığın kuvantum kanunları, *gerçekten* temeli mi oluşturur, yoksa bunlar aslında temel kanunlar gibi davranan bilgisizlik olasılıkları mıdır? Bunu tam olarak kimse bilmiyor, ancak kuvantum olasılığının temeli oluşturma fikri son yetmiş beş yıldır var ve yerini koruyor. Bu konuyla ilgili açıklama basit ve dolaysız: işe yarıyor. Bir diğer açıklama ise biraz dolaylı ve önceki bölümde bahsettiğim bir görüşle ilgili: Elektronlar bilyelerden daha basit nesneler oldukları için keşfedilmesi gereken daha derin katmanları yok.

Eğer bir elektronun kuvantum sıçraması yapacağı zamanı



"Tanrı kurnaz ama kötü niyetli değil." ("Raffiniert ist der Herr Gott/Aber Boshaft ist Er nicht"). Einstein'ın bu sözleri Princeton Üniversitesi'nde JonesHall'da (eskiden Fine Hall'du) bir şöminenin üzerine kazınmıştır Fotoğraf Denişe Applewhite.

belirleyen olasılık bilgisizlik olasılığı olsaydı, bu, biz bilim insanlarının zamanını tahmin edebildiğimiz halde elektronun bu sıçramanın zamanına karar veren gizli özellikleri yanı sıra bizim bilmediğimiz daha pek çok özelliği olduğu anlamına gelirdi. Bu tıpkı ruleti çarkmdaki çelik top gibidir. Topun hangi delikte duracağını bilemememizin nedeni, topun ve çarkın bizim bilmediğimiz pek çok özelliği olması nedeniyledir. Bu özellikler, topun en son duracağı yere karar verir ve özelliklerin tamamını bilseydik ve hareketi büyük bir çabayla hesaplasaydık, onun son duracağı yeri bilirdik diye bizi ikna eder. Elektronun sayısız bilinmeyen özelliği olduğuna dair elimizde kanıt yok ve aslında bilinmeyen özelliği olduğuna dair iyi bir kanıtımız var. Bu nedenle, kuvantum olasılığı temeli oluşturur diyoruz.

Yine de pek çok bilim insanı kuvantum olasılığıyla ilgili hâlâ endişeli. Bu olasılık kuvantum mekaniğini tuhaf yapıyor. Sağduyuya karşı geliyor.

Bazı felsefeler de çelişiyor. Genellikle, yirminci yüzyılın en büyük fizikçisi olarak bilinen ve ilginçtir, kuvantum teorisinin mimarlarından biri olan Albert Einstein, kuvantum olasılığını asla sevmemiştir. Konuşmalarında sık sık Tanrı'nın kumar oynadığına inanmadığını söylememiştir ve 1953'te şöyle yazmıştır, "Bence fiziği böylesine bir kuramsal temele oturtmak son derece rahatsızlık verici. Çünkü nesnel bir tanımlama olasılığından vazgeçmek fiziksel dünya daki sis perdesini kalkmasına engel olur."* Einstein'a ait bir başka ünlü söz ise bir zamanlar Princeton Üniversitesi'ndeki çalışma odasında duruyordu ve daha sonra aynı üniversitede bir taşa kazındı. Bu söz şöyledir: "Tanrı kurnaz ama kötü niyetli değil." Einstein, Tanrı'nın kurnazlığını kabul ediyordu. Söylediğine göre doğanın kanunları hemen ortaya çıkmıyor, onları ortaya çıkarmak için çok büyük çaba harcamak gerekiyordu.

* A. Einstein, "Kuantum Mekaniğinin Kuruluşunun Yorumlanmasındaki Temel Yansımalar" (Almanca), Max Born'a Bilimsel Raporlar Halinde Sunum (New York: Hafner, 1953), sayfa 40.

Ancak evrenin büyük yaratıcısı, tahmin edilemezliği temel kanunların içine sokacak kadar kötü niyetli olamazdı*.

Günün birinde, kuvantumun tahmin edilemezliğinin bir nedeni bulunursa, sis perdesi kalkabilir.

* Einstein'ın Tann'ya geleneksel anlamda inanıp inanmadığı bilinmiyor, ama o genellikle, O'ndan "Tanrı" diye bahsetmiştir.

7. bölüm

Sosyal ve Antisosyal Parçacıklar

Gilbert ve Sullivan'ın *Iolanthe* şiirinde, Er Willis, gece nöbet tutarken düşünceye dalmış bir şekilde şu şarkıyı mırıldanır:

Bazen komik olduğunu düşünüyorum
Doğa her seferinde bir yolunu buluyor
Dünyaya gelen
Her erkek ve her kız
Ya biraz liberal
Ya da biraz muhafazakâr oluyor!

Doğa, parçacıklara da küçük bir seçme hakkı vermeyi başarmıştır:

Bazen bana tuhaf geliyor
(Eğer devam edersem lütfen beni durdurun)
Her fiziksel varlık-
Atom, kuark ya da dev geon-
Ya olmalı bir sosyal bozon
Ya da anti sosyal fermion.*

Her parçacık -ve aslında bir atom ya da molekül gibi parçacıklardan oluşan her varlık- ya bir bozondur ya da bir fermion†. Sizlere daha önceki bölümlerde her türden birkaç parça-

* Şiirsel uyarlama için Adam Ford'a teşekkürler.

† Şiirde adı geçen geon, ortak bir noktanın etrafında kendi yerçekimi güçlerinin etkisiyle duran çok sayıda fotonun bir arada bulunduğu kuramsal bir varlıktır. Evet, fotonlar birbirlerini çeker. Kütlesiz ya da kütleli olsun, tüm konsantre enerji çaba harcayarak yerçekimsel gücü hisseder.

çığı tanıttım. Kuarklar ve leptonlar (her yerde en sık görülen elektron da dahil) fermiondur. Fotonlar, gluonlar ve diğer güç taşıyıcıları bozondur. Her iki türün de pek çok bileşik parçacığın vardır. Örneğin protonlar ve nötronlar fermiondur. Pionlar ve kaonlar bozondur. Burada bir kural dikkatinizi çekti mi? Tek sayıda kuarktan oluşan varlıklar fermiondur. Çift sayıda kuarktan oluşan (ya da bir kuark karşıt kuarktan oluşan) varlıklar bozondur. Daha genel olarak kural şöyledir. Tek sayılı fermiondan oluşan şeyler fermiondur. Çift sayılı fermionlardan ya da *herhangi* bir sayıda bozondan* oluşan şeyler ise bozondur. Bu biraz karışık gelebilir, ama bunu anlamak için işte basit bir yöntem: Her fermiona bir negatif işaret verildiğini, her bozona bir pozitif işaret verildiğini varsayın. Negatif işareti tek sayıyla çarpın, sonuç negatif olur. Negatif işareti çift sayıyla çarpın, sonuç pozitif olur. Pozitif işaretliyi istediğiniz sayıyla çarpın, sonuç pozitif olur.

İşte size küçük bir smav: Çekirdeği 11 proton ve 12 nötrondan oluşan bir sodyum 23 atomu, bozon mudur yoksa fermion mu? Çekirdeği 23 fermion içerdiği yani tek sayılı olduğu için bunun bir fermion olduğunu düşünebilirsiniz, ya da, eğer kuarkları sayarsanız; her bir protondan üç, her bir nötrondan üç olmak üzere çekirdekte toplam 69 tane fermion vardır, bu da bir tek sayıdır. Ama bekleyin. Çekirdeğin etrafında 11 tane elektron var. Bu nedenle kuarklar artı elektronlar 80 yapar, yani bir çift sayı. (ya da protonlar, nötronlar ve elektronların toplamı 34 yapar, yine bir çift sayı). Sodyum 23 atomu bir bozondur. ( )

Bozonlar ve fermionlar birbirlerinden ayırt edilemeyen pek çok özelliğe sahiptir. Örneğin temel ya da bileşik olabilirler. Yüklü (pozitif ya da negatif) veya nötr olabilirler. Güçlü veya zayıf etkileşim kurabilirler.

* Bir çift "karmaşık" foton (10. Bölüme bakınız) basit bir varlık olarak görüldüğü halde, temel bozonlardan oluşan hiçbir bileşik yapı bilinmemektedir. Bileşiklerden oluşan bileşiğe örnek olarak atomlarının tamamı bozon olan bir molekülü verebiliriz. Bu durumda molekül bütünüyle bir bozondur.

Sıfır kütleyi de içeren (en azından foton) çok çeşitli kütle miktarları olabilir. Ancak dönüşe gelindiğinde bunlar farklıdır. Bozonlann tam sayılı dönüşü (0, 1, 2 vb.); fermionların yarım-tek-tamsayılı dönüşü (1-K2, 1-r3, 5^-2 vb.) vardır.

En büyük farkları ise, iki veya daha çok sayılar halinde bir arada olduklarında nasıl davrandıklarıdır. Fermionlar "anti sosyal"dir. Aynı türde iki fermionun (örneğin iki elektronun), aynı anda aynı devinim durumunda olamayacağı *reddetme ilkesine* uyarlar. Bozonlar ise "sosyal"dir. Aynı tür iki bozon aynı anda devinim durumunda olurlar ve böyle olmasını da *tercih ederler* (tekrar sadece matematiksel olan değerlere dikkat çekiyorum).

Bu iki tür parçacık niçin sosyal ya da anti sosyal içgüdülerine göre sınıflandırılıyor? Cevap, bu bölümün sonunda bahsedeceğim, kuvantum mekaniğinin kurnaz ama oldukça basit bir özelliğinde gizli. Bu özellik kuvantum mekaniğine özgüdür. Klasik fiziğe göre, içinde yaşadığımız büyük ölçekli dünyada benzeri olmadığı gibi, ulaşılması çok uzak görülen sonuçlarda bile yaklaşık benzerlikte görülmez.

Fermionlar

1925'de yirmi beş yaşındaki Wolfgang Pauli, reddetme ilkesini ortaya atmıştı. Avusturyalı olan Pauli, Almanya'da eğitim görmüş, sonra İsviçre'de ve oldukça uzun bir süre de Amerika Birleşik Devletleri'nde yaşamıştı. Kariyerinin ilk dönemleri göz kamaştırıcıydı. 1921 yılında Münih'te doktor unvanı aldı ve görelilik kuramıyla ilgili eksiksiz bir araştırma yayınlayarak, konuyu kavrayışından dolayı Albert Einstein'ı şaşırttı. Reddetme ilkesini ortaya koyduktan bir yıl sonra, 1926'da, Werner Heisenberg'in yepyeni kuvantum teorisini atoma uyguladı. 1930'da Zürih'te, otuz yaşında bir profesörken nötrinoyu keşfetti. Sonraki yıllarda, araştırma sonuçlarıyla ilgili konuşma yapan fizikçileri en ön sıradan izlerken kaş-

larını çatıp onları korkutma yeteneğiyle ünlendi. Benim Pauli'yle ilişkim, 1955-56 yıllarında bir grup Alman araştırmacısıyla yaptığım çalışmalar sırasında dolaylı olmuştur. Bu araştırmacılar, Pauli'ye sık sık mektup yazarak parçacık teorisiyle ilgili en güncel görüşlerini anlatırlardı.

Onun bu mektuplara ilk tepkisi hep aynıydı: "Alles Quatsch" ("Tamamıyla saçmalık"). İkinci tur yazışmadan sonra, bu araştırmacıların görüşleri belki doğru olabilir diye düşünürdü. Üçüncü turda ise onları görüşlerinden dolayı kutlardı.

Pauli reddetme ilkesini, fizikçiler için karışıklık ve boşuna uğraşmayla geçen bir düzine yılın sonuna doğru açıkladı. 1913'de, yirmi yedi yaşındaki Niels Bohr hidrojen atomuyla ilgili bir kuvantum teorisi geliştirdikten sonra, fizikçiler Planck sabitinin *h* atomun içinde önemli bir rol oynaması gerektiğini biliyordu. Bohr'un, elektronların sabit durumlarda olması ve fotonları yayarken ve yutarken bu durumlar arasında kuvantum sıçramaları yapmasıyla ilgili görüşlerinin belki de bütün atomlar için geçerli olduğunu düşündüler. Ancak bugüne kadar ayakta durmayı başaran gerçek kuvantum teorisi, 1925'de Werner Heisenberg (yirmi beş yaşındayken) ve 1926'da Erwin Schrödinger (yirmi sekiz yaşının sonlarmdayken) tarafından, teorinin bağlantısı yapılmamış sonuçlan birleştirilerek yaratılmıştır. Pauli'nin reddetme ilkesi bu devrimi başlatan bir parçadır.

Reddetme ilkesini açıklamaya başlamadan önce, *devinim durumu* ve *kuvantum sayısını* açıklamalıyım. Bir elektronun belirli bir devinim durumda olması, ya da belirli kuvantunij sayılarının olması ne anlama gelir?

Tamamıyla düz bir yolda, sabit hızda, batıya doğru giden bir otomobil, belirli bir devinim durumundadır denebilir. Bu "durum", arabanın nerede olduğunun söylenmesiyle değil nasıl hareket ettiğiyle (hangi hızda ve hangi yöne) tanımlanır. Aynı hızda, aynı yönde ve aynı otoyolda giden başka bir araç, birbirlerinden uzakta bile olsalar, ilk araçla aynı devinim durumundadır. Başka bir otomotiv örneği verecek olursak; bir

Indianapolis yarış arabası yolunda hızla ilerlerken, her turnede süratini ve hızlanmasını aynı noktalarda değiştiriyorsa, belirli bir hareket halindedir. Eğer iki araba, farklılıkları ne olursa olsun, aynı hız ve hızlanma sürecini izliyorsa, bunlar aynı devinim durumunda demektir. Dünyanın etrafında dönen bir uydunun devinim durumu, belirli bir zamanda nerede olduğuyla değil, enerjisi ve açısal momentumuyla tanımlanır. Başka bir uydu uzun, ince, elips şeklinde bir yol izlerken, ilk uyduyla aynı enerjiye ama daha az açısal momentuma sahip olabilir.

Bu uydu ilkinden farklı bir devinim durumundadır. Bu nedenle bir nesnenin devinim durumu, devinimin bazı özel bölümlerine değil toplamına bağlı olan bir "küresel" özelliktir.

Bir fizikçi, bir atomun içindeki elektronun hareketinin detaylarını takip edemez; doğa buna izin vermez. Mevcut olan tek bilgi küresel bilgidir. Bu sanki, İndianapolis yarış arabası çok hızlı hareket ettiği için, genel bir bulanıklık dışında hiçbir şey görememeniz gibidir. Onun yarış parkuruyla sınırlı olduğunu bilirsiniz, belirli bir ortalama hızda gittiğini bilirsiniz, ama herhangi bir zamanda nerede olduğunu bilemezsiniz. Atomun içindeki hareket halindeki bir elektronun durumu da bulanıktır, belirli bir yerde olma olasılığı vardır, ya da farklı bir yerde olma olasılığı vardır.

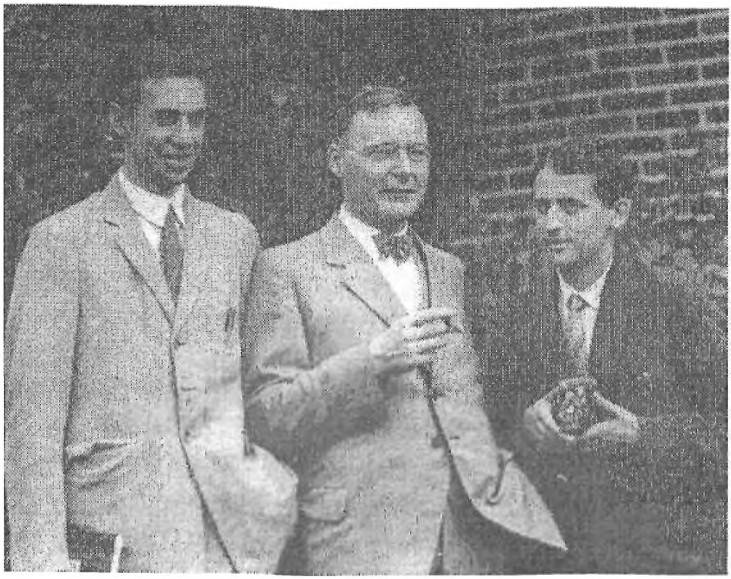
Ancak elektronla ilgili her şey bu kadar belirsiz değildir. Belirli bir enerjisi, açısal momentumu ve yörüngesel hareketinin eksene yönelimi olabilir. Bunlar, durumu açıklamak için sayılardan yararlanabilme olasılığı olduğunu gösterir, durumun belirli enerjisinin sayısı, açısal momentumunun sayısı ve açısal momentumun yönelim sayısı gibi. Bu üç fiziksel nicelik *sayılarla ifade edilebildiği* için (sadece belirli farklı değerler olabilir), durumu tanımlayan numaralar da niceldir. Bunlara *kuvantum sayıları* denir. Örneğin *temel kuvantum sayısı n* için 1, en düşük seviye enerjisi için 2, bir sonraki seviye için 3 vb. seçilmiştir. Bu sayılar, izin verilen enerjiler merdivenindeki seviyelerinin yerini söylerler. Açısal momentumu 1

birimiyle ölçen açısal *momentum kuvantum sayısı (£),* sıfır ya da negatif bir tam sayı olabilir. Son olarak, *yönelim kuvantum sayısı (m), -t* ile *+£* arasında değişen negatif ve pozitif değerler alabilir.

Bohr, basit kuvantum sayısı *h* ile yetinmiştir. Daha sonraki yıllarda, fizikçiler bir elektronun devinim durumunun tam olarak tanımlanabilmesi için yukarıda bahsedilen üç kuvantum sayısına (n, *t* ve *m)* ihtiyaç olduğu sonucuna vardılar. Ayrıca elektronların atomlardaki "kabuklar"ı işgal ettikleri ve hep birlikte en düşük enerji seviyesinde toplanmadıkları sonucuna da varmışlardır. Bu sonuç, periyodik tablonun açıklaması gerektiğini ortaya koymuştur. Görünüşe göre ilk kabuk iki elektron tutabiliyordu, bir sonraki kabuk sekiz elektron, bundan sonraki ise yine sekiz elektron tutabiliyordu. Ancak bunun mantıklı bir açıklaması yoktu -ta ki Pauli ortaya çıkana kadar.

Pauli'nin iki katkısı oldu. Bu katkılardan birincisi belirli bir devinim seviyesini işgal etmek için, reddetme ilkesi birden fazla elektrona izin vermiyor diye söylemiş olmasıydı. İkincisi, bir elektronun, sadece iki değer alabilen (en uygun olarak +İ4-2 ve - 142 seçilmişti) dördüncü bir kuvantum sayısı ile tanımlanan, bir ilave *özgürlük derecesi* olması gerektiğini söylemesiydi.

Devinim seviyesi bir dizi kuvantum sayısıyla tanımlandığı için, reddetme ilkesini başka bir şekilde ifade etmenin yolu, bir atomun içindeki her elektronun farklı kuvantum sayı dizilerinin olduğudur. (Pauli bu şekilde açıklamıştır.) Formül Pauli'nin, niçin birinci kabuğun iki elektron, ikinci kabuğun sekiz elektron içerdiğini açıklamasına fırsat tanıdı. En alt kabukta bulunan iki elektronun her ikisi de *n*-\, *l* = 0 ve m=0 değerlerine sahiptir, ancak dördüncü kuvantum sayısında zıt değerler alırlar: biri +1-4-2 ve diğeri - 1-42 olur. İkinci kabukta *n = 2* değerini alan iki elektrondan oluşan bir grup ile altı elektrondan oluşan bir başka grup, yani toplam sekiz elektron vardır. İki elektron f = 0 ve m = 0 değerini alır, bunlardan Öi-



George Uhlenbeck (1900-1998), solda, ve Samuel Goudsmif (1902-1978), sağda, profesörleri Hendrik Kramers'in (1894-1952) yanında, Michigan, Ann Arbor'da bir yaz okulunda, 1928. Fotoğraf AİP Emilio Segre Görsel Arşivi, Goudsmit Koleksiyonu.

risi Pauli'nin yeni kuvantum sayısının her değerine sahiptir. Altı elektron, $\pounds = l$ değerini alır, m'nin üç değerini alır (- 1,0 ve +1) ve yeni kuvantum sayısının iki değerini alır. Eğer dördüncü kuvantum sayısı olmasaydı, reddetme ilkesi ilk iki kabuğun içindekileri 2 ve 8 yerine 1 ve 4 olarak tahmin edecekti. Pauli'nin yeni kuvantum sayısı, sayıları ikiye katlayarak gerekli düzeltmeyi yaptı Periyodik tabloyu açıklayan bireysel elektron kuvantum sayıları, sanki fizikle kimyayı birleştirmişti -bu gerçekten de ilginç bir gelişmeydi*.

*Reddetme ilkesi elektron dönüşüne en basit uygulamasında, ilk üç kabuğun gözlemlenen 2, 8 ve 8 (dördüncü kabukta 18) elektron yerine, sırasıyla 2, 8 ve 18 elektron içermesi gerektiğini tahmin ediyordu. Bu fark çabuk anlaşıldı ve Pauli'nin görüşlerinde değişikliğe gerek olmadı. Bu fark, farklı elektronların bir kısmının çekirdek yakınında hareket edip onun tüm gücünü hissetmesi, ba-

Reddetme ilkesi, Hollandalı iki genç, Samuel Goudsmit (yirmi iki) ve George Uhlenbeck (yirmi dört) tarafından dördüncü kuvantum sayası yorumlanmadan hemen önce Pauli'nin ağzından çıkmıştı*. Onlara göre bu prensip elektronun döndüğüne ve bu dönüşün değerinin (l-r2)7i olduğuna işaret ediyordu. Bu durumda, Pauli'nin iki değeri olan kuvantum sayısı, bu büyüklükteki iki dönüşün olabilecek iki yönelimini açıkça yansıtıyordu. Bu yönelim "yukarı" ya da "aşağı" olabilir. Dönüş derhal kabul edildi. Çünkü dördüncü kuvantum sayısının niçin sadece iki değeri olduğunu ve sıradan bir atomda, bur durumun enerjisinin niçin kuvantum sayısının değerine bağlı olmadığım açıklıyordu.

Elektronun dönüş yönünü değiştirmek elektronun enerjisini etkilememeliydi. Bu "sıradan" bir atom için geçerliydi. Eğer atom manyetik bir alana konursa, işler değişir. Bu durumda enerji dönüş yönüne *bağlılık* gösterir. Manyetik alanlardaki atomlar tarafından yayılan tayfların analizi, elektron dönüşü "yukarı"dan "aşağı"ya geçtiğinde enerjisinde çok az değişiklik olan, dönen bir elektronla tutarlı olan bir model ortaya çıkmıştır.

1926'da reddetme ilkesinin ardından, elektron dönüşünün ve kuvantum mekaniğinin yeni teorisinin keşfiyle, İtalyan Enrico Fermi ile İngiliz Paul Dirac (o sırada ikisi de yirmili yaşlarının ortasındaydı), birbirlerinden bağımsız olarak Pauli'nin çalışmasını genelleştirdiler. Parçacık "istatistikleri"ni araştırarak, reddetme ilkesine elektronların mı yoksa başka tür parçacıkların mı uyduğunu bulmaya çalıştılar. Yani, bir

zılarının ise uzakta iç kabuklardaki elektronlar tarafından "siperlenmesi" nedeniyledir. Sonuç ise periyodik tabloyu tam açıklayan enerji-seviye düzeninin "bozulması"ydı.

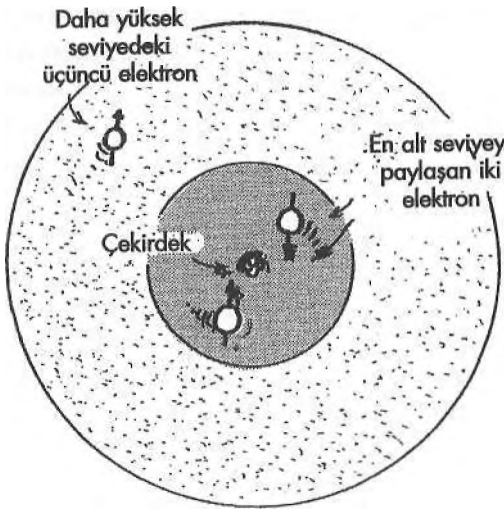
*Goudsmit ve Uhlenbeck daha sonra Amerika Birleşik Devletleri'ne yerleştiler. Uhlenbeck, Rockefeller ve Michigan Üniversitelerinde profesör unvanıyla çalıştı. Goudsmit, Amerika'nın en ünlü fizik dergisi olan *Physical Review'\m* editörü oldu. Avrupa'da İkinci Dünya Savaşı bitmeden önce, görevi Alman bilim insanları tarafından atom bombasıyla ilgili ne gibi ilerlemeler yapılmış olduğunu bulmak olan Alsos misyonunun başkanlığını yaptı.

atomun içinde veya başka herhangi bir yerde, bu türde iki ya da daha fazla parçacık bir araya geldiği zaman, bunların nasıl davrandıklarını keşfettiler. Bugün *Fermi-Dirac istatistiği* dediğimiz sistemi keşfettiler. İnceledikleri parçacıklara bugün *fermionlar* diyoruz. Daha sonra Pauli, matematiksel olarak yarım -tek- tamsayılı dönüşü olan (1^2, 3+2, 5-f2 vb.) her parçacığın bir fermion olduğunu buldu.

Elektronların reddetme ilkesine uymadığı bir dünya hayal edin. Bunun sadece hayal dünyasının ötesine geçmeyeceğinden emin olabilirsiniz çünkü böyle bir dünya da yaşayan hiçbir varlık olmazdı, sadece en sıkıcı türde kimya olurdu. Periyodik tablonun ilk iki elementi olan hidrojen ve helyum bugünkü dünyamızdaki haline çok benzerdi. Ancak üçüncü element olan lityum daha sabit olurdu, yani kimyasal olarak helyumdan daha az aktif olurdu. Lityum atomundaki üç elektron, aynı düşük enerji durumuna *(n=l)* sahip olurdu, ama gerçek bir lityum atomunda üçüncü elektron, lityumun güçlü kimyasal aktivitesini sağlayan bir düzenleme için daha yüksek bir enerji seviyesinde olmalıdır. Periyodik tablodaki her elementin atomsal elektronları ilk kabukta toplanırdı. Her element kendinden bir önceki elementten daha ağır olurdu.

Bu defa elektronların reddetme ilkesine *uyduğu,* ama dönmedikleri bir dünya hayal edin. Bu, çok ilginç ve renkli bir dünya olurdu, ama bizim yaşadığımız dünya dan çok farklı olurdu. Bu dünyadaki birkaç elektron tabakası, sırasıyla 1,4 ve 4 elektron tutardı, element numarası 2 olan helyumun ilk katmanında sadece bir elektron olurdu.

Diğer elektronu ise, kendine daha yüksek enerji durumunda bir ev bulmak zorunda kalırdı. Helyum bildiğimiz asil gazlardan biri olacağına (yani başka elementlerle birleşmeyeceğine), kimyasal olarak aktif olurdu. İlk asil gaz element numarası 5 olan boron olurdu. Bu kuramsal dünyadaki periyodik tablo, bizim dünyamızın periyodik tablosundan iki kat fazla elemente sahip olurdu. Bu ilginç kimyanın sonunun nereye varacağını kim bilebilir?



Şekil 21. Lityum atomu.

Sizlere bu iki fantastik dünyayı, elektronların dönmesinin ve reddetme ilkesine uymasının ne kadar dikkate değer (ve harika) olduğunu vurgulamak için anlattım. Atomlardaki devinim seviyelerini tanımlayan kuvantum sayıları ile periyodik tablodan çıkan her şeyi açıklayan kimya ve hayat arasındaki bağlantıdan daha müthiş bir bağlantıyı fizikte düşünemiyorum. Hayat veren oksijen olduğu gibi davranır, çünkü her oksijen atomunda bulunan sekiz elektron, hiçbir iki elektron aynı devinim seviyesinde olmasın diye yörüngesel ve dönüş açısal momentumlarını belirli şekillerde düzenler. Yaşayan maddenin omurgası olan karbon atomu, sayısız başka atomla elektron paylaşımı yapmak için birleşir, çünkü karbon atomunun ikinci katmanı sekiz elektron tutabildiği halde, dört elektron tutarak yarı dolu bir haldedir.

Bu sekiz sayısı, sıfır ya da bir birimlik yörüngesel açısal momentuma ve bir-yarım birimlik dönüş açısal momentumuna sahip elektronların, hiçbir kuvantum sayısını iki katına çıkarmadan kendilerini düzene sokabildikleri yöntemleri göste-

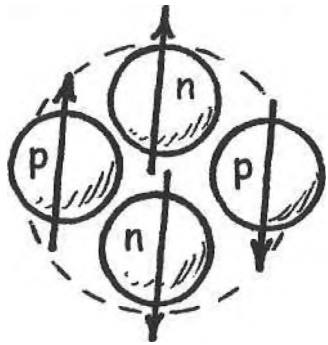
rir. Bu mucizenin açıklaması periyodik tabloda, dönen elektronların reddetme ilkesine uyması mucizesinde yatar.

Reddetme ilkesinin yararlı sonuçları, sadece atomlarda görülmez. Aynı hareket durumunu paylaşmaktan kaçınması gereken atomun çekirdeklerindeki fermion dediğimiz nötron ve protonlarda ve çok sayıda elektronun kendilerini uzaklara yaydığı ama hâlâ herhangi bir enerji durumunu iki katma çıkarmaktan kaçındığı metallerde de bu sonuçlar görülür.

Çekirdekler

Çekirdeğin içinde iki proton aynı kuvantum sayı dizisine sahip olamaz, nötronlar için de durum aynıdır; ancak bir proton ve bir nötronun aynı devinim seviyesinde olması için hiçbir engel yoktur. Reddetme ilkesi sadece *benzer* fermionlar için geçerlidir. Çekirdeğin içi, erkeklerin birbirlerinden çekindiği ama kızlarla çalışmaktan rahatsızlık duymadığı, kızların da birbirlerinden çekindiği ama erkeklerle çalışmaktan rahatsızlık duymadığı karma bir yurda benzer. Reddetme ilkesi, Güneş'e ve yıldızlara güç veren birleşme sürecinin niçin çok fazla enerji yaydığının açıklanmasına yardım eder. Hidrojenle kaynaşma sonucu oluşan helyum 4'ün çekirdeği özellikle hareketsizdir. Helyum 4'ün iki nötron ve iki protonu en alt enerji seviyesindedir, yani hepsi birinci katmanda bulunur. Bu dört parçacık, bir araya gelerek, çekirdekteki en düşük enerji seviyesine inerken çok büyük bir enerji açığa çıkarırlar. İşte bu nedenle Güneş parlar.

1948'e kadar fizikçiler, atomlarda olduğu gibi çekirdeklerde de katman yapısı olduğunu fark edememişlerdi. Çekirdeğin içindeki proton ve nötronların, gezegenler gibi gezineceğine, bir sıvının içindeki moleküller gibi kol kola döneceklerini tahmin etmişlerdi. İlginç bir şekilde, çekirdeğin bu *sıvı damlacığı modeli,* bir çekirdek bölünme teorisi oluşturulmasında işe yaramıştır -hatta bu model, uranyum 235'in çekir-



Şekil 22. Bir helyum atomunun çekirdeği.

değinde olduğu gibi, henüz keşfedilmemiş olan plütonyum 239'un çekirdeğinde yavaş nötronlarla bölünmeye hassas olduğunu tahmin etmeye yaramıştır. Ancak daha sonra kapalı katmanlarla ilgili kanıtlar çoğalmıştır, belirli enerji seviyesini dolduran belirli sayıdaki nötron ve protonlar, ilave çekirdeksel parçacıkların daha yüksek bir enerji seviyesinde bulunmasını istemiştir.

Çünkü bu kapalı-katman sayıları ilk başta oldukça gizemliydi, hatta bunlara *sihirli sayılar* dendi. (Bu terimi muhtemelen Princeton'da fizikçi olan Eugene Wigner bulmuştur). Chicago'da Maria Mayer* ve ondan bağımsız olarak Heidelberg'de Hans Jensen çekirdeğin katman modelini geliştirdi, bu model sıvınınkine benzer özellikler göstermesine rağmen çekirdeklerin, reddetme ilkesine titizlikle uyan çekirdek yörüngesindeki fermionlann varlığını kanıtladığının farkına vardı.

Sihirli sayılardan (kapalı katman) iki tanesi 82 ve 126'dır.

*Eşi Joseph Mayer kimya profesörlüğünün keyfini sürerken, Maria Mayer uzun yıllar alt seviyelerde öğretmenlik ve araştırmalar yaparak kendini mutlu etmeye çalışmıştı. 1950'lerde nükleer araştırmaları tartışmak için onu görmeye gittiğimde, biri Argonne Ulusal Laboratuvarında, diğeri Chicago Üniversitelerinde olmak üzere iki yerde yan zamanlı çalışıyordu. Sonunda eşi ve kendisi San Diego'daki California Üniversitesinde profesörlük unvanı aldılar. Maria Mayer 1963'te Nobel Ödülü aldı.

Tesadüfen, kurşun 208'in çekirdeğinde 82 proton ve 126 nötron vardır. Bu nedenle kurşun iki kat sihirli ve sonuç olarak özellikle hareketsizdir. Bir parçacık eksiğiyle en ağır hareketsiz (radyoaktif olmayan) çekirdek olma unvanını kaçırmıştır. Bu şeref, 83 proton ile 126 nötron içeren bizmut 209'a aittir. Bundan daha ağır olan bütün çekirdekler radyoaktiftir. Daha ağır elementler bulmak için yapılan güncel araştırmalarda fizikçiler, çekirdeklerin içindeki enerji seviyeleri teorisine dayanan bir umutla, 114 protonlu bir "hareketsizlik adası"nın (asında pek de hareketsiz olmayan bir ada denmeli) var olduğunu ispatlamayı umuyorlar.

Aslında, günümüzde bilinen en ağır element, 1999'da Rusya, Dubna'da keşfedilen 114 numaradır (henüz bu elemente isim verilmemiştir). Onun otuz saniyelik "uzun" ömrü, bu proton sayısının daha hareketsiz olduğu görüşünü desteklemektedir. (Bilinen ikinci en ağır element olan 112 numara, 1996'da Almanya, Darmstadt'da* keşfedilmiştir. Bu element sadece 280 ms yaşar: yani ömrü nano saniyenin üçte birinden daha az bir süredir.) Büyük çabalara rağmen 114 numaradan daha ağır bir elementin bulunamaması 114'le ilgili özel bir durumun olduğunu gösteriyor, bu durum çekirdeğin içindeki nükleonların (nötronlar ve protonlar) davranışlarının reddetme ilkesi tarafından yönetildiği şeklindeki daha derin bir kanıtla ilgilidir, f

"Katman" hemen hemen aynı enerjiye sahip olan bir dizi devinim seviyesini tanımlamak için pek de iyi bir terim değil-

* Dubna ve Darmstadt'da yapılan keşifler iki ağır element olan dubnium (105) ve hassium (108) elementlerinin isimlerinde fark edilebilir. (Latince Hesse denilen Hassias, Darmstadt'ın içinde bulunduğu bir Alman eyaletidir.) Ayrıca, bulunan dört elementten ikisine, araştırmacılar onları California, Berkeley'da keşfettikleri için berkelium (97) ve californium (98) denmiştir, diğer ikisine ise araştırmacılardan Ernest O. Lawrence ve Glenn T. Seaborg'un isimleri verilerek lawrencium (103) ve seaborgium (106) denmiştir.

t 2002'de bir grup bilim insanı 116 ve 118. elementleri bulduklarını öne sürdüler, ama bunu destekleyen bazı bilgilerin uydurulmuş (üzüntü veren ve nadir görülen ama yine de arada bir rastlanan bir fizik fenomeni) olmasının ispatlanması üzerine, öne sürülen bu iddia geri çekildi.

dir, çünkü bir elektron, proton ya da nötron, belirli bir enerji durumunda kendini ince bir katmanın üzerine yaymaz. Parçacığın olasılık bulutu bir hacmin üzerine yayılır ve farklı katmanlar aynı boşluğun bir kısmını paylaşarak üst üste gelirler. Belirli bir hareket durumunun enerjisi ve açısal momentumu tam olarak tanımlanabilir, ama parçacığın yeri tam olarak tanımlanamaz. Bu, özellikle bir çekirdeğin içindeki kalabalık nükleonlar için doğrudur.

Bir dizi katmandan daha iyi bir görsel model, her kattaki insan sayısı sınırlanmış olan çok katlı bir apartman olabilir (restoranlardaki ve diğer kamu alanlarındaki, azami insan kapasitesini gösteren işaretleri hatırlayın). Apartman sakinlerinden olan iyi fermionlar kapasite sınırlaması kuralına kesinlikle uyacaklardır. Üstelik bunlar fermion olarak yazın ve kışın farklı davranacaklardır. En soğuk havalarda gitmeleri gerekenden birazcık daha yukarı bile gitmeyeceklerdir. Mümkün olabildiğince çok sayılar halinde alt katlarda toplanacaklardır. Bir insan yukarıya, sadece aşağısının tam dolu olmasının onu zorlaması sonucu çıkar.

Sıcak yaz havasında ise, hâlâ alt katlar için genel bir tercih söz konusu olsa da, bazı insanlar alt katlar tamamen dolu olmamasına rağmen üst katları tercih ederler. Eğer apartman sakinleri Fermi ve Dirac'ın istatistiğine uysaydı, bazı fizikçiler her mevsimde her katta tam olarak bunların kaç tanesinin olduğunu bulabilirdi.

Metaller

Apartman örneği biraz yapay gibi gözükse de, bir metalin içindeki elektronları çok güzel tarif eder. Mutlak sıfıra yakın bir sıcaklıkla ("Kışın en soğuk günleri"), elektronlar, en alt enerji seviyelerini birbiri ardına, tüm elektronların sığabileceği yüksekliğe kadar doldururlar. Yüksek sıcaklıklarda ("yaz"),

bazı yüksek enerji seviyeleri kısmen dolar, elektronların küçük bir bölümü daha yüksek enerji durumlarına taşınır. (Apartman ile metal arasında bir fark var. Metalde, enerji -katman modelinde boşluklar oluşabilir. Bu, sanki apartmanın alt ve üst katları arasındaki bazı katların eksik olması ve bu katların yerinde hava ile tahminen direklerin olması gibidir. O kısımda insanlar yoktur, sadece boşluk vardır.)

Apartman örneği genel hatlarıyla atom ve çekirdekler için de uygundur. Aradaki fark, bir atomun içinde izin verilen seviyeler arasındaki büyük enerji farkıdır. Daha büyük bir fark ise, çekirdekteki enerji seviyeleri arasında, enerji seviyeleri çok yakın aralıklarla olan metale göre, düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık arasında oldukça büyük bir fark olmasıdır. Atom için oda sıcaklığı mutlak sıfıra eşit sayılır. Bir atomun içindeki elektronlardan bir kısmının, kendiliğinden daha yüksek enerji seviyelerine atlaması için binlerce derecelik sıcaklık gerekir, çekirdekte meydana gelecek benzer bir olay için ise milyonlarca derecelik sıcaklık gerekir.

Bozonlar

1924'de Dakka Üniversitesi'nde* fizik profesörü olan otuz yaşındaki. Satyendra Nath Bose, Berlin'deki Albert Einstein'a bir mektup gönderdi.

Mektubun içinde, önde gelen İngiliz dergilerinden *Philosopical Magazine* tarafından reddedilmiş olan "Planck Kanunu ve Hafif Miktarlar Kuramı" başlıklı çalışması vardı. Reddedilmekten dolayı cesareti kırılmayan Bose, belki Hint pazarı için Almanca'dan İngilizce'ye çevirdiği görelilik metninin, belki de çalışmasının bazı önemli şeyler içerdiği düşüncesinin verdiği cesaretle, dünyanın en ünlü fizikçisine yaklaşmaya karar vermişti.

Bose'un "Planck Kanunu" başlıklı çalışması, sizlere be-

*Şu anda Bangladeş'in başkenti olan Dakka, o zamanlar Hindistan'ındı.

şinci bölümde anlattığım, Max Planck'in 1900 yılında tanıttığı, basit bir sıcaklıkla çevrili farklı frekanslardaki radyasyonlar arasındaki enerji dağılımı yani *kara vücutlu radyasyon ya da boşluk radyasyonuyla* ilgili matematiksel kanundu. Planck'e göre $E = hf$ formülü, / frekansındaki bir fotonun enerjisini değil bir nesnenin radyasyondan alabileceği ya da radyasyona verebileceği asgari enerjiyi temsil ediyordu. Planck ve kendinden sonra gelen fizikçiler yaklaşık çeyrek yüzyıl boyunca, miktarı olan şeyin radyasyon değil radyasyondan nesneye ve nesneden radyasyona olan enerji transferi olduğunu düşündüler. Bu gerçeğe rağmen Einstein, 1905'de fotonu bulmuştu (ancak isim çok daha sonra koyuldu)* ve Arthur Campton 1924'de foton-elektron yayılımının kanıtını görmüştü. Bose 1924'de çalışmasını hazırlarken, "hafif miktarlar"! (fotonlar) hâlâ kuramsal varlıklar olarak görüyordu. Onun bu çalışması, fotonun *kuramsallıktan* kabul edilen gerçeğe dönüşmesinde çok önemli bir rol oynayacaktı.

Einstein'a gönderdiği çalışmasında Bose, Planck kanununa, birbirleriyle etkileşimi olmayan bir "gaz" ve "hafif miktarlar" içeren, ayrıca başka "hafif miktarlar"ın aynı durumda olduğuna bakmaksızın bu enerji seviyesini işgal eden radyasyonun olduğunu varsayarak ulaştığını yazmıştı†". Einstein derhal, Bose'un bu yaklaşımının Planck'in özgün buluşundan bu yana atılan dev bir adım olduğunu fark etti, ayrıca hafif miktar gerçeği için dolaylı ama güçlü bir kanıt sağladığını düşündü.

Einstein, Bose'un çalışmasını bizzat İngilizce'den Almanca'ya çevirdi ve önde gelen Alman dergilerinden *Zeitschrift für Physik'de* yayınlanmasını özellikle istedi.

Bose'un çalışmasından çok etkilenen Einstein, elektromanyetizma ile yer çekimini birleştirme çabasını geçici olarak bir kenara bırakarak, atomlar fotonlarla aynı kurallara uy-

*"Foton" terimini Gilbert Lewis 1926 yılında buldu.

† Bose'un, gelecek yıl geliştirilecek ve daha sonra Pauli tarafından elektron ve fotonlar için kullanılacak olan reddetme ilkesi ile ilgili hiç bir fikri yoktu.

salardı nasıl davranırlardı diye düşünmeye başladı. Bose'un çalışmalarına dayanan araştırması aynı yıl içinde yayınlandı. Böylece ortaya bugün *Bose-Einstein istatistikleri* dediğimiz kavram çıktı. Bundan birkaç yıl sonra, Paul Dirac, bu istatistiksel kurallara uyan parçacıklara *bozon* denmesini önerdi*.

Einstein'ın çözdüğü şeylerden biri, son derece düşük sıcaklıkta bir atom gazına ne olduğuydu. (Atomlarının Bose - Einstein istatistiklerine uyduğunu varsaydı, tıpkı bütün atomların yarısının uyduğu gibi). Gelin yine apartman örneğine dönelim. Apartmanda yaşayan bozon sakinler için birinci katı ya da herhangi bir katı kaç sakinin işgal ettiğiyle ilgili bir sınırlama yoktur. Bu durumda bütün bozonların belirli bir toplantıda en alt enerji seviyesinde toplandıklarını düşünebilirsiniz. Gerçekten de böyle bir şey yapma eğilimindedirler, ancak eğilim sadece son derece düşük sıcaklıklarda tam olarak görülür. "Ilık havalar"da bozonların bir kısmı birinci katta toplanırken, pek çoğu da üst katlara yayılır. Sıcaklık sadece Antartika seviyesinin altına düştüğü zaman (aslında mutlak sıfırın milyonda birinden daha düşük derece), bütün bozonlar en alt enerji durumu olan birinci katta toplanırlar. Apartman örneğini biraz daha ileriye götürecek olursak; Einstein, bu koşulda bozonların sadece aynı hatta yani aynı enerjide kalmayıp, kendilerini bu kata eşit bir şekilde yayacaklarını da fark etmiştir. Kolleksiyondaki bütün bozonlar, tamamıyla üst üste olabilmek ve iç içe geçebilmek için aynı enerji seviyesinde olacaktı. Her biri bir katı işgal edecekti. Her atom kendini diğer atomlarla aynı yayılım olasılığıyla yayar (buna günümüzde *Bose-Einstein yoğunluğu* diyoruz). Bose-Einstein yoğunluğu teorisini laboratuvarda tutturabilmek ve üretebilmek, deneyi yapan fizikçilerin yetmiş yılını aldı. Gecikmenin temel nedeni, dereceyi, gereken olağanüstü düşük dereceye indirememenin yarattığı büyük güçlüktü. Ne Bose ne de Einstein, bozonların bu önemli davranışının doğ-

* Alçak gönüllüliğüyle tanınan Dirac, özelliklerini Fermi'yle birlikte keşfettiği parçacığa da *fermion* adını vermişti.

rulandığını görecek kadar yaşayabildi.

Fermionlarla bozonlar arasındaki farklardan biri sayılardır. Kanıtlar, evrendeki fermionların sayısının sabit olduğunu (karşıt fermionlara negatif parçacık numarası verildiği takdirde)*, ama bozonlarm sayısının değişebileceğini gösteriyor. Fermion kuralı her bir parçacık reaksiyonunda rol oynuyor. Örneğin bir negatif muonun bir elektron, bir nötrino ve bir karşıt nötrinoya dönüşmesinde,

H - ^ e ' + v^ + v_e,

dönüşümden önce ve sonra bir fermion var (negatif parçacık numarasını karşıt nötrinoya veren):

1 -> 1 + 1 + (- 1)

Benzer şekilde nötron dönüşümünde,

n —> p + e" + v_e.

dönşümden önce ve sonra yine bir fermion var. Yine,

1 -» 1 + 1 + (- 1).

Bir elektron ve pozitron, bir çift foton yaratmak üzere yok olurken, dönüşüm öncesi ve sonrası fermin sayısı sıfırdır:

e" + e^+ -» 2 y,

1 + (- 1) -> 0

Yukarıdaki örnek bozon sayısının değiştiğini gösterir. Yukarıda bu sayı sıfır ile iki arasında değişmektedir. Benzer şekilde, bir hızlandırıcının içinde bir proton başka bir proton ile çarpıştığı zaman, çok çeşitli bozonlar yaratılabilir. İşte bir örnek:

p + p —> p + n + n^+ + 7t^+ + TI".

Daha önce olmayan üç bozon ortaya çıkıyor, (fermionların sayısı olan iki korunuyor.) Bir örnek daha vermek gerekirse, bir negatif pionun bir muon ile bir karşıt nötroniya dönüşümünde,

*Kara delikler bu kuralın bir istisnası olabilir. Teori der ki: Bir grup fermionu yutan bir kara delik, onların sayısını korumaz, aslında bir kara deliğin içindeki fermionların sayısı anlamsız bir kavramdır.

bozon sayısı birden sıfıra iniyor, fermion sayısı sıfırken yine sıfır oluyor (yine negatif parçacık sayısının karşıt nötrinoya verilmesi nedeniyle). Şu derin soruların yanıtını kimse bilmiyor: Niçin fermionlar sayılarını koruyor?* Niçin bozonlar keyfi sayılarda gelip gidiyor? Niçin kara delikler kurallara karşı geliyor?

Bose-Einstein Yoğunluğu

Kolarado, Boulder'da Astrofizik Laboratuvarı Birleşik Enstitüsünde çalışan Eric Cornell ile Cari Wieman 1995'de bir Bose-Einstein yoğunlaştırıcısı yaratıp, üzerinde çalışmalar yapan ilk kişiler oldularf. Onların ilk başarısı, birkaç bin rubidium atomunu mutlak sıfır derecesinin iki yüz milyarda biri kadar soğutmalarıyla geldi. Bu sıcaklıkta rubidium atomları saniyede 8 milimetrelik ya da saatte 90 feet'lik (27,43 metrelik) bir hızla yavaş yavaş gezinirler (oda sıcaklığı hızlarıyla karşılaştırıldığında saniyede 300 metre, ya da saatte 650 mil [1045,84 m.]). Soğutma ve yavaşlama gerçekten aynı şeydir, çünkü bir atomun ortalama hızı sıcaklığını ölçer. Zamanın rekoru olan 200 nano kelvinlik sıcaklığa ulaşmak için Wieman ve Cornell, *lazer soğutucusu* ve *manyetik tuzak* kullandı. Lazer ışığı atomun yürüyüşünü yavaşlatır, sonra manyetik alanlar onları küçük bir bölgede hapsederken, buharlaştırıcı soğutucu -tıpkı sizin ıslak bir mayoyla üşümenize neden olan olayda olduğu gibi- atomları daha da soğutur.

Rubidium, periyodik tabloda element numarası 37 olan bir elementtir, bu nedenle çekirdeğinde 37 tane proton vardır. Çekirdeğin etrafında ise 37 tane elektron vardır. Yani toplam 74 fermionu vardır.

*Teori bu soruyu yanıtlayabilir. Niçin karşıt parçacıklar negatif parçacık diye sayılmak zorunda? Bu bir sır değil.

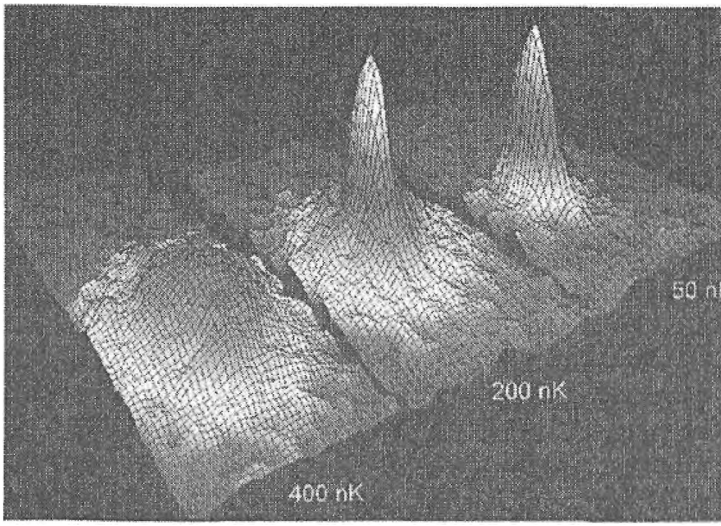
t Bu başarılarından dolayı Cornell ve Wieman, bu alandaki diğer öncü olan MIT'den Wolfgang Ketterle ile 2001 Nobel Fizik Ödülünü kazandılar.



Carl Wieman (doğum 1951), solda ve Eric Cornell (doğum 1961) Colorado, Bouldar'da 1956. Fotoğraf Ken Abbot; Colorado Üniversitesi, Boulder.

Eğer çekirdeğin nötronları çift saydıysa, fermionların toplamı çift sayılıdır ve atom da bir bozondur. Bu durum, rubidium elementinin en yaygın izotopu olan rubidium 85 (48 nötronlu) ve rubidium 87 (50 nötronlu) için geçerlidir. (Kuarkları ve elektronları da sayarak aynı sonuca varabilirsiniz: rubidiumun bu iki izotopu bozondur.) Wolfgang Ketterle, MİT'de bir Bose-Einstein yoğunlaşmasını daha büyük sayılı sodyum atomlarıyla başardı. Daha önce belirtildiği gibi, sodyumun bir atomunda 11 proton, 12 nötron ve 11 elektron vardır, bu yüzden sodyum da bir bozondur.

Bir Bose-Einstein yoğunlaşmasını gözünüzde canlandırmanıza yardımcı olmak için, apartman örneğine geri döneceğim. Yıl 2126. Bir apartmanın birinci katında 85 tane genetik olarak aynı olan birey yani klonlar yaşıyor. Apartman o kadar geniş ki bunlar birbirleriyle hiç karşılaşmıyor. Dışarıdan baktığınızda, hangisinin kim olduğunu bilmeseniz de onları bi-



Wieman ve Cornell'in veri haritası; rubidium atomlarından oluşan bir buhar hücresindö*sıcaklığın 400'den 200, sonra da 50 nano kelvine düşürüldüğündeki hız dağılımı görülüyor (nano kelvin: mutlak sıfır derecesinin milyarda biri). Sıcaklık 200 nk veya daha aşağı olduğunda oluşan tepeler, atomların sıfıra yakın bir hızda hareket ettiği bir Bose-Einstein yoğunlaşması oluşumunu gösteriyor.
Resim: Mike Matthews, Cari Wieman, ve Eric Cornell, Colorado Üniversitesi, Boulder.

reyler olarak görebilirsiniz. Soğutma termostatı 200 nano kelvin'e ayarlandığında, her bir birey apartmanın içine yayılan bulanık bir buhar hücresine dönüşüyor.

Her buhar hücresi diğerleriyle üst üste geliyor, bu nedenle apartman tek bir yoğun buhar hücresiyle doluyor. Dışarıdan baktığınızda, bireyleri tek tek seçebilme şansınız yok. Apartman sanki tek bir büyük su kabarcığına kiralanmışa benziyor. Yine de klonlarm bireyselliği yok olmuyor. Termostat tekrar derecenin milyonda birine döndürüldüğünde, bu buhar hücresi tekrar 85 bireye dönüşüyor.

Fizikçileri şu sora düşündürüyor. Bose-Einstein yoğunlaşması yararlı bir şekilde uygulanabilecek mi? Eğer tarihin yol

göstericiliğine bakılırsa, cevap evet gibi gözüküyor. Maddenin bazı yeni şekillerini anlayıp, kontrol altına alabildiklerinden beri fizikçiler, bu anlayış ve kontrolü yararlı işlerde kullanmanın yollarını bulmuşlardır.

Yoğunlaşmalar, örneğin temel sabit birimlerin doğru olarak ölçülmesinde, veya kuvantum bilgisayarlarında, ya da ışık yerine atom ışınları kullanan bir tür lazerde kullanılabilir.

Niçin Fermionlar ve Bozonlar?

Doğa, her parçacığın aynı devinim seviyesinde toplanarak ya da bunu yapmayı reddederek sosyal ya da anti sosyal olduğunu nasıl düşünüyor? Klasik teori bu soruya bir yanıt bulamadığı gibi yaklaşık bir tahminde de bulunamıyor. Bu nedenle bu soru çok ilginç bir soru. Bir yanıt verebilmek için, kuvantum teorisinin matematiksel ama (umarım) anlaşılabilir bir özelliğine değinmem gerekiyor. Ayrıca cevap, doğada benzer parçacıkların varolduğu gerçeğine de dayanıyor.

Reddetme ilkesi, hiçbir iki fermionun aynı devinim seviyesinde olamayacağını söylemiyor. *Aynı türde* iki fermionun (iki elektron, ya da iki proton, veya iki kırmızı yukarı kuarkm) aynı devinim seviyesinde olamayacağını söylüyor. Benzer şekilde, sadece *aynı türde* iki bozon (iki foton, veya iki pozitif pion, ya da iki negatif kaon) aynı devinim seviyesinde olmayı tercih ediyor. Küçüklüğüne bakmadan, evrendeki her parçacık diğerlerinden farklı olsaydı, bu parçacığın bir fermion ya da bir bozon olmasının bir önemi olmazdı, çünkü o zaman, ferimonların aynı devinim seviyesinde bulunması için bir engel olmazdı; ya da bozonları aynı devinim seviyesine getirmek için dürtmek gerekmezdi. O zaman parçacıkların hepsi, çok az farklı ve bir araya gelmeleri için teşvik edilen ya da edilmeyen beysbol topları gibi olurdu. Atomun içindeki alemde birbirleriyle tıpatıp aynı varlıklar bulmamız gerçeğinin aslında kozmik sonuçları vardır. Eğer, örneğin, elekt-

ronların hepsi tam olarak benzer olmasaydı, atomların içindeki sıralı katmanları doldurmazlardı, periyodik tablo olmazdı ve siz ya da ben olmazdık.

Kuvantum teorisini kendinden önceki teoriden farklı yapan şey, kuvantum teorisinin *gözlemlenemeyen* miktarlarla uğraşmasıdır. Gözlemlenemeyenlerden bir tanesi *dalga fonksiyonu* ya da *dalga genliğidir.* Bir parçacığın belirli bir yerde olması ya da belirli bir yönde gidiyor olması *olasılığı,* dalga fonksiyonunun karesiyle orantılıdır. Bu nedenle kendiyle çarpılan dalga fonksiyonu gözlemlenebilirliği sağlarken, tek başına dalga fonksiyonu bunu sağlayamaz.

Bunun anlamı şudur: Dalga fonksiyonu ister pozitif, ister negatif olsun, onun gözlemlenebilen sonuçları yoktur, çünkü hem pozitif hem de negatif sayıların karesi pozitiftir*. Bu kitabı okurken sizden, her an kemerlerinizi bağlamanızı isteyebilirim (ya da kaykayınızla bir sonraki kilometre gösterge levhasına gitmenizi isteyebilirim). İşte tam sırası.

Eğer bir numaralı parçacık A durumunda ve 2 numaralı parçacık B durumundaysa, bu iki parçacığın kombinasyonunun dalga fonksiyonu A(1)B(2) şeklinde ifade edilebilir. Ama eğer A durumunda 2 numaralı parçacık ve B durumunda 1 numaralı parçacık olursa, ifade A(2)B(1) şeklinde olur. Şimdi karşınızda ayırt edilememezlik meselesi. Eğer 1 ve 2 numaralı parçacıklar tıpatıp aynıysa, hangisinin A hangisinin B durumunda olduğunu bilme şansınız yok. Bu nedenle yukarıdaki iki kombinasyon da aynı fiziksel durumu tanımlar: bir parçacık A, bir parçacık B seviyesindedir. Kuvantum teorisinin ilk araştırmacıları, hangi parçacığın nerede olduğuna "karar verememe" durumuyla başa çıkmak için iki dalga fonksiyonunu toplamak gerektiğini keşfetmişlerdir:

* Hikâyenin tamamı bundan daha karışık. Gözlemlenemeyen dalga fonksiyonu, bir gerçek ile bir *sanal* sayının kombinasyonu olan bir karmaşık sayı olabilir. Bu sayı onu, bir negatif sayının yapabileceğinin daha fazla gözlemlenebilirlikten uzaklaştırır. Gözlemlenebien şey, pozitif değeri, bir karmaşık sayının *mutlak karesidir.*

A(1)B(2)+A(2)B(1).

Bu, ikilemi ortadan kaldıran tatminkar bir çözüm. Aslında bu çözüm, her iki parçacık da her iki durumda olabilir, her bir parçacığın her iki durumdan birinde olma ihtimali yüzde 50'dir der. Eğer yukarıdaki ifadedeki 1 ve 2'nin yerlerini değişirseniz, değişimden sonra elde ettiğiniz ifade değişimden öncekiyle aynıdır. Bu, fiziksel durumla tutarlıdır: İki parçacığın yerlerini değiştirmenin kayda değer bir sonucu yoktur, çünkü bu iki parçacık tıpatıp aynıdır.

Kuvantum teorisi, bu çıkmaza farklı bir çözüm getirilmesine izin verir (yerlerinin değiştiği gözlemlenemeyen benzer parçacıklarla uğraşma çıkmazı). Birleştirilen dalga fonksiyonlarının arasına pozitif yerine negatif işaret konulabilir.
A(1)B(2)-A(2)B(1).
1'le 2'nin yerleri değiştirildiğinde ise,
A(2)B(1)-A(1)B(2).

Başlangıçtaki ifadenin negatifi elde edilir. Ama bu ifade doğrudur, çünkü gözlemlenebilir değer sadece bu miktarın *karesidir* ve bu kare değişken değildir.

Yukarıda gösterilen artı işaretli ilk fonksiyona *simetrik dalga fonksiyonu* denir. Eksi işaretli ikinci kombinasyona ise *asimetrik dalga fonksiyonu* denir. Simetrik dalga fonksiyonu aynı iki bozonu, *asimetrik dalga fonksiyonu* ise aynı iki *fermionu* tanımlar. Teorisyenler toplama ve çıkartma dışında diğer kombinasyonları da denemişlerdir, ancak doğa sadece bu ikisini uygun bulmuştur. Bilinen her parçacık bir bozon ya da fermiondur.

Bozonlarla fermionlar arasındaki büyük fark, bu iki benzer parçacık *aynı hareket durumundayken* ortaya çıkar. Eğer her iki parçacık da A durumundaysa, simetrik kombinasyon şöyle olur:
A(1)A(2) + A(2)A(1),
Bu aslında 2A(l)A(2)'dir. Sorun değil. Bu kombinasyon aynı durumda bulunan bir çift bozonu gösterir. Peki, ya iki fer-

mion aynı A durumundaysa ya da durumunda olmak isterse? Ayni durumdaki benzer iki parçacığın asimetrik dalga fonksiyonu şöyledir:
A(1)A(2)-A(2)A(1).

Bu sıfır demektir! İki terim birbirini götürür. İki fermion aynı durumda *bulunamaz.* Bu, reddetme ilkesini açıklayan şaşırtıcı derecede basit (kurnazlığı itiraf edilen) matematiksel bir nedendir.

Bose-Einstein yoğunlaşmasından periyodik tablodaki tüm elementlere kadar bütün sonuçların, sadece bir artı işaretinden bir eksi işaretine doğru aktığını düşünmek ürkütücüdür. Bu iki seçenek sırasıyla, iki gerçeğe dayanır. Bunlar, kuvantum teorisinin *gözlemlenemeyen* dalga fonksiyonlarını incelemesi ve belirli türdeki parçacıkların birbirinin klonu olması yani tıpatıp aynısı olmasıdır. Doğayı tanımlamak için matematikten yararlanan fizikçilerin, onun gücü karşısında hayretler içinde kalmasına şaşırmamak gerekir.

8. Bölüm

Sabitliğe Tutunmak

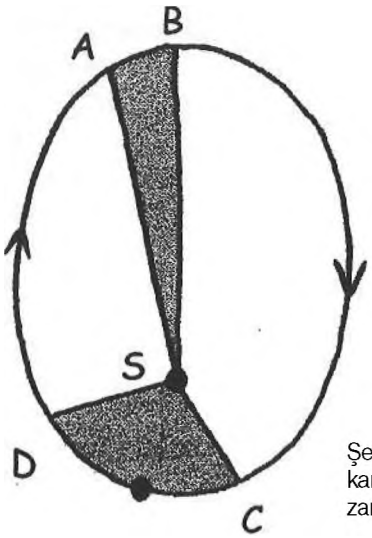
İÖ 5. yüzyılda yaşayan Euripides şöyle söylemiştir: "Her şey değişir." Onunla aynı fikirde olabilirsiniz. Yaşadığınız dünyada karşılaştığınız hiçbir şey sürekli ve değişmez değildir. Heraklitus, Euripides'ten bile önce, "Değişmeyen tek şey değişimdir," demiştir. Fizikçiler, etrafımızdaki her şeyin durmadan değişmesinin kanıtlarını reddetmezler. Ancak doğada bazı şeylerin sabit kaldığını belirlemişlerdir. Böyle niceliklerin "korunduğu" söylenir. Diğerleri değişirken bir tane nicelik sabit kalır diyen kanun, *koruma kanunudur.*

Daha önceki bölümlerde çeşitli koruma kanunlarına değinmiştim. Enerjinin (kütleyi de içerir) korunduğunu biliyorsunuz; momentumun, elektrik yükünün, kuark ve lepton çeşnilerinin ve baryon numaralarının da. Bu kısa liste en önemli korunum kanunlarını içerir. Bu bölümde, listeye birkaç tane daha ekleme yapacağım ve tam olan (şimdiye kadar bildiklerimiz) ile kısmi olan korunum kanunları arasındaki farkı ortaya koyacağım. Ayrıca şu ilginç soruyu irdeleyeceğim: Fizikçilerin doğa için yazdığı senaryoda, korunum kanunları niçin küçük rollerden, baş rollere geçti?

Korunum kanunları fizik tarihinin yeni ziyaretçileridir. Aristo, öncülleri Euripides ve Heraclitus gibi özellikle değişime odaklanmıştır. Modern çağa kadar çoğu bilim insanı da aynı şeyi yapmıştır. Johannes Kepler, on yedinci yüzyılın başında, kendi ikinci kanunu olan gezegenlerin hareketini ortaya attığında, aslında ilk korunum kanunu tanımlamış olabilir. Bu kanun, Güneş'ten bir gezegene hayali bir çizgi çizildiğin-

de, bu çizgi eşit zamanlarda eşit alanlara yayılır. Gezegen Güneş'e yaklaştıkça daha hızlı hareket edip, Güneş'ten uzaklaştıkça yavaşlarken hızını sürekli olarak öyle bir ayarlar ki, çap çizgisinüvyayıldığı alanın oranı sabit kalrr. Bugün, Kepler'in ikinci kanununun, açısal momentum korunumunun bir sonucu olduğunu anlıyoruz. Her gezegen kendi yörüngesini izlerken, hızı, hareket yönü, güneşe olan uzaklığı gibi Özellikler değişken, yörüngesel açısal momentumu sabit kalır. Dünyanın kendi ekseni etrafındaki yirmi dört saatte bir dönüşü de açısal momentum korunumunun bir sonucudur, ancak burada dönüş açısal momentumu söz konusudur.

Kepler'in çalışmasının üzerinden çok fazla zaman geçmeden Galileo Galilei, dış etkenlerin etkilemediği bir nesnenin, süresiz olarak sabit bir hızda hareket ettiğini (bir tür korunum kanunu) fark etti. On yedinci yüzyılın daha ilerleyen bölümünde, Christiaan Huygens ile Isaac Newton momentum korunumunu ortaya koydu. Oysa bu sırada Newton, hareketle ilgili önemli bir çalışmasının içinde yer alan değişim üzerinde odaklanmıştı. On sekizinci yüzyılda Benjamin Franklin'in yük korunumu görüşü ortaya çıktı. Korunum kanunlarına önem kazandıran en büyük adım, bilim insanlarının, enerji korunumunun genel kanununun, mekanik enerji ve ısı enerjisini de içine aldığını ileri sürdükleri on dokuzuncu yüzyıl ortalarında atıldı. O dönemde kimyacılar, kütle korunum kanununa güveniyorlardı. Bu kanun Einstein'm ellerinde parçalandı. Ünlü formülü $E = mc^2$ ile Einstein, kütlenin sadece donmuş bir enerji olduğunu ve daha geniş bir enerji korunum kanunuyla açıklanması gerektiğini gösterdi. (Kimyasal reaksiyonlarda, kütle değişimleri fark edilemez, bu nedenle kütle korunumu kimyacılar için yararlı bir araç olarak kalır. Atomun içindeki parçacıkların reaksiyonlarında ise, kütle değişiklikleri son derece büyük olabilir -kütlenin tamamıyla yok olduğu, bir proton ile bir karşıt protonun yok oluşunu hatırlayın.) Son olarak, çeşni, renk ve parçacık çeşidi korunum kanunları yirminci yüzyılın orta ve sonlarında listeye eklendi.



Şekil 23. Kepler'ın ikinci kanunu: Bir gezegen eşit zamanda eşit alana yayılıyor.

Niçin korunum kanunları doğayı tanımlarken bu kadar önemli bir rol oynuyor? Nedenlerden biri insanların basitliği güzel bir şey olarak görme eğilimi. Hangi görüş, bizi çevreleyen dünyada sabitliğin, sürekli değişimin ortasında olduğu görüşünden daha basit ve daha güçlü olabilir? Bir başka neden ise, korunum kanunlarının simetri ilkelerine bağlı olmasıdır. Bu bölümün ilerleyen sayfalarında, bu büyüleyici bağlantıyla ilgili açıklamalar yapacağım. Bir başka neden ise son derece basit. Bir parçacık reaksiyonunun girdabında, her an neler olduğunu keşfetmek (parçacığın içinde bile) mümkün değildir. Bunun için reaksiyon öncesi ve sonrası görüntüsü oluşturmalıyız. Fizikçi reaksiyondan önce orada ne olduğunu bilir ve reaksiyondan sonra orada ne olduğunu ölçebilir. Aradaki detayların görüntüsü siperlerle engellenir. Teori, aynı anda pek çok farklı şeyin, karmakarışık bir şekilde olduğunu söyler. Düzeni sağlayan ise korunum kanunlarıdır. Bazı nicelikler yara almadan kurtulurlar, sonraki halleri önceki halleriyle aynı kalır.

Değişimin kanunu olan fiziğin klasik kanununa *zorlama*

kanunu denir. Belirli durumlarda neler olduğunu, aslında neler *olması* gerektiğini açıklar.

Eğer Zeus, Güneş'ten belirli bir uzaklığa bir gezegen koyarsa ve onu belirli bir yöne doğru iterse (yani *başlangıç koşullarını* sağlarsa), Nevvton'ın devinim kanunu olaya el koyar ve güneş ile diğer gezegenlerin gücünün etkisi sonucu bu gezegenin bundan sonra sonsuza dek nerede olacağını, daha doğrusu olması gerektiğini söyler. Zorunluluk kanunu normalde bir matematik denklemiyle ifade edilir. Örneğin, duran bir bilyeyi iterek düşürdüğünüzü düşünün. Bir süre sonra ne kadar uzağa düştüğünü gösteren denklem şöyledir: d = (l-f-2) *gf.* Denklem tarif demektir. Bu denklem şunu tarif eder: Düşme süresini saniye cinsinden belirleyin. Karesini alın. Yerçekimi hızıyla (g) çarpın (her saniye kare'de 9,8 metre). Sonucu l-f2 ile çarpın, düşüş mesafesini bulacaksınız. Bu denklem size, bilyenin yere düşene kadar her an nerede olması gerektiği bilgisini verir. Bir parçacık reaksiyonunda ise böylesine detaylı bilgi edinmek mümkün değildir.

Bir korunum kanunu, aynı zamanda bir *yasaklama kanunudur.* Pek çok şeyin olmasına izin verir, ama kanuna karşı gelen bütün olaylar zincirini yasaklar. Örneğin, hızlandırıcıdaki yüksek enerjili bir proton, bir başka protona çarparsa, ortaya çıkması mümkün olan pek çok sonuç vardır. Düzinelerce olası sonuçtan birkaçı şöyle olabilir.

p + p—>p + p + TC⁺-f-Jt+7t°,
p + p —> p + n + Tt⁺ + *n*°,
p + p -» p + A° + K° + 7t⁺.

Ancak hepsi bu kadar değil. Korunum kanunları bize, çarpışmayla yayılan parçacıkların toplam momentumunun başlangıçtaki protonun momentumuna eşit olması gerektiğini; ortaya çıkan parçacıkların toplam yükünün +2 olması; bu parçacıkların baryon sayısının toplam 2 olması gerektiğini; parçacıklar içinde 2 tane fermion olması; ve parçacıkların

kütle enerjisi ile kinetik enerjisinin özgün enerjiye (kütle + enerji) eşit olması gerektiğini söyler. Sonuncu gereklilik, parçacıklardan her biri mevcut enerjinin bir kısmını yuttuğu için, yaratılacak büyük parçacık sayısını kısıtlar.

Kuvantumun *izin vericiliği,* korunum kanununun *yasaklayıcılığıyla* bağlantılıdır. Tek başına korunum kanununun, olası kuramsal reaksiyonların (yukarıda gösterilen üç örnekteki gibi) gerçekten olacağı hakkında söyleyecek pek bir şeyi yoktur.

Ancak fizikçilerin, olası *her* reaksiyonun er ya da geç mutlaka olacağı ihtimaline inanmaları için nedenleri vardır. (İşte bu nedenle bu olaya kuvantum izin vericiliği diyorum. Kuvantum olasılıkları, tüm olasılık kapılarını açar.) Eğer belirli bir enerjisi olan protonlar birbiri ardına proton içeren bir hedefe ateşlenirse, sonuçta ortaya korunum kanununun izin verdiği parçacıklar çıkar, bunlardan kimisi sık sık, kimisi ara sıra, bazısı ise oldukça nadir ortaya çıkar. Bu izin vericilik, korunum kanunlarının yasaklayıcılığına şaşırtıcı bir yardımcıdır. Bir ya da daha fazla korunum kanunu tarafından yasaklanan her şeye *izin vermekle* kalmaz (insan yaşamındaki yasakların işleyişine benziyor), korunum kanunları tarafından yasaklanan her şeyin zorunlu olduğunu da söyler (evinizden işinize giderken yol yapım çalışması nedeniyle normal yolunuzdan gitmenizin yasaklandığını düşünün. Bu durumda sizi işe götürecek mümkün olan her farklı yolu denersiniz)*.

Sabitlik İlkeleri

Korunum kanunları fiziksel dünyada tek tür sabitlik olduğunu ifade eder: belirli fiziksel niceliklerin sabitliği (enerji,

* Bu örneği fizik dünyasının ruhuna daha yakın bir hale getirirsek; işe geç varmanızın da yasak olduğunu hayal edin. Bu durumda mevcut yolların sayısı sınırlanacaktır, çünkü siz, sadece sizi vaktinde işe ulaştıracak yollan tercih edeceksiniz.

momentum vb.). Eşit derecede çarpıcı ve belirgin bir başka tür sabitlik vardır: fiziksel kanunların kendilerinin sabitliği. *Sabitlik ilkesi,* böyle bir değişmezliğin ifadesidir. Deneysel koşullar bir şekilde değiştirilse de, fizik kanunlarının değişmeden kalacağını söyler. *Yer sabitliği* buna bir örnektir: fizik kanunları her yerde aynıdır. Deney yapan bir fizikçinin Illinois, Batavia'daki çalışma yöntemi, İsviçre, Cenevre'de de uygulansa aynı şekilde işleyecek ve aynı sonuçlan verecektir. Bu çok açıktır, çünkü bir yerden başka bir yere gittiğimizde, doğanın davranışında bir değişiklik olmadığını görürüz. Aslında bu, doğanın önemli bir gerçeğidir. Bize yerin homojenliğini gösterir. Yerin her bir noktası, diğer noktalarla eşittir. (Bu açıklama, bu bölümde anlatacağım bir *simetri ilkesine* örnek teşkil ediyor.) Eğer deneyin sonuçları yapıldığı yere göre değişseydi, fizik bilimi olur muydu? Evet, ama fizik çok daha zor olurdu. Fizikçiler sadece fizik kanunlarını bulmakla kalmaz, bu kanunların bir yerden diğerine gösterdiği değişiklikleri de tespit etmeye çalışırlardı. Doğa bize bir iyilik yapmış; yeri homojen yaparak, yer sabitliğini sağlamıştır.

Olduğunu kabul ettiğimiz bir başka sabitlik ilkesi ise *yönün sabitliğidir.* Aletin yönü değiştirilse de, deneyin sonucu değişmez. Proton-proton çarpışmasının sonucu, fırlatılan protonun çarpışmadan önce örneğin doğuya, ya da kuzeye doğru uçtuğuna bağlı değildir. Bu görüş de yine aynı nedenle açıktır. Bizi çevreleyen dünyadan edindiğimiz tecrübeler, bizi buna inandırır. Ama "gerekli" değildir. Aslında bu, sadece, yaşadığımız evrenin bir özelliğidir. Yönleri seçilebilen ve doğanın kanunlarının bu yönlere bağlı olduğu kuramsal evrenler hayal edilebilir. Bizim evrenimizde yön tercihi olmadığından, yerin *izotropik* yani her yöne doğru aynı olduğu söylenir.

Albert Einstein 1905'deki özel görelilik kuramında, *Lorentz sabiti* denilen başka bir sabitlikten bahsetmiştir (bu isim, Einstein'ın matematik formüllerinden yararlandığı önemli bir Hollandalı fizikçi olan Hendrik Lorentz'den gelir). Lorentz sabiti, sabit normal şartlar altındaki doğa kanunları-

mn, bu şartlara uyarak benzer şekilde hareket eder normal şartlarda da yer aldığını belirtir. Bu cümleyi anlamak için, önce *sabit normal şartların* ne olduğunu anlamak gerekir. Sabit normal şartlar, dış etkenlerden etkilenmeyen nesnelerin hareket etmeme durumudur. Yörüngedeki bir uzay gemisinin içinde gezinen bir astronot sabit bir durumdadır; kabinin içinde hareketsiz bir şekilde oradan oraya sürüklenir. Siz de ayakta durduğunuzda ya da sabit bir hızda düz bir otoyolda aracınızı sürerken sabit bir oluşumdasınızdır. (Öte yandan, bindiğiniz araba bir dönüş yaparsa ve siz bir tarafa "savrulursanız", sabit olmayan bir duruma gelirsiniz.)

Lorentz sabitliğini farkında olmadan pek çok kez mutlaka test etmişsinizdir. Otoyolda giderken içeceğinizden bir yudum alırsınız ya da yiyeceğinizden bir lokmayı ağzınıza atarsınız ve bunları dökmezseniz, bunun nedeni doğanın kanunlarının hareket halindeki bir araba ile park halindeki bir arabanın içinde aynı olmasıdır.

Bir uçakta uçarken (sakin havada) yere bir bozuk para düşürürseniz, onun yere düşüşünün havaalanında bekleyen bir uçağın içindeki düşmeyle aynı olduğunu görürsünüz, çünkü doğanın kanunları, uçan bir uçak ile park halindeki bir uçak için yine aynıdır. (Eğer bunun doğruluğunu ölçmek için uçağa bir ölçü aleti götürseydiniz, hareket halindeki uçaktaki bozuk paranın düşmesinin, sabit duran uçaktakiyle her bakımdan aynı olduğunu görürdünüz.) Einstein'ın çalışmasından yaklaşık üç yüz yıl önce Galileo, mekaniğin kanunlarının, sabit durumda olduğu gibi hareket durumunda da aynı olduğunu biliyordu. Einstein'ın dehası (cesareti de diyebilirsiniz), sadece mekaniğin kanunlarının değil *bütün* kanunların normal şartlar altında birbirlerine benzer şekilde hareket ettiğini söylüyordu. Lorentz sabiti ilkesi elektromanyetizma kanunlarına uygulandığında, görelilik kuramının zamanın genişlemesi ve uzayın daralması gibi şaşırtıcı sonuçlan ortaya çıkarır.

Korunum kanunları ile sabitlik ilkeleri farklı fikirler olsa da, artık bunların ortak özellikleri olduğunu görebilirsiniz.

Her ikisi de, diğerleri değişirken sabit kalan bir şeyi açıklar. Yine her ikisi de doğanın tanımlanmasını kolaylaştırır. Sabitlik ilkesinde doğanın kanunları değişmeden kalırken; korunum kanununda belirli bir fiziksel miktar değişmeden kalır. Sabitlik ilkesinde değişim, bir deneyin yapıldığı koşulların değişimidir; korunum kanunlarında değişim ise, bir süreç gelişirken meydana gelen fiziksel değişimdir. Genel ile özel arasındaki farkı da dikkate almak gerekir. Sabitlik ilkesi: koşullardaki *tek bir* değişimde, *bütün* kanunlar değişmeden kalır. Korunum kanunu: mümkün olan bütün fiziksel süreçlerde *bir* nicelik değişmeden kalır.

Tam Korunum Kanunları ve Sabitlik İlkeleri

Büyük ölçekli dünyanın korunan "dört büyük" miktarı -enerji, momentum, açısal momentum ve yük- atomun içindeki dünyada da korunur. Burada şaşılacak bir şey yok, çünkü büyük ölçekli dünya daki her şey tamamıyla atomun içindeki birimlerden oluşmuştur. Bu nedenle, küçükten büyüğe doğru gitme fikrinin rahatlığıyla şöyle düşünebilirsiniz: enerji, momentum, açısal momentum ve yük, büyük ölçekli dünya da korunur *çünkü* bunlar atomun içindeki dünyada da korunuyor. Bu miktarları yöneten korunum kanunlarının doğru olduğu varsayılır.

Tam korunum kanunu, hiçbir karşı konulma durumuna rastlanmamış ve tüm koşullarda geçerli olduğuna inanılan bir kanundur. Üstelik, bu dört kanunun tam olduğuna inanmak için kuramsal bir nedenimiz var. Görelilik ve kuvantum teorileri bu kanunlarm geçerli olması gerektiğini göstermek için birleşirler. Ancak son söz sahibi deney olmalıdır. Hiçbir iyi teori deney kozunu kullanmaz. Bu korunum kanunlarına doğru demek, doğayla ilgili her tür açıklama kadar zor olmalı.

Enerji

6. Bölümde, kuvantum sıçramalarıyla ilgili olan "tepe aşağı kuralı"nı anlatmıştım. Kendiliğinden olan bir geçiş, yüksek bir enerji seviyesinden daha alçak bir enerji seviyesine doğru olmalıdır. Bir parçacık, ancak toplam kütlesi kendinden daha az olan parçacıklara dönüşebilir. Yine daha önce açıklandığı gibi, enerjinin korunumu, bir proton-proton çarpışmasında meydana gelen yeni parçacıklarda olduğu gibi "tepe yukarı" olaylarda önemli bir rol oynar. Bir reaksiyondan sonraki enerjinin, reaksiyondan önceki enerjiyle aynı olduğunu gösteren pek çok kanıt vardır, çünkü enerji korunum kanunu, parçacık çarpışması sonucu oluşan karmaşık enkazı incelemeye pratik pratik bir araçtır.

Momentum

Momentum korunumu, enerji korunumu gibi, parçacık süreçlerinin incelenmesinde kullanılacak bir araç olarak çok iyi düzenlenmiştir. Bu kanunların yardımıyla fizikçiler, yaratılan yeni parçacıkların kütlelerini anlamak için geriye dönük çalışmalar yapabilirler.

Enerji korunumu ile momentum korunumunun birlikte çalışmasından ortaya çıkan yasaklamalardan biri, tek parçacık dönüşümlerinin önlenmesidir. Yani sabit olmayan bir parçacık, tepe aşağı kuralına uyulsa bile, sadece tek bir başka parçacığa dönüşemez. Örneğin kuramsal olarak bir lambada parçacığının bir nötrona dönüştüğünü ve başka hiçbir parçacığa dönüşmediğini düşünün:

A°:/»n.

Okun üzerindeki çizgi dönüşümün olmadığını gösteriyor. Eğer bu dönüşüm olsaydı, yük, baryon numarası ve enerji (kütlede tepe aşağı dediğimiz şey) tamamıyla korunurdu, ama momentum korunmazdı. Diyelim ki lambda ilk başta sabit. O

zaman kütle enerjisinin bir kısmı nötronun kütle enerjisi olurdu, bir kısmı da nötronun kinetik enerjisine giderdi. Toplam enerjiyi korumak için nötronun uzaklaştırılması gerekirdi. Ancak o zaman da momentum korunmazdı, çünkü momentum bozunumdan önce sıfır, sonra ise sıfırdan farklı olurdu. Peki ya yaratılan nötron *uçup gitmezse!* Burada momentumun korunmasına dikkat edilir (bozunmadan önce ve sonra, öncesine göre daha az). İşte bu nedenle, bir araya gelen iki korunum kanunu tek parçacık bozunumunu yasaklar.

Açısal Momentum

Kuvantum teorisindeki açısal momentumun tuhaflığı, tam sayılı açısal momentumlann *{ti* birimiyle) yine tam sayılı toplam açısal momentumları oluşturmak için birleşirken, yarı-tek-tam sayılı açısal momentumlann, tek ya da çok sayılı oluşlarına dayanarak farklı şekillerde birleşmesinden kaynaklanır. Bir tek sayı, yarı-tek-tamsayılı toplam açısal momentum oluşturmak için birleşirken, bir çift sayı, tam sayılı, toplam açısal momentum oluşturmak için birleşir. Bu ifade başınızı döndürmüş olabilir. Bunları netleştirmek için işte birkaç örnek. Bir nötr pion iki fotona dönüşürken açısal momentumu korur:

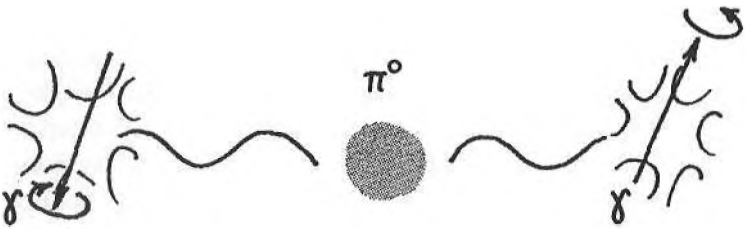
$7i^{\circ}$ -> 2 y.

Pionun açısal momentumu sıfırdır. Her fotonun bir birimlik açısal momentumu vardır. Açısal momentumun korunduğunu görmek için (dönüşümden önce de sonra da sıfır olması), iki fotonun ters yönde dönerek açısal momentumlarmın vektörlerini sıfır yaptıklarını düşünmeniz yeterlidir.

Şimdi de bir elektron ile bir pozitronun iki foton yaratmak üzere yokluklarını düşünelim:

$e^{\sim} + e^{+}$ -» 2 Y.

Bu örnekte, reaksiyondan önce çift sayılı fermionlar var-



Şekil 24. Nötr pionun dönüşümü

dır, bu nedenle ortaya tam sayılı açısal momentumlu bir varlık çıkması gerekir. İki elektronun zıt yönlere dönerek toplam açısal momentumunu sıfır yaptığını gözünüzün önüne getirebilirsiniz; bu durumda son iki foton da, bu sıfır açısal momentumunu korumak için farklı yönlerde dönmelidir. Bir nötron, bir proton, bir elektron ve bir karşıt nötrinoya dönüşürken, açısal momentum korunum kanununu da içine alan pek çok korunum kanunu tarafından sınırlanır. Dönüşüm şöyle ifade edilir:

$n \rightarrow p + e^{-} + \nu_e$,

Fermionların sayısı birden üçe çıkar (aslında iki fermion ile bir karşıt fermion). Başlangıçtaki parçacığın dönüşü l-i-2'dir, sonuçta ortaya çıkan parçacıkların da dönüşü l-r2 olur. şimdi, açısal momentumun 1^2'den 3-f2'ye küçük bir değişme yapmasının sorun olmayacağını fark edersiniz. Bu, açısal momentumun vektörünün doğasından kaynaklanır. Örneğin bir nötronun dönüş yönü "yukarı" olursa, son üç parçacığın dönüş yönleri, toplam 1+2'lik yukarı yönelme ile yukan-yukarı-aşağı olur. Bu dönüşümde korunan diğer nicelikler ise enerji, momentum, yük, baryon sayısı ve lepton sayısıdır.

Açısal momentumla ilgili son bir yorum: Parçacık dönüşümde olduğu gibi atomlarda da kuvantum sıçramaları, dönüş açısal momentumu yamsıra yörüngesel açısal momentumunu da içine alır.

Yörüngesel açısal monentum tek-çift kuralını değiştirmez, çünkü o her zaman bir tamsayıdır. Örneğin, biraz önce bahsettiğimiz nötron bozunumu modelinde, eğer son üç parçacık 1 birimlik aşağı yönde bir yörüngesel açısal momentum tarafından bölünürse, her üç dönüş de yukarı yönlü olabilir. Nötronun özgün dönüşüne uymak için toplam, yine 1-^2 birimlik yukarı yönlü açısal momentum olur.

Yük

Yükün korunumunu incelemek, enerjiyi, momentumun ya da açısal momentumun korunumunu incelemekten biraz daha kolaydır. Yükün korunmunu kontrol etmek için sadece sayılara ihtiyaç vardır. Yük, enerjiden daha basittir; çünkü ne çoklu şekilleri ne de sürekliliği olan değerleri vardır. Momentum ve açısal momentumdan da daha basittir çünkü vektör miktarı değil derece miktarı vardır (yani sadece büyüklüğü vardır, yönü değil). Bu ve bundan önceki bölümlerde yük korunumunu gösteren pek çok örnek gördünüz.

Şüphesiz yük korunumu en çok elektronun sabit kalmasına yarar. Eğer yük korunumu olmasaydı, bir elektron, bir nötrino ile bir protona dönüşürdü:

$e^{-} \rightarrow \nu_e + p$.

(Daha önce de açıklandığı gibi, okun üzerindeki çizgi bu dönüşümün olmadığı anlamına gelir.) Elektron daha hafif yüklü parçacığa dönüşemez, çünkü böyle bir parçacık yoktur (en azından bilinen yoktur). Bu nedenle, eğer dönüşmeyi düşünüyorsa, elektronun tek seçeneği, yük korunumuna karşı gelerek nötr parçacıklara dönüşmektir. Yukarıda gösterilen süreçte, yük dışında bütün korunum kanunlarına uyulur: Elektron dönüşümüyle ilgili araştırmalardan bir sonuç çıkmamıştır. Araştırılan dönüşümün olmayışı ömür alt sınırı ile açıklanır. Güncel kanıtlara göre ömür alt smırı 5×10^{26} yıldır, yani evrenin yaşının bir milyar katından fazla. Bu nedenle,

elektron dönüşümüyle ilgili endişe duymanıza gerek yok. (Yine de, eğer fizikçiler elektronun dönüştüğüne ait ufacık bir olasılık keşfederlerse, bu çok şaşırtıcı ve harika olur. Böyle bir keşif, teorisyenlerin kara tahtalarının ve bilgisayarlarının başına, koşarak gitmesine neden olur.)

Baryon Sayısı

Fizikçilerin, yük korunumunun gerçek, baryon korunumunun ise gerçek olmadığını düşünmek için nedenleri var. Ancak yine de baryon sayısı değişikliğine hiç rastlanmamıştır. Bugüne kadar yapılan deneyler, baryon sayısının tam korunumu konusunda tutarlıdır. Proton dönüşümüyle ilgili yapılan araştırmalar (hiçbir yaran olmamıştır), protonun ömür altı sınırının 1025 yıl, yani neredeyse elektronunki kadar uzun olduğunu göstermiştir. Proton bilinen en az büyüklüğü olan baryon olduğundan, onun dönüşümü, baryon korunumuna karşı gelebilir. Protonun dönüşmemesi, baryon korunumuyla ilgili elimizde bulunan en güçlü testtir. Fizikçiler proton dönüşümüyle ilgili araştırmasını sürdürüyorlar; eğer bu dönüşüme rastlansaydı, olağanüstü ilginç ama elektronun hareketli olduğunun bulunmasından daha az şaşırtıcı olurdu.

Lepton Sayısı

Öncelikle terminolojiyle ilgili bir hatırlatma: Altı tane *lepton* var: elektron ve nötrinosu, muon ve nötrinosu, tau ve nötrinosu. Bu ikili parçacık gruplarından her birinin bir *çeşnisi* olduğu söyleniyor -sırasıyla, elektron çeşnisi, muon çeşnisi ve tau çeşnisi. Bu altı leptonun tamamının dönüşü 1-2 olduğundan, hepsi *defermiondur.*

Uzun yıllar fizikçiler, her lepton çeşnisinin ayrı korunduğunu düşündüler. (Çeşninin korunması, belirli bir çeşnili par-

cacık sayısı eksi aynı çeşnili karşıt parçacık sayısı eşittir sabit anlamına gelir.) Bu varsayım gözlemlenen muon dönüşümünde doğru çıkmıştır:

$|r- > v^ + e\sim + v_{e>}$

Bu dönüşümde, bir muon çeşnili parçacık (muonun kendisi) yok olur, yerine muon çeşnili bir başka parçacık geçer (muon nötrinosu); ve elektron çeşnili bir parçacık ile bir karşıt parçacık yaratılır. Çeşni korunumu, bir muonun, bir elektron ile bir fotona dönüşmemesiyle de desteklenir.

$(0,-y^ e\sim + y.$

Bu hiç görülmemiş bir olaydır. Deneyde muon dönüşümleri olasılığı 10"'de l'den (yüz milyarda birden) daha azdır. Eğer bu dönüşüm olsaydı, hem muon çeşnisinin hem de elektron çeşnisinin değiştiğini görürdünüz.

Aslında bugüne kadar, yüklü leptonların yer aldığı lepton çeşnisi değişimi örneğine rastlanmamıştır. Ancak 3. Bölümde açıklandığı gibi, nötrino titreşiminin incelenmesi sonucunda, bir lepton çeşnisinin, tam korunum kanununu geçersiz hale getirerek başka bir lepton çeşnisine dönüştüğü görülmemiştir. Yine de, *toplam* lepton sayısının (tüm çeşnilerin toplamının) sabitliği tam korunum kanununa uyar. Nötrino titreşim fenomeninde, örneğin belirli bir çeşnili bir nötrino, başka bir çeşnili nötrinoya dönüşür, ama nötrinoların sayısında değişiklik olmaz.

Fizikçilerin lepton sayısı korunumuna olan tutumları, baryon sayısı korunumuna olan tutumlarına çok benzer. Her ikisinin de tam korunum kanununa uyduğu deneylerle sabittir, ama içlerinden biri ya da ikisi birden kuralı birazcık (şüphesiz *çok* küçük miktarda) ihlal etseydi, bu çok şaşırtıcı olmazdı.

Renk

Renk, tamamıyla korunduğuna inanılan, kuarkların ve gluonlann çok önemli ama utangaç bir niteliğidir. Leptonlar

ve bozonlar renksizdir. Laboratuvarda incelenen bütün bileşik parçacıklar da renksizdir (protonlar, nötronlar, pionlar, lambda parçacıkları vs.). Bu nedenle renk, doğrudan gözlemlenemez. Korunduğunun kanıtı doğrudan görünmez, bu kanıt güçlü etkileşimli kuark teorisinin başarısına dayanır.

Renk, tıpkı elektrik yükü gibi, niceliği olan parçacıklardan oluşur, bu nicelik bayrak yarışındaki bayrak gibi bir parçacıktan diğerine geçer. Renk, yükten biraz daha karmaşıktır çünkü üç tane renk (bu renkler rastgele belirlenmiş olan kırmızı, mavi ve yeşil renklerdir) ve üç karşıt renk varken, pozitif ve negatif olmak üzere sadece iki tane yük vardır. Bir protonun ya da nötronun içinde bir renk cümbüşü vardır, kuarklar kırmızı, mavi ve yeşil renklerin arasında bir ileri bir geri dans ederken, gluonlar kırmızı-karşıt yeşil, mavi-karşıt kırmızı gibi renklerde görünüp kaybolurlar. Sayfa 90'daki 12. Şekle bakarsanız, bu renk yüklü dansın küçük bir bölümünü görürsünüz. Her tepede renk korunmaktadır.

TCP

Tam korumun listesindeki son madde, TCP diye bilinen bir simetri ilkesidir. Biraz karmaşıktır, ama listeyi tamamlamanın hatırına işte karşınızda: (bir kez daha kemerlerinizi bağlayın.)

TCP sabitliği ilkesi, eğer olası tüm fiziksel süreçlerde, aşağıdaki üç durum değişikliğinin hepsini yaparsanız, sonuçta özgün sürecin izlediği aynı doğa kanunlarını izleyen ve fiziksel olarak mümkün olan başka bir süreç ortaya çıkacağını söyler. Durum değişiklikleri şunlardır:

T, zamanı tersine çevirme: Deneyi tersine yapın, yani önceyle sonranın yerlerini değiştirin.
C, yük birleşimi: Deneydeki bütün parçacıkların yerlerini karşıt parçacıklarla, bütün karşıt parçacıkların yer-

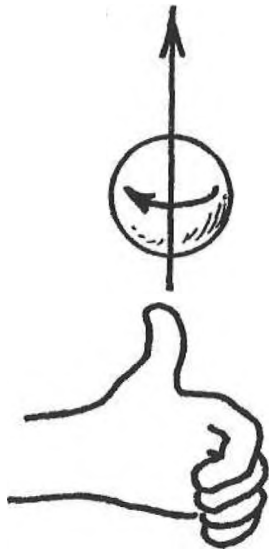
lerini de parçacıklarla değiştirin.

P, benzerlik ya da ters ayna: Deneyi özgün deneyin aynaya yansıması gibi tersten yapın.

1950'lere kadar fizikçiler, doğanın kanunlarının bu durum değişikliklerinin her biri için ayrı ayrı sabit olduğuna inandılar. Daha sonra, bu tahmini çürüten ama TCP'nin sabitliğinin karma ilkesine dokunmayan keşifler yapıldı. İşte bunu açıklayan bir örnek: Diyelim ki özgün işlem, hareketsiz bir pionun bir pozitif muon ile bir muon nötrinosuna dönüşmesi olsun:

$7t^{+} \rightarrow H\ L^{'} + Vnu$

Formülde satır altına yazılan L önemlidir. Bütün nötrinoların "solak" olduğunu açıklar. Bunun anlamı, eğer sol elinizin başparmağını nötrinonun hareket yönüne göre tutarsanız, sol elinizin içeriye doğru bükülü olan diğer parmaklarını nötrinonun dönüş yönünü göstermesidir. Bu nedenle L sola doğ-



Şekil 25. Nötrinolar solaktır.

ru dönüş demektir. Muon ve nötrino farklı yönlere doğru gittikleri için ve pionun sıfır dönüşüyle eşleşmek için dönüşleri toplamının sıfır olması gerektiğinden, muonun da dönüşü sola doğru olmalıdır. Şimdi üç durum değişikliğini düşünün. Zamanı tersine çevirme (T) bir muonla bir nötrinonun bir pion yaratmak üzere çarpışmasıyla sonuçlanacaktır. Yük birleşimi (C), pozitif muonu karşıt parçacığı olan bir negatif muona; pozitif pionu karşıt parçacığı olan bir negatif piona; ve nötrinoyu bir karşıt nötrinoya dönüştürecektir. Ters ayna (P) ise sola doğru dönüşleri sağa doğru çevirecektir. Sabitlik ilkesinin tahminine göre aşağıdaki süreç fiziksel olarak mümkündür:

Çok pratik olmamasına rağmen, bunun mümkün olabilecek bir süreç olduğuna inanmak için her neden mevcut. Bunu görmek için negatif muon ve karşıt nötron ışınlarının birbirlerine eşit ve zıt momentumlarla ve yeterli enerjiyle ateşlendiklerine bakmak lazım. Eğer bir mucize sonucu bu gerçekleşseydi, bazen bir negatif pion üretilirdi (bunun gerçekleşme şansı tam olarak hesaplanabilir).

Bu örnek bizi TCP teoremini deneysel ölçümüne götürmese de, test edilmiş bir şeyi açıklar: Karşıt nötrinoların hepsi sağlaktır. TCP sabitliği için en iyi testler, her karşıt parçacık eşi olan parçacıkla aynı kütleye sahip olmalıdır; ve her sabit olmayan karşıt parçacık, eşi olan parçacıkla aynı yaşam süresine sahip olmalıdır. Bu yorumlar doğruluk oranı yüksek olan testlerle ölçülmüştür. TCP sabitliğinin başka bir kuramsal desteği daha vardır. Eğer TCP sabitliği doğru olmaktan biraz uzak olsaydı, kuvantum teorisinin bütün yapısının çok zayıf temeller üzerinde durduğu söylenirdi.

Kısmen Korunum Kanunları ve Sabitlik İlkeleri

Bir fiziksel niceliğin korunup korunmadığını, kısmen korunmanın kısmen hamile olmak gibi saçma bir anlamı olduğunu düşünebilirsiniz. Bir bakıma haklı olabilirsiniz, ama fizikçiler, belirli etkileşimler tarafından yönetilen süreçlerdeki bazı niceliklerin korunurken, başka etkileşimler tarafından yönetilen süreçlerdekilerin korunmadığını görmüşlerdir. Bu durum bizi, kısmen korunma kanunları fikrine götürür. Örneğin, kuark çeşnisi güçlü ve elektromanyetik etkileşimlerde korunurken, zayıf etkileşimlerde korunmaz. İzospin adındaki bir nicelik (aşağıda tanımlanacak), güçlü etkileşimler tarafından korunurken, elektromanyetik ya da zayıf etkileşim tarafından korunmaz.

Benzer şekilde, belirli sabitlik ilkeleri bazı etkileşimlerde etkili olur, hepsinde değil. Örneğin yük birleşimi sabitliği (parçacık-karşıt parçacık değişimi), güçlü ve elektromanyetik etkileşimlerde geçerliyken, güçsüz etkileşimlerde geçerli değildir.

Burada bir kural var: Etkileşim ne kadar *güçlüyse,* sınırlamalar o kadar çok sayıda olur. Güçlü etkileşime azami sayıda korunum kanunu ve sabitlik ilkesi tarafından şüpheyle bakılırken; *elektromanyetik* etkileşime biraz daha az sayıda; ve *zayıf* etkileşime bundan da az sayıda korunum kanunu ve sabitlik ilkesi tarafından tereddütle bakılır. Acaba tüm etkileşimlerin en zayıfına sahip olan *yerçekimi,* korunum kanunlarını ve sabitlik ilkelerini daha da mı kötü ihlal eder? Bu, henüz yanıtını bilmediğimiz son derece ilginç bir soru, çünkü bugüne kadar yerçekiminin etkileri parçacık reaksiyonları düzeyinde araştırılmadı.

Hâlâ deneyler diyarında, daha çok teorisyenlerin aklında olan, *Higgs bozonu* (onu icat edenlerden biri olan İskoç fizikçi Peter Higgs'in adı verilmiş) adında bir parçacık var. Hâlâ kuramsal bir alanda olan kuvantum görüntüsünün, tüm alana

yayılacağına ve etkileşimleri doğrultusunda parçacık kütlelerini açıklayacağına inanılıyor. Bu onun, omuzlarına yüklenen çok büyük bir yük. Ayrıca, onun, araştırılanın tersine zaman sabitliğini çok az miktarda ihlal etmesi ve lepton çeşnisi korunumuna da biraz karşı gelmesiyle ilgisi vardır. Parçacık fiziğiyle ilgili hiçbir çalışma, devam etmekte olan Higgs araştırmasından daha heyecan verici değildir. Eğer bu parçacık bulunursa ve kendisine verilen görevleri yerine getirdiği tespit edilirse, bu durum çekici fakat daha az derinliğe sahip basitliğin yerine geçen daha fazla derinliğe sahip basitliğe bir örnek daha olacak.

(Bu durumda, bütün alana yayılan temel Higgs kavramı, tersine zaman sabitliğinin küçük kusurunu açıklayabilir.)

Kuark Çeşnisi

Kuarklar leptonlardan daha çok çeşnilidir. Altı tane lepton ikişerli üç gruba bölünüp, her gruba, bir çeşni düşerken (elektron, muon ve tau çeşnileri), altı kuarktan her birine kendi çeşnisi verilir. Böylece, söyleniş şekli çok uygun olmasa da, kuarkların, yukarıda olma, aşağıda olma, tılsım, tuhaf olma, en üstte olma ve en altta olma çeşnileri vardır. Bu kuark çeşnileri güçlü etkileşimlerde korunur (elektromanyetik etkileşimlerde de). Örneğin bir protonun bir başka protonla çarpışması sonucunda bir proton, bir nötron ve bir pozitif protonun oluştuğunu düşünün:

$p + p -> p + n + Tt^{+}$.

Bu olayda sadece yukarı kuarklar ile aşağı kuarklar rol almıştır. Bu reaksiyon kuark elemanları cinsinden şöyle yazılabilir,

yya + yya -» yya + yaa + yâ

Başlangıçta, dört tane yukarı kuark ve iki tane aşağı kuark vardır. Sonuçta, dört tane yukarı kuark, üç tane aşağı kuark ve bir tane aşağı karşıt kuark olur ve böylece çeşniler dengelenir (karşıt kuarkın negatif çeşnili olduğu düşünülmelidir). İşte bir

örnek daha; bir proton-nötron çarpışması sonucu tuhaf parçacıklar oluşuyor:

$p + n \rightarrow n + A^{\circ} + K^{+}$.

Bu reaksiyon kuark elemanları cinsinden yazılırsa şöyle olur (t tuhaf kuarkı sembolize ediyor):

yya + yaa —> yaa + yat + yf

Üç tane yukarı ve üç tane aşağı kuark, üç yukarı kuark, üç aşağı kuark, bir tuhaf kuark ve bir tuhaf karşıt kuarka dönüşüyor. Çeşniler yine dengeli.

Bu iki örnek güçlü etkileşime sahip. Güçlü etkileşimlerin iş başında olduğunu biliyoruz çünkü reaksiyonlar yüksek olasılıklarda meydana geliyor. Ancak, zayıf etkileşim tarafından yönetilen, yavaş bir süreç olan lambda parçacığın dönüşümünü düşünün:

$A^{\circ} \rightarrow p + re.$

Kuark elemanları cinsinden bu dönüşüm süreci şöyle yazılır:

yas + —> yya +ya

Burada olan şey tuhaf kuarkın yok olması, yerine bir aşağı kuarkın gelmesidir. Bu nedenle zayıf etkileşim, bir kısmen korunum kanunu olan kuark çeşnisi korunum kanununa karşı geliyor.

İzospin

İzospin kavramı 1930'lara dayanır. 1932'de nötronun keşfedilmesinden hemen sonra, yüklerindeki farklılığa rağmen, bu yeni parçacık ile protonun pek çok ortak özelliği olduğu görülür. Hemen hemen aynı kütleye ve aynı güçlü etkileşime sahip oldukları görülür. Proton ile nötron, matematiksel olarak bir-yarım dönüşlü parçacığın iki yöne dönüşün uygulandığı, nükleon adındaki temelde bulunan parçacığın iki durumu olarak kabul edilmeye başlandı (böylece dönüşle ilgisi olmayan *izospin* sözcüğü ortaya çıktı). Daha sonra pion üçlüsü, xi parçacığı ikilisi (ve lambda parçacığı teklisi) gibi diğer

parçacık "katları" bulundu. Izospin korunum kanunu, toplam izospinin herhangi bir parçacık grubuna verilebileceğini ve bu miktarın parçacıkların güçlü etkileşimi sırasında değişmeden kaldığını; ancak parçacıkların elektromanyetik ya da zayıf etkileşimlerinde bu miktarın değişebileceğini belirtir. Eğer bu görüş, bir sabitlik ilkesi görüşü olarak açıklanırsa, anlaşılması daha kolay olur.

Sabitlik diline göre söylenen şey, katlı parçacıkların bir üyesinin yerine aynı katlı parçacıkların bir başka üyesi geçtiği taktirde, güçlü etkileşimin değişmeden kaldığıdır. Bunun yorumu, örneğin pozitif, negatif ve nötr pionlarda olduğu gibi proton ve nötronun da aynı güçlü etkileşimi olduğudur, sonuç olarak bu durum kuark çeşni korunumuna kadar gider. İzospini biraz geçmişi nedeniyle, biraz da gözlemlenmeyen kuarklarla değil gözlemlenen parçacıklarla ilgili olduğu için ayrı bir görüş olarak açıklıyorum. İzospin sabitliği, elektromanyetik etkileşim tarafından açıkça ihlal edilir. Çünkü belirli bir katın parçacıklarının yükleri farklıdır (kütleleri de biraz farklıdır).

PveC

1950'lerin ortalarına kadar fizikçiler, dikkatlerini çok fazla yoğunlaştırmadan, üç sabitlik ilkesinin (T,C,P) her birinin kesinlikle geçerli ilkeler olduğunu açıkça kabul ettiler. Bu ilkeler güçlü ve elektromanyetik etkileşim testlerinden geçti. Bunlar o kadar sevimli ilkelerdi ki, zayıf etkileşim için de geçerli olmaları gerekiyordu -ya da öyle gözüküyordu. 1956'da Çin asıllı Amerikalı Tsung Dao Lee (o zaman yirmi dokuz yaşında olan ve Kolombiya Üniversitesinde çalışan) ve Chen Ning Yang (o zaman otuz üç yaşında olan ve Princeton'da İleri Araştırmalar Enstitüsünde çalışan) adlarında iki teorisyen, zayıf etkileşimle diğer etkileşimler arasında korunum benzerliğine dair hiçbir deneysel bulgu olmadığını söylediklerinde, bütün fizikçilerin utançtan yüzleri kızardı. Bu iki te-

orisyen parçacık verilerinde* ortaya çıkmış olan bir tuhaflığın P'nin ihlal edilmesiyle giderilebileceğini söyledi ve deney yapan fizikçileri bu ilkenin geçerliliğini test etmeye davet etti. Aynı yıl, Lee'nin Kolombiya'daki meslektaşı Chien-Shiung Wuf bir deney yaptı ve bu deneyin sonuçları bir sonraki yıl, P korunumunun "belirgin" olmasına rağmen doğru olmadığını çarpıcı bir şekilde kanıtladı. Farklı gruplar, farklı metotlar kullanarak onun bu görüşünü derhal doğruladılar.

Benzerlik korunumu ya da tersine yer sabitliği şöyle açıklanabilir: olası bir sürecin aynadaki görüntüsü olası bir süreçtir. Eğer bu sayfayı aynaya doğru tutarak bakarsanız, yazıları tersten görürsünüz, bu normal değil ama imkânsız da değil. Ters yazı kolayca yazılabilir (aynada bu yazı normal görünür). Bir ambulansın üzerine

8MAJU9MA

yazan biri tersten yazı yazmış olur. Tersine yer sabitliği günlük hayatta önemli bir yere sahiptir. Düz bir aynada gördüğümüz bir şey daha önce gördüğümüz herhangi bir şeye benzemeyebilir; tuhaf olabilir, ama mümkündür, hiçbir fiziksel kanuna karşı gelmez. Ters yeri anlamak için başka bir yöntem de bir filmin her karesini soldan sağa doğru ters çevirmektir. Filmi izlerken, filmin ters çevrildiğini anlamazsınız. Ancak, her on oyuncudan dokuzunun solak olduğunu, erkeklerin gömlek düğmelerinin sağdan sola doğru iliklediğini, Amerika Birleşik Devletleri'nde trafiğin sağdan aktığını, ya da ta-

*Kütleleri ve diğer özellikleri benzeyen iki parçacık farklı benzerliklere sahipti. Bugün bildiğimiz bu "parçacıklar" kaon adındaki tek parçacıktır. 1955-56 yıllarında Indiana Üniversitesinden bir yıllığına Almanya'ya gittiğimde, bu tuhaflık karşısında şaşırmış olan teoristler arasında ben de vardım. Diğerleri gibi benim de benzerliğin korunup konulamayacağını sormak aklıma gelmedi. t Chen Ning Yang meslektaşları tarafından "Frank" olarak bilinen Tsung - Dao Lee'ye "T.D." denir. Chien - Shiung Wu (1997'de seksen dört yaşında öldü) çoğunlukla "Madam Wu" diye bilinirdi (yakın arkadaşları ise ona "Chien - Shiung" derdi).

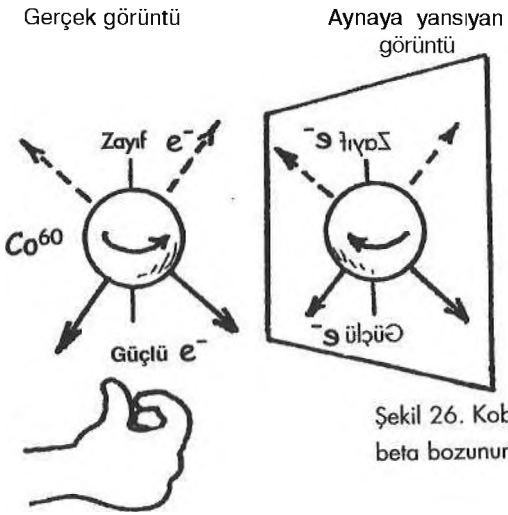
beladaki yazıların ters yazılmış olduğunu fark edebilirsiniz. Yine de, izlediğiniz filmdeki ters sahnelerin imkânsız olduğu sonucuna varmazsınız.

Bunun aksine, Madam Wu tarafından yapılan bir ayna görüntü deneyi, imkânsız bir süreci ortaya koymuştur. Madam Wu ve ekibi, dönen kobalt 60 çekirdeklerini* son derece düşük ısıdaki bir manyetik alana dizdiler. Dizilen çekirdeklerden biri Şekil 26'da solda görülüyor. Eğer sağ elinizin içine doğru kıvrılmış parmaklan çekirdeğin üzerindeki okun yönünü takip ederse, sağ baş parmağınız dönüşün ekseni olan yukarıyı gösterir. Çekirdeğin "kuzey kutbu"nun tepede olduğunu söyleyebilirsiniz. Madam Wu ve grubu gözlem sonucunda, bu çekirdekten beta bozunumunda yayılan elektronların aşağıya doğru, yani "güney kutbu" yönüne doğru fışkırdığını gördüler. Şekil 26'nm sağ tarafında bu sürecin aynadaki görüntüsü gösteriliyor: çekirdeğin kuzey kutbu altta (yine sağ elinizi dönüş ekseni yönünde tutun) ve yayılan elektronlarda çoğunlukla kuzey kutbu yönünde.

Ancak bu durum laboratuvarda gözlemlenen durumla tutarlı değil. Aynadaki görüntü, imkânsızın görüntüsüdür. Benzerlik, bu zayıf etkileşim sürecinde korunmamıştır.

Deney oldukça basit ve dolaysız. Peki niçin daha önce yapılmamıştı? Bir nedeni, hiç kimsenin yapılması gerektiğini düşünmemesiydi. Bir nedeni de benim anlattığımdan çok daha zor olmasıydı. Eğer manyetik alan güçlü olmasaydı ve sıcaklık oldukça düşük olmasaydı (yaklaşık olarak mutlak sıfırın yüzde birinden daha fazla), çekirdekler sıra halinde dizili kalmazdıf. Yukarıya ve aşağıya doğru dönüp dururlardı. Her çekirdeğin kendi elektronunu dönüşüne uygun olarak fırlatmasına rağmen, elektronların eşit şekilde yukarıya ve aşağıya

* Kobalt 60, tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir izotoptur. Savaştaki bir nükleer patlamada açığa çıkar ve sağlığı tehdit eden yan etkileri görülür. fWu ve takımı deneyi Kolombiya Ünivestesinde değil, gerekli olan düşük sıcaklığın sağlanabildiği NVashington'daki Ulusal Standartlar Bürosu'nda gerçekleştirdiler.



Şekil 26. Kobalt 60'ın beta bozunumu.

doğru yayıldıkları gözlemlenirdi.

4 Ocak 1957'de Kolombiya Üniversitesi'nden bir grup fizikçi, her hafta düzenli olarak bir araya geldikleri öğle yemeklerinden birinde, üniversite yakınındaki bir Çin restoranında toplanmışlardı. T.D. Lee, gruba Madam Wu'dan henüz öğrendiği bir şeyi açıkladı: Madam Wu'nun deneyinde, sıraya dizilmiş kobalt 60 çekirdeklerindeki elektronlar, çekirdekten asimetrik olarak yayılıyordu.

Leon Lederman (daha sonra başka bir çalışmasıyla Nobel Ödülü kazandı), Lee ve Yang'm bahsettiği eşitlik korunumuyla ilgili bir başka deneyin Kolombiya siklatronunda yapılabileceğini düşündü. O akşam öğrencisi Marcel Weinrich'le birlikte deneyi başlatmak üzere New York'un kuzeyindeki siklatron laboratuvarma gittiler.

Fakülteden genç bir meslektaşları olan Richard Garwin'e telefon ettiler (Richard Garwin seyahatte olduğu için bu öğle yemeğini kaçırmıştı). Ertesi gün Garwin de onlara katıldı. Sadece üç gün sonra, muonun nötrinosunun tek elini kullandığını (ya solak *ya da* sağlak olduğunu) ve nötrinonun zayıf etkileşiminin hem tersine yer hem de yük birleşimi sabitliklerini

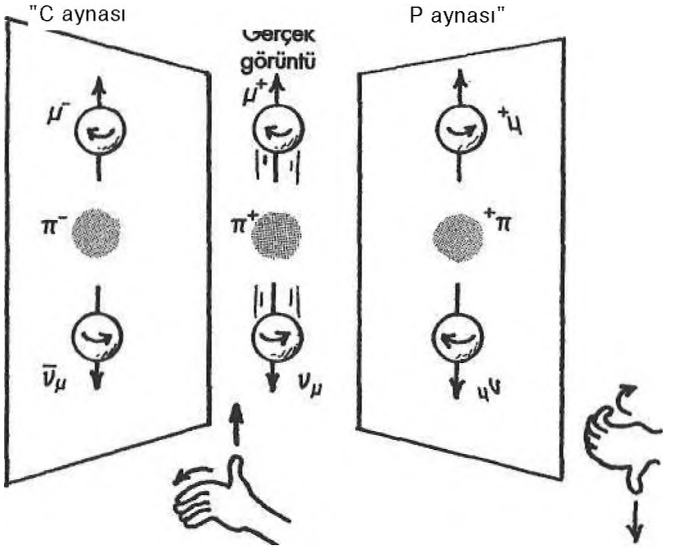
bozduğunu bulmuşlardı*.

Lederman ve arkadaşları, Kolombiya siklatronunu pozitif pion yaratmak için kullandılar; daha sonra bu pionlarm muonlara ve nötronlara dönüşümünü ve sonra da muonların elektronlara ve daha fazla nötrinoya dönüşümünü incelediler. Bir pozitif pionun dönüşümü, Şekil 27'nin ortasında gösterilmektedir. Taralı daire pionun dönüşünden önceki yerini gösteriyor. Bu noktadan yukarı fırlayan şey, fizikçilere göre her zaman tek elini kullananf (kesin olup olmadığı doğrulanmamış) bir pozitif muondu. Sol elinizin kıvırdığınız parmaklarını, muonun yönünü gösteren okun yönüne çevirin. Şimdi sol elinizin baş parmağı mounon seyahat yönünü gösterecektir. Şimdi de iki sağlam korunum kanununu hatırlayalım, momentum korunum kanunu ve açısal momentum korunum kanunu. Momentum korunumu yüzünden, görünmeyen nötrinonun muonun uçuş yönünün tersine, aşağı doğru uçtuğu bilinir. Açısal momentum korunumu nedeniyle de (özgün pionun dönüşü olmadığı gerçeği dikkate alınarak), nötrinonun dönüş yönü, muonun dönüş yönünün tersine olmalıdır. Sonuçta, nötrino da muon gibi aynı el kullanmama özelliğine sahiptir. (Bunu sol elinizi yeniden nötrinonun dönüş ve uçuş yönüne göre ayarlayarak kontrol edebilirsiniz.)

Eğer eşitlik korunsaydı, yaratılan nötrinoların yarısı solak, yansı sağlak olurdu. Deneyler hepsinin tek elini kullandığını göstermiştir (eşitlik korunumu olabildiğince eşit biçimde ihlal edilmiştir!).

Şekil 27'nin sağ tarafında görülen ayna, normal bir "P aynasıdır. Aynada sağlak bir nötrinonun aşağı doğru gidişi görülüyor. Bu imkânsızın görüntüsüdür. Çünkü nötrinolar so-

* Deneyin yapıldığı dönemde, muon nötrinosu ile elektron nötrinosunun farklı olduğu bilinmiyordu. Beş yıl sonra muon nötrinosunun farklılığını keşfedenlerden biri olan Lederman Nobel Ödülü'nü paylaşanlardan biri oldu.
t Kolombiya takımı muon dönüşünün sırasına, onun sonraki dönüşümlerinin özelliklerini ölçerek karar verdi. Burada onların deneyinin bu yönüne değinmeyeceğim.



Şekil 27. "C aynası" ve "P aynasında görünen pozitif pion dönüşümü.

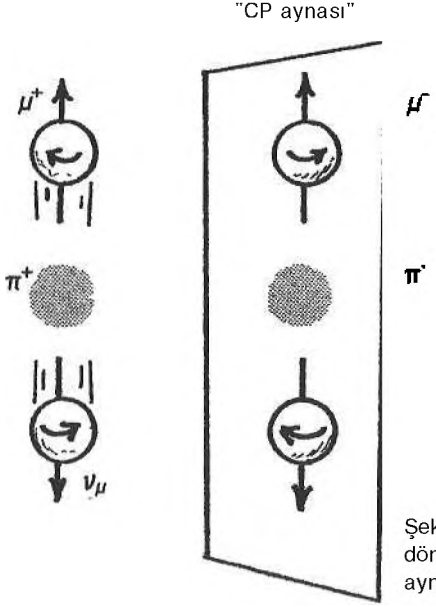
laktır. Bu nedenle P sabitliği diye bir şey yoktur. Şeklin sol tarafında ise yük birleşimini (parçacık-karşıt parçacığın ters dönmesi) sürece uygulanmasını gösteren bir "C aynası" var. Bu aynada bir negatif pion (bir pozitif pionun karşıt parçacığı), bir negatif muona (pozitif muonun karşıt parçacığı) ve solak bir karşıt nötrinoya dönüşüyor. Ancak, nötrinolar solaksa, karşıt nötrinolar sağlak olmalıdır. C aynası da imkânsız bir süreci gösteriyor. Bu nedenle, C sabitliği diye bir kavram yoktur.

Bir konuyu tekrarlayacak olursak: bu deneylerde P sabitliğinin ve C sabitliğinin en çok bozulduğu durum, yüklü pion bozunumunu, muon bozunumunu ve beta bozunumunu kontrol eden sadece zayıf etkileşimde görülür. P sabitliği ve C sabitliği, elektromanyetik ve güçlü etkileşimlerde geçerli olan ve olmaya devam eden prensiplerdir.

Şekil 28'de görülen "CP aynası" soldan sağa yer değişir ve parçacıklarla karşıt parçacıkların yerlerini değiştirir. Bir pozitif pionun bir pozitif muon ile bir solak nötrinoya dönüşümü
TC+--> $n^{+} + V_{HL}$, iken
CP aynasında
TC -> fi" + V^
şeklinde bir negatif pionun bir negatif muon ile bir sağlak karşıt nötrinoya dönüşümü olarak görülür. Ancak bu, tamamiyle negatif pion dönüşümü için gözlemlenen bir durumdur. Bu durumda PC karması bir sabitlik, zayıf etkileşimde ve dolayısıyla tüm etkileşimlerde geçerlidir. Eğer tersine zaman sabitliği ya da T-sabitliği söz konusu olursa, üç sabitliğin kombinasyonu olan TCP'nin kesinlikle geçerli olduğunun güçlü bir kanıtı olduğu için, bu da kesinlikle geçerli olur.

1957'de şaşırtıcı olayların ortaya çıkmasından sonra fizikçiler, P ve C sabitlikleri zayıf etkileşim tarafından ayrı ayrı ihlal edilmelerine rağmen, PC kombinasyonunun, T ve TCP ile birlikte tamamıyla geçerli olduğu fikrine alıştılar. Yeniden düzenlenen basitliğe olan bu inanç, iki Princeton'lı fizikçi, Val Fitch ve James Cronin'in, Long Island'da Brookhaven hızandırıcısında çalışırken fizik dünyasını bir kez daha sarstığı 1964 yılına kadar sürdü. Nötr kaonun, kendi isteğiyle üç piona, ara sıra da (yaklaşık beş yüz kerede bir) iki piona dönüşen uzun ömürlü ($5x10^{-8}$ saniye) bir versiyonunu buldular. Teori, bunun sadece CP sabitliği bozulursa olabileceğini gösterdi. Bu, tersine zaman sabitliğinin tamamıyla geçerli bir ilkeye benzemediğini açıklayan bir başka şaşırtıcı sonuçtu.

Fitch ve Cronin tarafından keşfedilen bu ihlal (onlara 1980'de Nobel Ödülü'nü kazandırdı) "zayıftan daha zayıftır. Ancak daha sonra bu ihlal, bir alt kuark (ya da karşıt alt kuark) içeren çok ağır bir meson olan (kütlesi 5.279 MeV) B parçacığının dönüşümünde daha güçlü bir şekilde ortaya çıkmıştır. CP ihlalinin göstergeleri oldukça şaşırtıcıdır. Val



Şekil 28. Pozitif pion dönüşümünün 'CP karması ayna'da görünüşü.

Fitch, "Bizim burada olma nedenimiz budur," demeyi sever. Bu buluş fizikçileri C ve P sabitliklerinin bozulmasının ayrı ayrı bulunmasından daha çok rahatsız etti. Bunun nedeni, bu buluşun madde ile karşıt madde arasında temel bir fark olduğunu göstermesiydi. Madde ve karşıt maddeden oluşan dünyalar benzer şekilde hareket etmez. Bu yüzden Dünyamızla ilgili gözlemler, prensipte, uzaktaki bir galaksinin madde ve karşıt maddeden oluşup oluşmadığını göstermez. Karşıt maddeli galaksiler olduğunu tahmin etmek için elimizde hiç kanıt yokken, bizim evrenimizin tamamıyla sıradan maddeden oluştuğunu gösteren çok sağlam kanıtlarımız var. Güncel teoriye göre, Büyük Patlama'nın hemen ardından, tam olarak değil ama yaklaşık olarak, eşit sayıda proton ve karşıt proton ortaya çıktı.

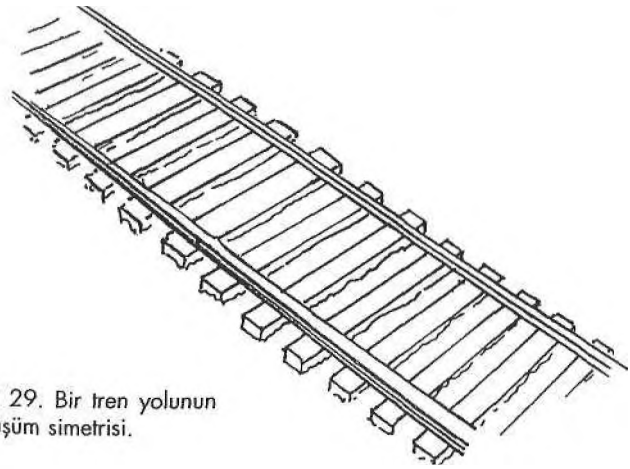
Bu parçacıklar, sıcak, koyu bir çorbada tekrar tekrar çarpışırken, birbirlerini büyük oranda yok ettiler. Bizim evrenimi-

zi oluşturmak için geride, karşıt maddeden biraz daha fazla, milyarda birden bile daha az, madde kalmıştı. Eğer CP ihlali olmasaydı, teoriye göre, tam olarak eşit sayıda baryon ve karşıt baryon olurdu (ya da, eşit sayıda kuark ve karşıt kuark). Bunların hepsi yok edilirdi ve geride fotonlar ile belki de nötrinolardan oluşan bir evren kalırdı. Böyle bir evrende, ne galaksiler, ne yıldızlar, ne de biz olurduk.

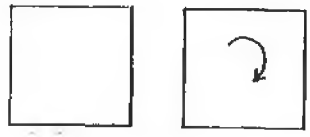
Simetri

"Simetri" düzenli olarak çoğumuzun, genellikle "denge", belki "uyum" ya da bazen "güzellik" anlamlarında kullandığımız bir terimdir. Simetrinin bu niteliklerine, bir matematikçi veya fizikçi de benzer şekilde görebilir ama onu şöyle tanımlar: eğer bir özelliği değişirken, bir ya da daha fazla özelliği aynı kalıyorsa, o nesnenin simetrisi vardır.

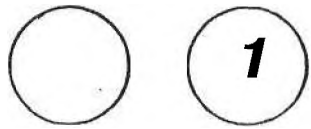
Uzun ve düz bir tren yolunun bir tür *dönüşüm simetrisi* vardır. Eğer demiryolu traverslerinden birini diğerinden ayıran mesafe tarafından, tren yolunu yol boyunca ayırırsanız, hiç değişmeden kalır (ya da bakış açınızı aynı şekilde değiştirin).



Şekil 29. Bir tren yolunun dönüşüm simetrisi.



90°ik dönüşten sonra aynı görüntü



Herhangi bir açıyla dönüşten sonra aynı görüntü



Ters -uzay simetrisi

Şekil 30 Simetri türleri

Karenin bir tür *dönüş simetrisi* vardır. Eğer 90 derece döndürürseniz (ya da 90 derecenin katlarına), özgün şekline geri döner. Bir dairenin daha geniş kapsamlı bir dönüş simetrisi vardır. Hangi açıyla döndürülse döndürülsün, hiç değişmez. Şüphesiz bu simetri, Aristo ve diğerlerinin, dairenin en mükemmel düzlem şekli olduğunu düşünmesinde önemli bir rol oynamıştır. Sol ile sağ tarafı mükemmel dengeli olan bir maskenin *ters yer simetrisi* vardır. Maskenin kendisine mi, yoksa aynadaki görüntüsüne mi baktığınızı anlayamazsınız, çünkü her iki görüntü de aynıdır.

Bir arkadaşınız bir değişiklik yaparken -*belki* yapar- gözlerinizi kapatın. Eğer gözlerinizi kapatmadan önce bir kareye baktıysanız, gözlerinizi açtığınızda bu kare yine aynı gözükür, arkadaşınızın bu karenin yönünü değiştirip değiştirmediğini anlayamazsınız. Eğer gözlerinizi kapatmadan önce mükemmel bir yüz simetrisi olan bir fotoğrafa baktıysanız, gözlerinizi açtığınızda bu fotoğraf da aynı gözükür, arkadaşınızın

özgün fotoğraftaki yüzün görüntüsünü, bir ayna görüntüsüyle değiştirip değiştirilmediğini anlayamazsınız. Bir trenin en son vagonundan tren yoluna baksaydmız, gözlerinizi açtığınızda da görüntü aynı olurdu, arkadaşınızın treni biraz hareket ettirip ettirmediğini anlayamazdınız.

Şimdi de gözlerinizi kapattığınızda sizin ve arkadaşınızın uzay boşluğunun derinliklerinde olduğunu düşünün. Gözlerinizi açtığınızda her şeyin ayın gözüktüğünü görürsünüz. Daha önce olduğunuz yerde misiniz yoksa farklı bir yerde misiniz? Bilemezsiniz. Bu bize uzayın homojenliği denen bir simetri olduğunu gösterir (bununla ilgili sağlam bir kanıtımız var). Uzay her yerde aynıdır. Belirli bir yeri yoktur. Ama her şeyin aynı "gözükmesi" de ne demek? Yanınızda pek çok laboratuvar aracıyla uzay geminizdesiniz ve daha önce yaptıklarınızdan farklı bir sonuç elde edip etmeyeceğinizi görmek için deney yapmaya devam ediyorsunuz. Hayır, tüm sonuçlar aynı. Şimdi arkadaşınız farklı bir yerde olduğunuzu açıklayacaktır. Doğanın kanununun her yerde aynı olduğu sonucuna varacaksınız. Çabalarınız sizi önemli bir bağlantıya ulaştırdı:
Sabitlik <-> simetri

Simetriye bağlı olarak, uzayın homojenliğine doğanın kanunlarının sabitliği diyoruz. Fizikçiler bunun evrensel bir bağlantıyı gösterdiğine inanıyor: her sabitlik ilkesi bir simetri ilkesine bağlıdır. Çoğu olayda bu bağlantıyı görmek kolaydır. Eğer, örneğin, ayna dünyasının özellikleri gerçek dünyanın özelliklerine benzese (ters uzay simetrisi), doğanın kanunlarının ters uzay sabitliği olur. (Aslında sadece *bazı* kanunlarda bu sabitlik vardır.) Pek çok olayda, simetri ve sabitlik hemen hemen aynı şeydir. Bu doğanın kanunlarının simetrisinin değişmeyen "özelliği" olduğu zaman doğrudur.

Daha güzel bir bağlantı,
simetri <-> korumun şeklindedir.

1915 yılında Göttingen Üniversitesi'nde misafir araştırmacı ve öğretim görevlisi olan Emmy Noether, bugüne kadar matematiksel fiziğin temel taşlarından birini oluşturan çok

önemli bir teoremi ispatladı*. Devam eden her simetriye eşlik eden bir korunum kanunu olduğunu gösterdi. (Devam eden simetri, tren yolu, dönen kare ya da simetrik yüzün "farklı simetrileri"nin aksine herhangi bir büyüklükteki durum değişikliğini içine alır.) Simetri, sabitlik ilkeleri ile korunum kanunlarını birleştiren "tutkal" görevi görür:
Sabitlik <-> simetri <-» korunum

Bu görüşü açıklamak için momentum korunumunun uzayın homojenliğine (sürekliliği olan bir simetri) nasıl bağlı olduğunu anlatayım.

Masanın üzerinde duran bir kitapla başlayacağım. Bu, herhangi bir kitap olabilir, ama masa özel olmalı: mükemmel derecede düz ve mükemmel derecede sürtünmesiz. Şimdi yerçekimini unutabilirim çünkü onun kitabın yatay hareketi üzerinde hiçbir etkisi yok. Katabı masanın üzerine dikkatle, hareket edemeyeceği şekilde koyuyorum. Hareket etmeden duruyor. Görünen şey makul ve "açık", ta ki şu soruyu sorana kadar: Diyelim ki bu kitap trilyonlarca atomdan oluşmuş ve her bir atom diğer atomların kimini bir yöne, kimini başka bir yöne, kimini kuvvetlice, kimini hafif kuvvetle çekiyor. Peki nasıl oluyor da kitabın atomlarının birbirleriyle olan etkileşimi mucizevi bir şekilde etkisini dışarıya göstermiyor? Isaac Newton bu sorunun yanıtını bundan üç yüz yıldan daha önce, bizim bugün, Newton'ın üçüncü kanunu dediğimiz bir zorunluluk kanunuyla vermiştir. Bu kanun, doğadaki bütün kuvvetlerin dengeli çiftlerden oluştuğunu söyler. Bunu şöyle de duymuş olabilirsiniz: her etkinin eşit ve ters tepkisi vardır. Eğer A atomu, B atomuna güç kullanırsa, B atomu da A atomuna eşit ve zıt güç kullanır. Tüm kuvvet çiftlerinin toplamı (vektör cinsinden) sıfırdır. A atomu hareket eder. Be atomu da hareket eder.

*Göttingen'in büyük matematikçisi David Hillbert, Emmy Noether'in iyi bir akademik pozisyona atanması için üniversite yönetimiyle dört yıl mücadele etti. Emmy Noether Yahudi olduğu için, bu pozisyonu 1933'de elinden alındı. Daha sonra Pennsylvania'daki Bryn Mawr College'a gitti ve 1935 yılında ölene kadar orada profesör olarak çalıştı.

Ama kitap -yani atomların tamamı- hareket etmez.

Hareketsiz duran kitap "problemlinde bir simetri ilkesi aramak modern bir yaklaşımdır, aslında Nevvton'ın üçüncü kanununun *niçin* doğru olduğunu açıklayan daha derin bir nedendir. Simetri uzayın homojenliğidir. Buna bağlı olan sabitlik ilkesi, doğanın kanunlarının her yerde aynı olduğunu söyler. Bu bizi, dış etkilerden korunan bir nesnenin hareket durumlarından hiçbirinin nesnenin yerine bağlı olmadığı sonucuna götürür. Masanın üzerinde duran kitap, hiçbir dış etken tarafından yatay olarak hiçbir yöne itilmediği anlamında dış etkenlerden korunmaktadır. Diyelim ki kitap, X noktasındaki hareketsiz durumundan, hareket etmeye başlamak için "karar veriyor". Bu kitap bir süre sonra Y noktasından geçecektir. Y'deki hareket durumunda hareket halinde olduğu için, X'teki hareket durumundaki sabit halinden farklıdır. Bu durum, özgün simetri ilkesiyle çelişir. Eğer kitap hareket etmeye başlarsa, o zaman hareketin durumu kitabın nerede olduğuna bağlı olur. Bu nedenle, hareket etme "arzu"suna ulaşamayarak olduğu yerde durur.

Bu iddia, uzay homojen olduğu takdirde, kendi kendine değişmeyen hareket durumunun momentum olduğunu gösteren matematik tarafından açıklanabilir. Eğer kitap, dış etkilerden arındırılmış olarak, bir yerde sabit duruyorsa ve daha sonra başka bir yerde hareket ediyorsa, momentumu değişmiş demektir. Kitabın momentumu korunmaz. Momentum korunumu, eğer başlangıçta kitap sabitse, hareket etmesini *yasaklar*. Öte yandan, eğer masanın üzerine ilk konulduğunda hareket halindeyse, aynı momentumla ilerlemeye devam edecektir. Yine, hareketinin hiçbir durumu, onun nerede olduğuna bağlı değildir.

Uzay boşluğunun aynılığının momentum korunumunu açıklayabilmesi çok şaşırtıcıdır, ama açıklar. Uzayın özelliksiz oluşu, Nevvton'ın üçüncü kanununu gerekli hale getirir. Klasik fiziğin geçerli bir ilkesi olan momentum korunumu, görelilik ve kuantum mekaniği gibi modern teorilerde de ge-

çerliliğini korurken, etki - tepki güçleri terimleriyle ifade edilen Nevvton'un üçüncü kanununun değişmesinin gerekmesi, simetri yaklaşımının doğruluğunu destekleyen daha derin bir göstergedir. Nevvton'un üçüncü kanunu dolaysız olarak sadece klasik fiziğe uygulanabilir, modern teorilere değil.

Açısal momentumun korunumu başka bir uzay simetrisi olan *izotropiye* bağlıdır, izotropi uzayda tercin edilen yönlerin olmadığı gerçeğidir. Eğer uzak uzaydaki bir pusula iğnesi, manyetik alanlardan ve dış etkenlerden korunarak, kendiliğinden dönmeye başlasaydı, bu iğnenin açısal momentumu değişir, hareketi ise uzaydaki yönlerin hepsinin eşit olmadığını gösterirdi.

Daha dikkat çekici olan bir başka şey ise, enerji korunumunun, zamanın simetrisinde ve fizik kanunlarının sabitliğinde zamanı değiştirmek için bulunmasıdır. Böylece, hareketle ilgili (momentum, açısal monemtum ve enerji) üç korunum kanununun hepsi uzay -zamanın tek tipte yani her yerde aynı olduğu gerçeğine dayanır*.

Günümüzde fizikçiler, *her* korunum kanununun, sonuçta bir simetri ilkesine dayandığına inanıyorlar. Fizikçiler bu durumu, yüklü parçacıkların dalga fonksiyonlarında gözlemlenebilir değişiklikler yapıldığı zaman, simetrisi fiziksel sonuçların ayrılığına dayanan yük korunumuyla gösterdiler. Ancak bazı parçacık korunum kanunlarının altında yatan simetri, keşfedilmeyi bekliyor.

Uzay boşluğu ve diğer simetri özelliklerine dayanan korunum kanunlarının, fizik kanunları içindeki en derin ifadeler olduğu iddia edilebilir. Öte yandan bu ifadeler, Bertrand Rusself adındaki değerli matematikçi ve filozofun bir zamanlar iddia ettiği gibi saf "gerçekler" olabilir, çünkü, Russel'a göre korunan miktarlar, korunması gerektiği şekilde *ifade edilmiş-*

*Görelilik kuramı, bu üç kanunu dört boyutlu dünyada tek bir korunum kanununa dönüştürmüştür.

t Bertrand Russel, *ABC of Relativity* (New York: New American Library, 1959).

tir. Ben iki görüşün de doğru olabileceğinin düşünmek istiyorum. Eğer bilimin amacı en basit temel tahminler dizisini kullanarak doğayı tutarlı bir şekilde tanımlamaksa, temel tahminlerin basit ve hatta "açık" (uzay ve zamanın benzerliği gibi) olmasından ve bu tahminlerden çıkan kanunların gerçekler olarak adlandırılmasından daha iyi ne olabilir? Bilim insanı, en basit ve en genel tahminlerin çoğunun gerçeğin derinliğinden öte bir şey olmadığını düşünmüştür. Peki, tanımının rastgeleliğinin haricinde, keşfedilen herhangi bir şeyin, değişimin tüm evrelerinde sabit kalmasını söylemek önemli bir başarı değil midir?

Hâlâ yanıtlanmayı bekleyen bir soru ise, doğayı tanımlamak için ihtiyaç duyulan tek şeyin korunum kanunları olup olmadığı, olan biten *her şeyin* (tüm değişim kanunları, tüm zorunluluk kanunları) korunum kanunlarıyla ve hatta onun da ötesinde simetriyle mi açıklanacağıdır.

9. bölüm

Dalgalar ve Parçacıklar

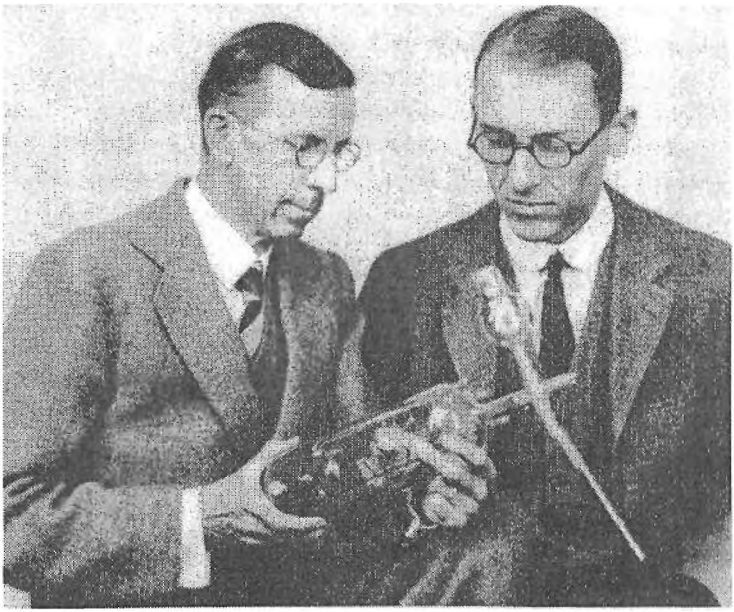
Birinci Dünya Savaşından önce Fransa'da kolej öğrencisi olan Prens Louis-Victor de Broglie ("Broy" diye okunur), kordiplomatiğe girme düşüncesiyle ilk olarak tarih konusunda yoğunlaştı. Sonra kuramsal fiziğe âşık oldu ve kendisine verilmiş olan tarih araştırma projesini yarım bırakarak, 1913'de yirmi yaşında fizik diplomasını aldı. 1913 yılı, Niels Bohr'un hidrojen atomunun kuvantum teorisini yayınladığı yıldı. 1929 yılında Nobel Ödülünü aldığında yaptığı konuşmada De Broglie, "fiziğin bütün alanına el uzatmaya devam eden kuvantumun tuhaf kavramı"na olan hayranlığından bahsedecekti.

Askerik hizmetinden sonra Broglie, Paris Üniversitesinde yüksek lisans çalışmasına başladı ve 1924 yılında devrim niteliğinde bir fikir içeren doktora tezini sundu; diyordu ki: kuvantum dünyasında dalgalar parçacıktır, parçacıklar da dalgadır. Bu fikir gücünü korudu. *Dalga-parçacık ikiliği,* kuvantum fiziğinin tam merkezinde yer alır. Daha sonra da Broglie, iki farklı düşüncenin kendisini bu fikri bulmaya yönettiğini söyledi. Bu düşüncelerden ilki, X ışınlarının hem dalga hem parçacık özelliği göstermesinin bilim insanları arasında artan bir farkındalığa neden olmasıydı. Arthur Compton'ın 1923'deki X ışınlarının atomların içindeki elektronlar tarafından yayıldığını gösterdiği çalışmasına kadar, çoğu fizikçi Einstein'ın foton gerçeğini istemeyerek kabul etmişti. (Satyendra Bose'a göre 1924'de bile foton hâlâ bir varsayımdı.) X ışınlarının elektromanyetik dalgalar olduğu konusunda

şüphe yoktu. Bu ışınlar kırılma ve karışma gibi standart dalga özellikleri gösteriyordu. Compton'ın çalışması ile *fotoelektrik etki* denilen fotonların bireysel olarak metal bir yüzeyden elektron fırlattığı bir fenomen, elektromanyetik dalgaların "zerresel" (o dönemin deyimiyle) özellikleri olduğunu göstermiştir. Eğer dalgalar (örneğin X ışınları) parçacık özelliği gösteriyorsa (bu de Broglie'a ilham kaynağıdır), neden parçacıklar da (örneğin elektronlar) dalga özelliği göstermesin?

De Broglie, klasik dünyada parçacıkların değil dalgaların niceliği olduğu gerçeğini de dikkate almıştır. Böylece, piyanonun içindeki tellerin ve kemanın tellerinin, org boruları içindeki havanın ve daha birçok sistemin dalgalarının rastgele frekanslarda değil, seçilmiş frekanslarda titreştiğini açıklamıştır. Klasik dünyada parçacıkların bu tür nicelikleri olduğu bilinmiyordu. Bu durum onun, atomlardaki enerji seviyelerinin gözlemlenen miktarlarının titreşen "madde dalgalarının sonucu mu olduğunu, aslında atomların bir müzik aleti gibi mi olduğunu merak etmesine neden oldu.

Bu nedenle de Broglie'u, elektronların -ve elektronlardan yola çıkarak diğer parçacıkların- ferkans ve dalga boyu gibi dalgasal özellikleri olduğunu düşünmeye yöneltti. Bundan üç yıl sonra, 1927 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde Bell Laboratuvarlarında çalışan Clinton Davisson ve Lester Germer ile onlardan ayrı İskoçya Aberdeen Üniversitesi'nde çalışan George Thomson (elektronun kaşifi J.J. Thomson'ın oğlu), elektron ışınlarının kristal yüzeylere çarptığında kırılma ve karışma etkileri (bakınız Şekil 31) gösterdiğini gözlemleyerek, elektronların dalga doğasını ortaya koydular. Gözlemlenen örneklerde elektronların dalga boylarını ölçtüler. Bu kanıttan önce bile, teorisyenler dalga fikrini kabul etmişlerdi. Örneğin, 1926 yılında Avusturyalı fizikçi Envin Schrödinger bir dalga denklemi geliştirmişti. Bu denklem hidrojen atomuna uygulandığında, de Broglie'un niceliği olan enerji için varsayımda bulunduğu "neden"i geçerli hale getiren, gözlem-

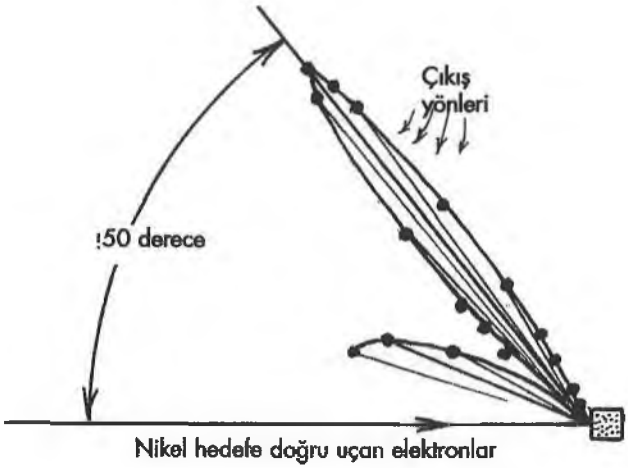


Clinton Davisson (1881-1959), solda ve Lester Germer (1896-1971), 1927 yılında elektron-kırılma çalışmalarında kullandıkları bir tüple. Fotoğraf Lucent Teknolojileri Bell Laboratuarları ve AIP Emilio Segre Görsel Arşivi.

lenen enerji miktarlarını açığa çıkarıyordu*.

Dalga-parçacık ikiliğinin fizikçiler için, ilk başta neden kabul edilmesi güç bir fikir olduğunu anlamak hiç de zor değil. Dalgalar ve parçacıklar, çok az ortak özelliği olan çok farklı iki kavram gibi gözüküyor. Günlük hayatta hemen hemen herkes hem parçacıkları hem de dalgaları bilir. Bir beys-

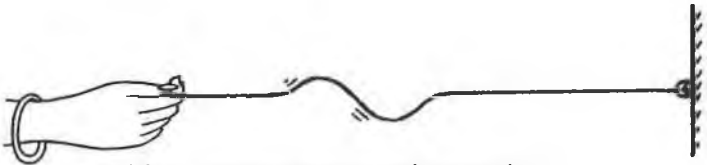
* Dalga-parçacık ikiliği, çok sayıda Nobel Ödülü kazandırdı: 1921'de Einstein fotoelektrik için, 1927'de Compton "Compton etkisi" (elektronlardan fırlatılan foton) için, 1929'da da Broglie elektronların dalga doğasını keşfettiği için, 1933'de Schrödinger "atomsal teorinin yeni biçimleri" (dalga denklemi) için, 1937'de Davisson ve Thomson kristaller tarafından elektronların kırılması için ve 1954'de Max Born dalga fonksiyonuyla olasılık arasında ilişki kurduğu için bu ödülü aldılar.



Şekil 31. Davisson ve Germer'in deneyinin sonuçları: 54eV'luk elektronlar bir nikel kristale çarptıktan sonra, elektron dalgalarının kırılma ve karışması nedeniyle çoğunlukla aynı yöne doğru yayılırlar. Şekil, Fizik Nobel Konuşmaları (Amsterdam: Elsevier, 1965) kitabından alınmıştır.

bol topu, tenis topu, golf topu ya da toz tanesi (veya uzayda gezinen bir asteroid) birer parçacıktır. Parçacık küçüktür (etrafındaki boyutların büyüklüğüyle karşılaştırıldığında); kütlesi vardır; herhangi bir zamanda belirli bir yerde bulunur; ve parçacığın momentumu ve enerjisi olabilir. Sizin dünyanızdaki dalgalar, su dalgaları, ses dalgaları, radyo dalgaları ve ışık dalgalarıdır. Bir su dalgası, bir dalganın temel özelliklerini taşır. Yayıldığı için *küçük değildir.* Yerini tam olarak belirtemezsiniz (belirli bir bölgede olmasına rağmen). Dalgalanır. Boyu iki dalganın zirvesinin ya da çukurunun arasındaki mesafe kadar olan dalga boyu vardır*. Bir birimlik zamanda ta-

*Su dalgasına enine, dalga denir çünkü su, dalga hareketinin yönünün enine doğru, çoğunlukla yukarı-aşağı hareket eder. Radyo ve ışık dalgaları da enine dalgalardır. Ses ise boyuna dalgadır. Bunun anlamı, titreşen maddenin dalga hareketi yönüne paralel olarak ileri-geri hareket etmesidir. Boyuna dalganın bile tepeleri (ortalamanın üzerinde yoğunlukta yerler) ve çukurları (ortalamanın altında yoğunlukta yerler) vardır, bu nedenle boyuna dalganın frekans ve hızının yânısıra iyi bilinen bir dalga boyu vardır.



Şekil 32. Bir ipten geçen "sınırlanmış" akım.

Şekil 32. Bir ipten geçen "sınırlanmış" akım

marnlanan dalga devri sayısı anlamına gelen frekansı vardır. Bir de titreşiminin gücünü ifade eden genliği vardır. Bu dalga, hızı olan bir dalga olabilir; ya da bir gitar telinin titreşimi veya bir flütün içindeki hava gibi (ya da banyo küvetinde ileri geri çalkalanan su gibi) başka yerde titreşim üretmeyen bir duran dalga olabilir.

Eğer seyahat ederse, bunu ne kadar enerji taşıdığına bağlı olmayan bir hızda yapar*.

Bu nedenle parçacıklar (klasik büyük dünyada) belirli yerlerde dururken, dalgalar durmaz. Dalgaların dalga boyu, frekansı ve genliği vardır, parçacıkların (görünüşte) yoktur. Bir parçacık, seyahat ettiği zaman, bir yerden diğerine gider. Bir dalga, bunu yapabildiği halde, bir maddeyi sürüklemeden seyahat eder. (Dalga hareket ederken bir su dalgasındaki su ya da bir ses dalgasındaki hava belirli bir bölgede titreşim yapar) Parçacıklar daha fazla enerjileri olduğunda daha hızlı hareket ederken, dalgalar (belirli türdeki) sahip oldukları enerjiye bakmaksızın aynı hızda yayılırlar. Yine de, klasik dalgalar ile parçacıklar bile bazı ortak özelliklere sahiptir. Bunlar bir yerden diğerine enerji ve momentum gönderebilirler. Ayrıca dalgaların en azından bir bölümü belirli bir yerde bulunur. Bir ucu kapalı olan bir ipte basit bir titreşimi ya da bir kilise orgunun kilisedeki yankısını düşünün.

Dalgalar ve parçacıklar atomun içindeki dünyada birleşebilmek için, kendilerinden biraz ödün vermeliydi. Atomun

*Dalga hızının dalga enerjisine bağlı olmayışı ışık dalgası için tamamıyla doğru, çoğu diğer dalga içinse oldukça doğrudur. Şok dalgaları bu kuralın bir istisnasıdır. Daha enerjiktirler ve sıradan ses dalgalarından daha hızlı hareket ederler.

içindeki dünyada parçacıklar artık tam olarak belirli bir yerde bulunamaz, bu olabilecek en büyük değişikliktir. Dalgalar da biraz daha "maddemsi" olmuştur. Titreşimi yapan şey, on dokuzuncu yüzyıl ve daha öncesinde uzaydaki ışık dalgalarının içinde seyahat ettiği düşünülen "ether"in (esir) aksine, enerjiye ve momentuma sahip bir varlık olan bir "alan"dır. Dalga, belirli bir ölçüde parçacığı taklit ederek, kısmen belirli bir yerde bulunabilir.

De Broglie Denklemi

De Broglie, tezinde, Einstein'ın $E = mâ$ denklemi kadar önemli olduğunu kanıtladığı, şaşırtıcı derecede basit bir denklem ortaya koydu. Bu eşitlik şöyleydi:

$$\lambda = \frac{h}{P}.$$

Solda dalga boyu, A. (lambda), var. Sağda Planck sabiti, h, momentuma, p, bölünüyor. (Klasik teoride momentum kütle çarpı hızdır, p-mv, bu nedenle bir nesne daha büyükse ya da daha hızlı hareket ediyorsa momentumu daha büyük olur. Görelilik kuramına göre, bir parçacığın hiç kütlesi olmasa bile momentumu olabilir.)* De Broglie'un eşitliği, bir dalga özelliği (dalga boyu) ile bir parçacık özelliğini (momentum) "eşitlik" işaretiyle birbirlerine bağlar. Birbirleriyle klasik anlamda pek ilgisi olmayan kavramları birleştirir. Bunları yapıştıran tutkal ise Planck'in sabitidir. Yani bu bağlantı bir *kuvantum bağlantısıdır.*

Bu denklem de dahil, bütün denklemler fikirleri özetlemekten daha fazlasını yaparlar. Hesaplama için bir tarif verirler. Örneğin bir fizikçi, bir elektron ışınının dalga boyu ölçüsüyle, bu ışının içindeki elektronların momentumunu hesapla-

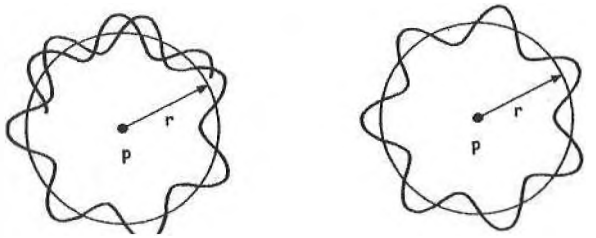
*Kütlesiz bir parçacığın momentumunun görelilik kuramına göre tanımı $p = E/c$'dir. E parçacığın enerjisi, c'de ışık hızıdır.

yabilir. Ya da bir ışının içindeni nötronların momentumunu bilen bir araştırmacı, nötronların dalga boyunu hesaplayabilir.

De Broglie denkleminde sağ "alttaki"nin momentumu (yani paydanın momentumu) önemlidir. Anlamı momentum büyüdükçe dalga boyunun küçüldüğüdür. Modern hızlandırıcıların çok büyük ve çok pahalı olmasının nedeni biraz buna bağlıdır. Araştırmacılar en kısa atom içi mesafelerini inceleyebilmek için çok küçük dalga boyları kullanmak isterler, bu nedenle parçacıkları büyük enerji ve dev momentuma getirmek için hızlandırmaları gereklidir.

Bohr'un hidrojen atomuyla ilgili ilk teorisine göre, atomun içinde en alt enerji seviyesindeki (zemin seviyesi) bir atom, saniyede 2 milyon metrelik ($2x10^6$) bir hızla hareket eder. Atomun momentumunu bulmak için, bu hız elektronun kütlesiyle çarpılır, sonra elektronun dalga boyunu hesaplamak için de Broglie'un denklemi kullanılır. Yanıt yaklaşık $3xl0^{-10}$ m'dir. Bu sonuç, Broglie'u heyecanlandırmıştı; çünkü bulunan bu dalga boyu hidrojen atomundaki en alt enerji seviyesindeki dairesel yörüngenin Bohr'un teorisine göre hesaplanmış şekliyle aynıdır. Bu durum Broglie'un, *kendi kendini takviye etme* şeklinde bir ilke oluşturmasını sağladı. Bu ilkeye göre, elektron yörüngesinin etrafında bir kez döndüğünde, elektron dalgası tam sayılı dalgalanma daireleri oluşturur, böylece dalgadaki bir tepe, bir tur sonunda bir başka tepeyle buluşup, onu takviye eder. Birdenbire elektronun dalga doğası, bu hareket durumunun sahip olduğu büyüklük ve enerjiye niçin sahip olduğunu açıklayabilecek hale geldi. Düşünüldüğünde, başka hiçbir dalga boyu ve tepe, bir diğer tepeyle buluşmayacaktı. Aslında yörünge etrafında pek çok kez dolaştıktan sonra dalga, kendini yok edecekti. (Şekil 33'ün sol tarafında gösterildiği gibi).

Broglie'un bir yörünge etrafında dönen dalga fikri çok basit düzeydeydi, kuvantum mekaniği tam olarak geliştirildiğinde, atomdaki elektron dalgasının üç boyutlu olduğunu, belirli bir yörüngede bulunmayıp uzaya yayıldığının düşünül-



Şekil 33. De Broglie'un, dalganın kendine zarar vermesi görüşü.

mesi gerektiğini gösterdi. Bununla beraber, de Broglie'un doğru hesapladığı dalga boyu, hidrojen atomunun boyunu yaklaşık olarak gösterdi, bu da atomun yayılan dalgalarının anlaşılabilmesi için bir kapı açtı.

Peki ya insanlar? Bizim de dalga boyumuz var mı? Evet, ama ölçülemeyecek kadar küçük. Dalga doğamızdaki "belirsiz" boyumuz gerçekten çok küçük. İm/s hızla yürüyen bir kişinin dalga boyu yaklaşık 10^{-35} m'dir, yani basit bir atom çekirdeğinin boyundan çok daha küçük. Peki niye bu kadar küçük? Çünkü insanın momentumu son derece büyük (elektrona göre). Doğru, insanın hızı yavaş, ama kütlesi basit bir parçacığın kütlesine göre astronomik. Peki ya daha büyük ve daha yavaş varlıklar? Daha küçük ve daha yavaş varlıkları araştırmanın bir yararı yok. Yılda bir metre ilerleyen bir gram ağırlığındaki bir böceğin dalga boyu yaklaşık 10^{-23} m.'dır, yani hâlâ algılanamayacak kadar küçük. Bu nedenle insanlar, beysbol topları ve hatta bakteriler kesin tanımlanabilen bir sınırdalar, fark edilemeyen dalga etkileri yok. Ancak elektronun dalga doğası her atoma hacim verir ve böylece insanların, beysbol toplarının ve bakterilerin çökmesine engel olur.

Bir denklemi öğrenmekle anlamak iki farklı şeydir. Herkes kısa bir sürede $E=mc^2$ *veX* = h/p denklemlerini hafızalarına yerleştirebilir, ancak bu iki denklem gerçekten neyi ifade eder? Niye bu kadar önemlidir? Anlamlarını "hissetmeye"

yardımcı olması için, gelin bunları kıyaslayalım. Einstein'ın kütle enerji denklemi görelilik kuramının temel eşitliklerinden biridir; de Broglie'un dalga-parçacık denklemi ise kuvantum teorisinin temel eşitliklerinden biridir. $E = mâ$ denklemindeki c evrensel sabiti ışık hızıdır, bir bakıma bu c, görelilik teorisinin temel sabitidir: c uzay ile zaman arasında bir bağ kurarak, teorinin "ölçü sistemini" kurar. Işık hızından çok daha az hızda hareket eden her şeyi klasik fizik açıklar; ışık hızına yakın ya da ışık hızında hareket eden her şey göreliliğin yeni etkilerini gösterir.

$X = h/p$ denkleminde h evrensel sabiti, Planck sabitidir ve her kunatum eşitliğinde görülen, kuvantum teorisinin temel sabitidir: h/2Tt açısal momentumun ölçüldüğü birimdir ve h atomun içindeki dünyanın "ölçü sistemini" kurar, yani atomların boylarını ve parçacıkların dalga boylarını belirler.

Einstein'ın denkleminde, E ve *m'ye* değişken nicelikler denir, çünkü c'nin tersine, bunlar farklı parçacıklarda farklı değerler alabilir. Benzer şekilde, de Broglie'un denklemindeki X ve p'de değişken niceliklerdir. Her iki denklem de, doğaya en önemli yeni görüşleri sağlayacak bir sentezi ortaya koyar. Einstein'ın çalışmasından önce kütle ve enerji, birbiriyle ilgisi olmayan ayrı kavramlar olarak düşünülmüştü, ancak bunlar Einstein'ın denkleminde basit bir orantısal ilişkiyle bir araya getirildi. De Broglie'un denklemi de dalga boyu ve momentumla ilgili benzer bir sentez ortaya koyar. De Broglie'un çalışmasından önce dalga boyu ve momentumun birbiriyle ilgisi olmayan ayrı kavramlar olduğu düşünülmüştü (kuramsal fotonun verdiği ipuçlarına rağmen).

Denklemlerdeki değişken niceliklerin pozisyonu son derece önemlidir. Einstein'ın denklemindeki m'nin önde oluşu, daha fazla kütlenin daha fazla enerjiye sahip olduğu, ya da aksine, daha büyük kütlenin yaratılması için daha fazla enerjinin gerektiği anlamına gelir. Daha önce de belirttiğim gibi, de Broglie'un denkleminde p'nin altta oluşu, daha fazla momentumu olan bir parçacığın daha kıs<t bileşik dalgası olduğu

anlamına gelir. Parçacık ne kadar hafif ve yavaş olursa, dalga boyu da o kadar büyük olur; böylece dalgaya benzer özellikler daha belirgin hale gelecektir.

Son olarak; iki denklemin sabitlerinin büyüklükleri çok büyük önem taşır: içinde yaşadığımız makro ölçülü dünyada karşılaştığımız "normal" büyüklükler ile kıyaslandığında, *c* büyük, *h* ise küçük kalır. İnsan merkezli terimlerle düşünüldüğünde, küçük bir kütlenin karşılığı büyük bir enerjidir, çünkü m, c^2 gibi büyük bir sayıyla çarpılır. Günlük hayattaki enerji değişikliklerinin çoğunda kütle değişiklikleri fark edilemeyecek kadar küçüktür. (Enerjiye dönüştürülen bir gram kütle 1945 yılında Hiroşima'yı mahvetmeye yetmişti.)

Kuvantumun dalga etkileri, *h*'nin küçüklüğü nedeniyle duyularımız tarafından algılanmaz. Normal bir momentumla birleşmiş dalga boyu sıfıra yakındır. Bu sabitliklerin büyüklükleri, görelilik kuramı ve kuvantum mekaniğinin sonradan ortaya çıkmasıyla bağlantılıdır. Bunun kesin nedeni, bu teorilerdeki temel sabitliklerin son zamanlarda sıradan insan deneylerinden ayrılmasıdır, bilim insanının deneysel teknikler kullanarak gözlem alanını, doğrudan insan algısının çok ötesine taşımadan önce, teorilerin formüller halinde ifade edilme şansı çok azdı.

Bugün, parçacıkların dalga doğası ve radyasyonun parçacık doğasıyla ilgili pek çok kanıt vardır. Bu kanıtlardan en eskileri, her ikisi de foton fikrini denetleyen, elektromanyetik radyasyonun emiliminin sadece kuvantum kümelerinde olması (yani fotoelektrik etki) ve X ışınlarını atom elektronları tarafından yayılması fenomenleridir. Foton, *bir bakıma,* dalga - parçacık ikiliği için "mükemmel" bir örnektir, çünkü belirgin dalga boyu ve frekansı vardır (ışık) ve bir parçacık olarak açıkça doğar ve ölür (yayılır ve yutulur). Çift karakteri, örneğin nötr bir pion dönüşümünde, şöyle gösterilir:

$3\Gamma^{\circ} \rightarrow y + Y$-

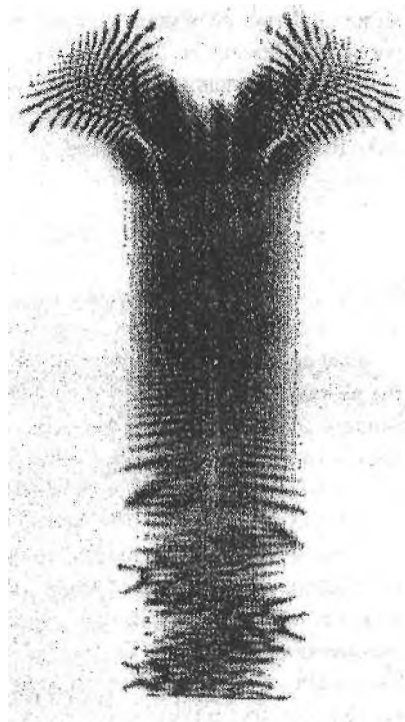
Patlamalı olan pion dönüşümünde iki foton yaratılır, buna karşılık bu fotonlar yok olurken yeni parçacıklar yaratabilirler.

Dalgalarla ilgili en ikna edici doğrudan kanıt kırılma ve karışma olaylarıdır. *Kırılma* dalganın bir engeli geçerken biraz eğrilmesi ve bükülmesidir. Örneğin uzun dalga boyu olan radyo dalgaları bir binanın etrafına dolanıp binanın "gölge"sinde görülebilir. Parçacıkların sadece bir engeli geçerken yoldan çıktığı beklenemez. (Çok kısa dalga boyu olan radyo dalgaları, çoğunlukla parçacık gibi davranır ve binalar tarafından engellenebilir.) Eğer iki dalga ışını bir araya gelirse *karışabilir* -eğer dalgalardan birinin tepesi diğerinin tepesiyle eşleşirse "yapıcı" eğer dalgalardan birinin tepesi diğerinin çukuruyla eşleşirse "yıkıcı" olur. (Fizikçilerin karışma tanımı, sıradan karışma tanımından daha geniştir. Karışma dalgaları destekler veya engeller.)

On dokuzuncu yüzyılın başlarında İngiltere'den Thomas Young ile Fransa'dan Augistin Fresnel ışığın dalga doğasını ilk defa açıkça gösterirken, bunu kırılma ve karışma etkilerini kullanarak yaptılar. Onların bu çalışmalarının bugün doğru olduğunu biliyorsak da, o dönemde bu çalışmalar pek etkili olmamıştır. Isaac Newton'ın ışıkla ilgili parçacık teorisi hâlâ sallantıdaydı*. Ama sonunda ışık teorisi önem kazandı, foton bilim dünyasına girip, ışığa parçacık özelliği verene kadar da önemini korudu. Ardından 1927 yılında, Davisson, Germer ve Thomson'in kristallere çarpan elektronların kırılma ve karışma etkilerinin açıklandığı deneyleri gündeme geldi. Parçacıkların (klasik anlamdan bakıldığında) kırılma ve karışmaları gerektiğini düşünmek için hiçbir sebep olmadığından, bu deneyler, tıpkı Young ve Fresnel'in bundan bir yüzyıldan daha öncesindeki deneyleri gibi, dalga davranışını kesinlikle kanıtlamıştır.

Thomas Young'm ışıkla ilgili yaptığı deneyin modern versiyonuna çitf-yarık deneyi denir. Fikir oldukça basittir (bakı-

*Bilim tarihçileri olan Gerald Holton ve Stephen Brush, ışığın parçacık teorisinin, savunucusu Isaac Newton'ı daha sonradan taraftarlarını meşgul ettiği kadar çok meşgul etmediğini söylediler. Kahramanlara duyulan sevgiyi bazen fizikte bile sarsmak zordur.



Şekil 34. Bir vidanın gölgesinde kırılma ve karışma görülüyor.

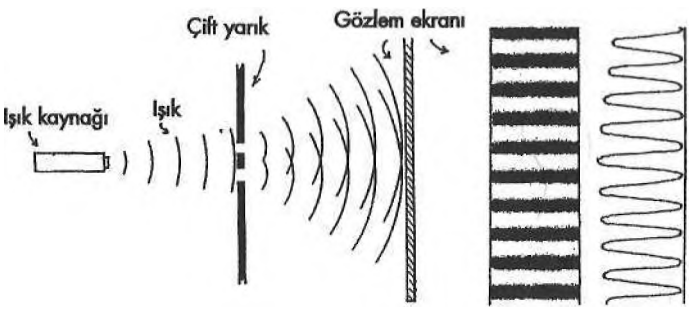
nız Şekil 35). Bir kaynaktan yayılan bir dalga, bir çift dar ve yakın yerleştirilmiş yarık hariç elektriği geçirmeyen bir kutuya çarpar. Dalga parçası her bir yarığı geçerken kırılarak elektriği geçirmeyen levhanın uzaktaki bölümüne yayılır. Bu nedenle dalgalar, levhanın arkasında duran gözlem ekranının herhangi bir noktasına, her iki yarıktan çıkarak varacaktır ve bu dalgalar yapıcı ya da yıkıcı olarak karışabilecektir.

Aslında, gözlemleme noktası ile iki yarığın arasındaki mesafeye bağlı olarak, bu dalgalar her ikisini de yapacaktır. Yarıkların arasındaki orta noktanın tam karşısındaki noktanın iki yarığa olan uzaklığı eşittir, bu nedenle tepeden tepeye ya da çukurdan çukura yapıcı karışma olacaktır. Bu noktadan biraz yukarı çıkıldığında, üst yarığa olan mesafenin alt yarığa olan mesafeden tam olarak yarım dalga boyu daha az olduğu bir yere ulaşılacaktır. Bu noktada bir dalganın çukuru bir baş-

ka dalganın tepesiyle karşılaşacak ve bu durum yıkıcı karışmayla sonuçlanacaktır. Daha da yukarı çıkıldığında, alttaki yangın üstteki yarıktan bir tam dalga boyu uzaklıkta olduğu bir yere varılacaktır. Bu durum iki dalgayı tekrar aynı evreye getirecek, yani tepeden tepeye ve çukurdan çukura yapıcı karışma olacaktır. Bütün bunların sonucunda, gözlem ekranında bir ışık dizisi ve karanlık çizgiler görülecektir. Bunlar, dalga davranışının henüz dumanı üzerinde silah gibi kanıtıdır. Üstelik, iki yarığın yerleri ve karanlık çizgiler arasındaki mesafelerin ölçülmesiyle, dalga boyunu hesaplamak mümkündür.

Kuvantum döneminde, çift-yarık deneyinin iki önemli uzantısı görülmüştür. Birincisi, bu deney ışık yerine elektronlarla yapılmıştır; gözlemlenen karanlık çizgiler elektronların dalga boylarının ölçülmesini sağlayarak de Broglie denkleminin doğruluğunu (kristal-yayılım deneyindeki gibi) ispatlamıştır. İkincisi, bu deney o kadar zayıf bir ışık kaynağı ile yapılmıştır ki, cihazdan her defasında sadece bir tane fırlatılan fotonlardan her birinin varışı, bir gözlemleme ekranı yerine bir dizi küçük dedektör tarafından belirlenebilmiştir.

Şekil 36'da görülen bir-kerede-bir-parçacık çift-yarık deneyi, kuvantum fiziğinin en tuhaf olan en basit ve en açık göstergelerinden biridir. Bohr ve Einstein, 1930'larda henüz sadece kuramsal düzeydeyken onu tartıştılar. Daha sonra elektronikteki ve tarama cihazlarındaki gelişmeyle, pratikte

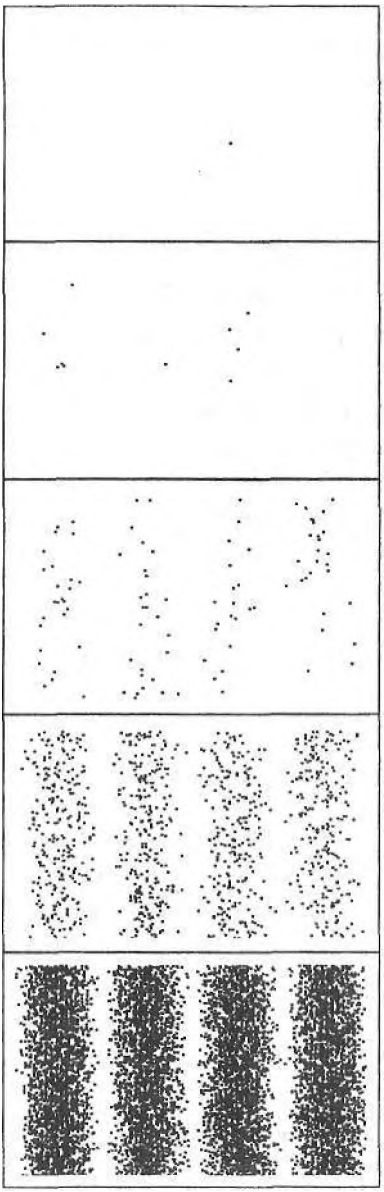


Şekil 35. Çift-yarık deneyi.

bu olay başarıldı ve halen bu olay bilimle ilgili olmayan insanlar kadar bilim insanlarını da şaşırtmaya devam ediyor.

İşte olanlar: Birinci foton yarık çiftine fırlatılır. Dedektör dizisinde bir noktada görülür. Vardığı nokta tahmin edilemez. Sonra birinci fotona çok benzeyen ikinci foton da yarık çiftine fırlatılır. O da dedektör dizisinde belirlenemeyen bir noktaya varır. Bu olay fotonların peş peşe gönderilmesiyle devam eder. On tane foton dedektör dizisindeki noktalara çarptıktan sonra, dizilim rastgele olur. Yüz foton buraya vardıktan sonra, bir dizi oluşmaya başlar. Fotonların çoğu, dalga teorisinin yapıcı karışma olacağını tahmin ettiği noktalara ulaşır (bunların çoğu elektrik ve ışığı geçirmeyen levhanın "gölgedeki bölümüne gelirler). Daha az sayıda foton ise, dalga teorisinin kısmi yıkıcı karışma olacağını tahmin ettiği noktalara ulaşır. Bin ya da on bin foton cihazdan geçtikten sonra, dedektör dizisinde, dalgalardan beklendiği gibi, net bir koyu çizgi dizisi görülür.

Bu ne anlama geliyor? Rastgele ve tahmin edilemeyen bireysel olaylardan sonra, sonunda açık ve basit bir dizi ortaya çıkar. Şöyle sorular sorabilirsiniz: Bir foton, bir yarıktan mı geçiyor yoksa ötekinden mi? Bir foton varmak için neresinin uygun olduğunu, neresinin olmadığını nasıl "biliyor"? Esas vardığı noktaya kim karar veriyor? Prensipte aynı olmalarına rağmen, niçin iki foton asla aynı şekilde davranmıyor? Gözlemlerle, kuvantum teorisiyle ve bir dizi diğer deneyle tutarlı olan tek açıklama, her fotonun kaynağından dedektöre giderken bireysel davranan bir dalga olduğudur. Her foton *iki yarıktan da* geçer. Bu foton bir noktada yaratılır. Bir noktada görülür. Yaratılmasıyla görülmesi arasında (yok olması), bir dalga gibi davranır. *Bu durum, dalga-parçalık birlikteliğinin temelidir.* Üstelik, olaya olasılık da karışır. Hiçbir foton nereye varacağını bilmez.



Şekil 36. Çift yarığa bir kerede bir tane atıldıktan sonra fotonların (ya da başka parçacıkların) tespit edildiği noktaların görüntüsü. 5 tane panel sırasıyla 1,10,100,1.000 ve 10.000 parçacığın sonucunu göstermekte.Her panel, bir önceki panelin sonuçlarını içerir. Görüntü: Ian Ford; www.ianford.com/dslit/.

Sadece farklı noktalara varma olasılığı olduğunu bilir: yüksek olasılıkla dalga teorisinin öngördüğü yapıcı karışma, düşük olasılıkla dalga teorisinin öngördüğü yıkıcı karışma noktası.(Bir bozuk parayla bin kere yazı tura attığınızı düşünün. Belirli bir atışta yazı ya da tura geleceği önceden tahmin edilemez. Daha önce neyin geldiği bu sefer yazı mı tura mı geleceğini etkilemez. Çünkü zaten olasılık faktörü nedeniyle, bin atıştan sonra yaklaşık olarak beş yüz kere yazı gelecek olması -ama *tam olarak* beş yüz değil- yaklaşık beş yüz kere de tura gelecek olması konusunda rahat olabilirsiniz. Şunu da belirtmeliyiz ki, tek bir foton bir anda iki yarık tarafından kırılabilir ve bu foton kendisiyle karışabilir. Ne zaman bir fotona baksanız (yani dedektöre baktığınızda, ya da aslında fotonu gözünüzün retinasına denk getirdiğinizde), onu bir noktada görürsünüz. Bakmadığınızda, bu foton elektromanyetik dalgaların klasik teoride yaptığı gibi boşluğa yayılan bir hareket dalgadır.

Bazı fizikçiler iki-yank deneyini yerine oturmamış bir deney olarak görüyorlar (üzerinde ne kadar çok düşünürseniz, Niels Bohr'u anlama konusunda kafanız o kadar karışır), çünkü kuvantum mekaniğinin, sayısız başarısına rağmen, eksik olduğu düşünüyorlar, kuvantum teorisini içine alan ve onun başarılarını daha "makul" açıklayan yeni bir teorinin yirmi birinci yüzyılda -gelecek yıl ya da bundan elli yıl sonra da olabilir- ortaya çıkacağına inanıyorlar. İki-yank deneyinin tuhaflıklarından sıkıntı duymayan fizikçiler bile kuvantum mekaniğini açıklayan bir nedenin bulunması gerektiğini düşünme eğilimindeler.

Atomların Büyüklüğü

1898'de JJ. Thomson'm elektronu keşfetmesinden yaklaşık on yıldan fazla bir süre sonra, pek çok fizikçi sadece bilinen klasik kavramları kullanarak atomsal yapıyla ilgili bir te-

ori geliştirilmesini ümit ederek avunuyordu. Thomson, kendi geliştirdiği atom modeline Noel Pudingi modeli (erikli) adını verdi. Thomson, içinde negatif küçük zerreciklerin gömülü olduğu (elektron "üzümleri"), pozitif yüklü küre şeklinde bir topak ("puding") düşündü. Eğer pudingin pozitif yükü, üzümlerin negatif yüküyle eşleşirse,bu puding tamamı nötr elektrik yüküne sahip olacak ve atomun büyüklüğü puding topağının büyüklüğü tarafından belirlenecekti.

Teorisyenler, elektronların pozitif yükün içinde nasıl hareket edeceğini belirlemeye çalıştılar, belki bu hareket ileri geri salınma şeklinde olabilirdi (bu da atomun, tıpkı bir müzik aleti gibi niçin sadece belirli frekanslarda radyasyon yaydığını açıklamaya yardım edecekti), ayrıca böyle bir atomun niçin sabit durduğunu anlamaya çalıştılar. Bu çabalar onları hiçbir yere ulaştırmadı. Verilen örneğin yanlış olduğunu düşünmeniz hiç de şaşırtıcı olmaz. Doğru - ancak bilimde doğru yol bulunmadan önce çıkmaz sokaklara girilmelidir.

Doğru yolu bulmak bir krizle mümkün oldu. Bu kriz Ernest Rutherford'un, 1911'de, atomun merkezinde küçük bir çekirdek olan ve içinin büyük bir bölümü boş olan bir oluşum olduğunu keşfetmesiydi. Dönemin diğer modelleriyle birlikte, Noel Pudingi modeli de camdan dışarı atıldı. Rutherford'un yeni modeli, küçük bir "güneş" olan çekirdeğin, elektron "gezegen'leri tarafından sarıldığı son derce basit bir gezegen modeliydi. Peki niye bu bir krizdi? Çünkü klasik teorinin böyle bir atomun nasıl davranacağıyla ilgili söylenecek çok özel sözleri vardı ve bu iyi bir haber değildi. Milyarlarca yıldır güneş sisteminde, Güneş'in yörüngesinde mutlu bir şekilde bulunan gerçek gezegenlerin aksine, Rutherford'un atomundaki elektronlar, klasik fiziğe göre, merkezdeki çekirdeğin etrafında kabaca saniyenin yüz milyonda biri ($İO^{8}$ s) kadarlık bir sürede dönecekti. Davranışlardaki bu dev fark, elektronlarda elektrik yükü olmasından ve elektronların çok büyük bir süratle ivme kazanmasından kaynaklanıyordu. Bu nedenle, elektromanyetik teoriye göre, elektronlar içe

doğru dönerken enerjilerini radyasyona vererek sürekli artan bir frekansta bu radyasyonu yayması gerekiyordu. Tabii ki atomlar böyle yapmıyor. Boyutlarını koruyor ve radyasyonu sadece rahatsız edildikten ("heyecanlandırıldıktan") sonra yayıyorlar.

Niels Bohr, Rutherford'un çalışmasının sonuçlarını öğrendiği zaman, son dönemlerde radyasyonun açıklanması için kullanılmış olan kuvantum teorisinin, madde teorisinde yani atomsal teoride rol oynaması gerektiğini düşünmüştü. 1913 yılındaki çalışmasında Bohr, farklı kuvantum durumları, kuvantum sıçramaları ve açısal momentum niceliğiyle ilgili güçlü fikirlerini ortaya koymuştu, ama henüz dalga fikrini açıklamamıştı. Bohr'un teorisi, atomların büyüklüğünü ve sabitliğini açıklamaya doğru atılan geçici bir adımdı. Daha önce de belirttiğim gibi, Louis de Broglie madde dalgaları fikrini geliştirerek, bunların Bohr'un kurallarını ve atomların büyüklüklerini nasıl açıklayacağını belirledi.

Onun bu önemli fikrine göre, bir atomun büyüklüğünü atomun içindeki elektronların dalga boyu belirliyordu. Broglie'un konuyla ilgili ilk düşüncesinde sadece bir önemli ayrıntı görülmektedir: bugün biliyoruz ki (daha önce de belirttiğim gibi) dalgalar sadece bir yörüngesel yol izlemezler, atomun üç boyutlu alanına yayılırlar. Bu nedenle erikler puding olmuştur.

Bir dalganın, dalga olarak ifade edilebilmesi için, en az bir tepesi ile bir çukuru olması gerekir. Yükselmeli ve alçalmalıdır, belki defalarca ama en az bir kere. Dalga bir nokta olarak tanımlanamaz. Fiziksel büyüklüğünün en az kendi *dalga boyu* kadar olması gerekir. Bu nedenle, bir atomun büyüklüğüne elektronun dalga doğası ve özellikle elektronun dalga boyu karar verir. Peki elektron, küçük bir dalga boyuyla çekirdeğe sokulacağına ya da büyük bir dalga boyuyla çekirdekten uzaklaşacağına nasıl karar verir? Tuhaftır ki, yanıt, bir bilyenin çukur bir kasede yuvarlanıp sonunda kasenin en dip noktasında durmasıyla bağlantılıdır. Bilye en düşük enerji sevi-

yesini arar. Elektron da.

Elektronun en düşük enerji seviyesini arayışını anlamak için, atomun içinde enerjiye katkı sağlayan iki şeyi düşünmeniz gerekir. Bunlardan birincisi elektronun *kinetik enerjisidir.* Bu enerji, elektronun momentumu arttıkça artar ve bu nedenle Broglie'un denklemine göre, elektronun dalga boyu küçüldükçe de artar. Başka bir deyişle, elektron dalgası kendini çekirdeğe yakın küçük bir noktaya ne kadar çok çekerse, kinetik enerjisi de o kadar büyür. Eğer elektron klasik beklentilere uysaydı ve çekirdeği sarsaydı, kinetik enerjisi sınırsız bir şekilde büyürdü, çünkü dalga boyu yok olurdu. Bu nedenle elektronun en alt enerji seviyesi arayışı, dalga boyunu ve atomun boyunu azaltmakla sağlanamaz. Öte yandan, atomun içindeki enerjiye katkı sağlayan ikinci enerji ise, çekirdekle elektron arasındaki çekim gücü olarak tanımlanan *potansiyel enerjidir.* Atom küçüldükçe bu enerji de küçülür, ama bu, kinetik enerjinin büyüme oranından daha az bir oranda olur. Aslında bu iki tür enerji birbiriyle yarışır. Dalga doğası nedeniyle elektron, dalga boyu büyük ve kinetik enerjisi küçük olsun diye, kendini olabildiğince geniş bir alana yaymak ister. Bu sanki elektronun çekirdek tarafından püskürtülmesi gibidir.

Yine de aynı zamanda, elektrik gücü tarafından çekirdeğe doğru çekilir ve daha küçük bir boyuta gelmek ister. Rekabet eden etkilerin bir denge sağladığı ve toplam enerjinin asgari düzeye indirildiği belirli bir atom büyüklüğü vardır. Bu ölçü parçacık dünyası standartlarına göre oldukça büyük olan yaklaşık 10^{-10} m'lik bir büyüklüktür.

Tahmin edeceğiniz gibi, Plancak sabiti, h, atomların büyüklüğünü ayarlamada rol oynar. Eğer h daha küçük olsaydı (yani kuvantum etkilerinden daha çok bahsedilseydi), atomlar daha büyük olurdu. Eğer h kuramsal olarak sıfır olsaydı, kuvantum etkisi hiç görülmezdi. Elektronlar klasik fiziğin kurallarına uyar, atomun çekirdeğini sararlardı. Atom yapısı diye bir şey olmazdı; ayrıca bu durumu düşünecek bilim in-

sanı da olmazdı.

Görünen o ki, hidrojenden uranyuma ve ötesine, bütün atomlar yaklaşık olarak aynı boydadır. Bu durum yukarıda bahsettiğim aynı tür enerji rekabetiyle açıklanabilir. Eğer uranyum çekirdeğinin etrafında sadece tek bir elektron olsaydı, bu uranyum atomu bir hidrojen atomundan yaklaşık doksan iki kat daha küçük olurdu. Elektron kinetik enerjisiyle yüksek miktarda yüklü olan çekirdeğin çok daha güçlü potansiyel enerjsi arasındaki denge noktasının çekirdeğe daha yakın olduğu görülürdü. Daha kuvvetli çekici güç nedeniyle uranyum elektronunun dalga boyu, hidrojen atomununkinden daha küçük, kinetik enerjisi ise daha büyük olabilir. Aslında uranyum çekirdeğinin en iç bölgesindeki elektronlar 10^{-10} m yerine sadece yaklaşık 10^{-12} m'lik küçük bir alanı kaplarlar. Ancak bu atoma daha çok elektron eklendikçe, bunlar daha geniş alanlara yayılır. Doksan ikinci ve son elektron, doksan iki pozitif yüklü ve doksan bir negatif yüklü gruba katılır. Bu elektronun, hidrojende olduğu gibi, sadece bir birimlik net yükü vardır, bu nedenle hidrojen atomundaki yalnız elektron gibi, bir hareket seviyesine yerleşir.

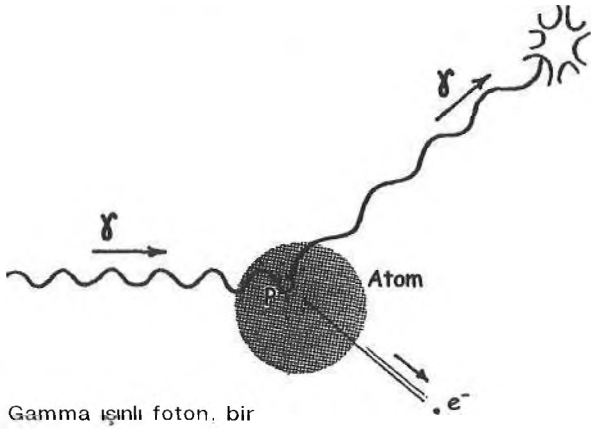
Dalgalar ve Olasılık

Dalgalarla olasılığın birbirlerine nasıl bağlı olduğunu görmek hiç de zor değil. Bir dalga boşlukta bir bölgeye yayılır. Olasılık da yayılabilir. Bir elektron burada veya şurada olabilir. Bir atomun içinde örneğin, bir elektronun belirli bir yerde olduğu söylenemez; ancak bunu araştırmanın ve bir elektronu büyük bir olasılıkla belirli bir noktada bulmanın yolları vardır. Şekil 37'de gösterilen kuramsal deneyde, yüksek enerjili gamma ışınlı bir foton bir atoma fırlatılıyor. Bu foton bir elektronla etkileşime giriyor ve bu elektronun daha düşük enerjili bir fotonla birlikte fırlatılmasına neden oluyor. Ortaya çıkan bu iki parçacık yani elektron ve foton, dalga boyları

bir atomun büyüklüğünden çok daha küçük olacak kadar büyük momentuma sahiptir. Bunun anlamı, yollarının belirlenmiş ve atomun içinde etkileşimin gerçekleştiği küçük bölgeye (prensipte) dönebilecek olmalarıdır. Deneyi yapan fizikçi şöyle diyebilir, "P noktasında bir elektron olmalıydı çünkü etkileşim orada oldu." (Bu yöntemle küçük bir bölgeyi belirlemeye çalışmak aslında pek pratik değil. Bu deneyin kuramsal oluş nedeni budur.)

Bu deney tekrarlandığında etkileşim noktası, atomun içinde başka herhangi bir yer olacaktır. Deney bin ya da bir milyon kez tekrarlandığında, bir düzen oluşacaktır. Atomun içinde belirli bölgelerde etkileşim olasılığı yüksek olacaktır, belirli bölgelerde bu olasılık düşük olacaktır ve belirli bölgelerde -diyelim ki çekirdekten uzakta- etkileşim olasılığı önemsenmeyecek düzeyde olacaktır. Deneyi yapan fizikçi, deneyi tekrarlamadan önce şöyle söyleyebilecektir, "Bir sonraki denememde etkileşimin tam olarak nerede olacağıyla ilgili hiçbir fikrim olmamasına rağmen, bu etkileşimin herhangi bir bölgede olacağı olasılığını biliyorum."

Böylece atomun içinde yayılan bir dalga olarak tanımla-



Şekil 37. Gamma ışınlı foton, bir atomdan bir elektron fırlatıyor.

nan elektron yine de bir noktada etkileşime girebilir ve böyle bir etkileşim, basit bir yöntemle elektron dalgasının genliğine bağlanır.

Başka bir örnek verecek olursak, ağır bir radyoaktif çekirdekteki bir alfa parçacığının dalgasının, çekirdeğin dışına kadar uzanan küçük bir "kuyruk"u vardır. Bu uzak dalga kırıntısı nedeniyle alfa parçacığının güç bariyerini geçerek yayılması için belirli bir olasılığı vardır. Aksi taktirde bu güç bariyeri onu çekirdeğin içinde tutabilir ve sonra alfa dönüşüm olayının işaretini vermek üzere gidebilir. Bu klasik fizikte açıklanamayan ama kuvantum fiziğinde maddenin dalga doğası ve dalgalarla olasılık arasındaki bağlantı ile açıklanan bir tünel kazma fenomenidir.

Şimdi de geçmişe dönelim. 1926 yılının Mart ayında, genç Werner Heisenberg kuvantum mekaniğinin kendi versiyonunu açıkladıktan birkaç ay sonra, Erwin Schrödinger dalga mekaniğiyle ilgili çalışmasını yayınladı. O zamanlar Zürih'te fizik profesörü olan Avusturyalı Schrödinger, yeni dalga denklemini hidrojen atomunun bilmen enerji seviyelerini açıklamak için kullandı*. Heisenberg'in bir önceki yılki çalışmasındaki gibi, Schrödinger'in çalışması da derhal fizikçilerin dikkatini çekti ve fizikçiler Shrödinger'in dalga fonksiyonunun anlamını henüz anlamasalar da öneminin farkına vardılar.

Schrödinger'in denklemini başarıyla kullanması ve diğer fizikçilerin bu denklemdeki temel matematiksel değişken olan dalga fonksiyonunun anlamını bilmeden, onun başarısını alkışlamaları size tuhaf gelebilir. Schrödinger'in denklemi-

* İşte Schrödinger'in zamandan bağımsız, yani bir boyutta ilerleyen parçacık için oluşturduğu denklem:
$chflıtf + (im/h^2)\,[E\text{-}V]\backslash\backslash l = 0.$
Basit görünüşü aldatıcı olan bu denklemde *X* hareket yönünde olan pozisyonunun koordinatı, *m* parçacığın kütlesi, *h 2n* ile bölünmüş olan Planck sabiti, *V* potansiyel enerji, *E* toplam enerji ve \\ı dalga fonksiyonunu temsil ediyor. Schrödinger'in bu denklemi 1925'in sonunda İsviçre, Arosa'da bir kız arkadaşıyla kış tatili yaparken oluşturduğu güvenilir kaynaklarca söylenmektedir.

ne "eigenvalue" (özdeğer) denklemi denir*.

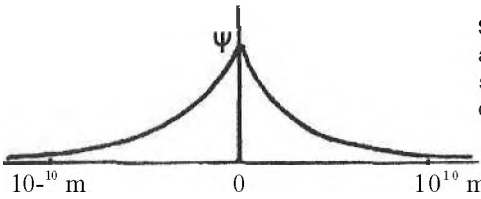
Bu denklemin, enerji değişkeninin, E, sadece belirli değerleri için "makul" çözümleri vardır. E'nin diğer değerleri için olan çözümler saçma ve fiziksel olarak mümkün olmayan çözümlerdir. Bu nedenle Schrödinger, hidrojende mümkün olan enerji seviye miktarlarını, dalga fonksiyonunun (her ne anlama geliyorsa) matematiksel açıdan kabul edilebilir bir şekilde davranmasına dayanarak (örneğin sonsuz olmayarak) bulmuştu.

O zaman Göttingen'de kırk dört yaşında kıdemli bir fizikçi olan Max Born, kuramsal fiziğe çok büyük bir ilgi duyuyordu. Meslektaşı Pascual Jordan'la birlikte, Heisenberg'in kuvantum mekaniğinin en iyi, matriksler kullanarak (değişkenler arasındaki ilgiyi gösteren tablolar) açıklanabileceğini göstererek, bu sistemi daha anlamlı hale getirmişlerdi. Daha sonra da dikkatini Schrödinger'in yeni denklemine verdi ve üç ay içinde zaten başı dönen fizik dünyasını sarsan bir fikir geliştirdi. İlk olarak Schrödinger'in dalga fonksiyonunun, Ψ, gözlemlenemeyen bir miktar olduğunu söyledi. Bu, fizikte yeni bir şaşırtıcı görüştü. O zamana kadar, fizikçilerin denklemlerinde kullandıkları bütün kavramlar gözlemlenebilir miktarlarda oluşuyordu. İkinci olarak "dalga fonksiyonunun karesi Ψ^2 gözlemlenebilir bir miktardır ve bu bir olasılık olarak yorumlanmalıdır," dedi. t

Dalga fonksiyonuyla olasılık arasındaki bağlantıyı anlaşılır hale getirmek için, sizlere hidrojen atomunun en alt enerji seviyesini anlatacağım. Bu seviyedeki elektronun dalga fonksiyonu çekirdeğin bölgesinde bulunur ve çekirdekten 10^{-10} m'nin ötesine doğru giderek, "kademeli" olarak son derece küçülerek sıfıra iner (bakınız şekil 38). Atomun bu dalga gö-

* "Eigenvalue" sözcüğü Almanca ile İngilizce karışımı bir sözcüktür. Böyle sözcükler fiziğin uluslar arası yapısını gösterir.

t 7. Bölüm'deki bir dip notu tekrarlamak gerekirse: dalga fonksiyonu ψ karmaşık bir nicelik olabilir, yani hem gerçek hem sanal bir sayıyla ifade edilebilir. Olasılık olarak yorumlanması gereken sayı, dalga fonksiyonun, Ψ, mutlak karesidir.



Şekil 38. Bir hidrojen atomunda en alt enerji seviyesindeki elektronun dalga fonksiyonu.

rüntüsü iki şekilde yorumlanabilir. İlk olarak, elektronun belirli bir yerde bulunmadığını söyleyebiliriz. Yani özellikle belirli bir noktada değildir. Atomun içine tamamıyla yayılır ve dalga fonksiyonu onun nasıl yayıldığını gösterir. Bu ifade elektronun dalga doğasına odaklanmıştır. Elektronun parçacık doğasını düşündüğümüzde ise, olasılık devreye girer. Elektronun gerçekten de yayılmasına ve aynı anda atomun her yerinde olmasına rağmen, kendini her zaman bir parçacık gibi gösterme olasılığı vardır. Yukarıda açıkladığım kuramsal deneyde olduğu gibi, eğer yüksek enerjili bir gamma ışını fotonu gelirse, bir noktada bir etkileşim olabilir ve bu noktadan bir elektron fırlayabilir.

Böyle yapma olasılığı dalga fonksiyonun karesiyle orantılıdır. Born'un kendisi olasılık yorumuna, de Broglie'un söylemiş olduğu ve Schrödinger'in denkleminin gösterdiği gibi elektronun bir dalga özelliği olmasına rağmen, kendini bazen parçacık gibi göstererek zerre özelliği de taşıdığını fark ederek vardığını söylemiştir. Bu nedenle dalga -parçacık birlikteliği ile dalga- olasılık bağlantısı el ele ilerler.

1900 yılı civarındaki ilk çalışmalarda bile, doğanın temel kanunlarının olasılığa dayandığının kanıtı vardı. Rutherford'un, Bohr'un çalışmasıyla ilgili endişesi (elektron nereye atlayacağına nasıl karar verir?), olasılığın kuvantum sıçramalarında rolü olabileceğini ima ediyordu. Yine de fizikçiler kesinliğin yerini olasılığın almasına pek hevesli değildi ve Born onları zorlayana kadar bu meseleyle yüz yüze gelmemeyi tercih ettiler. Born'un çalışmalarını sonucunun uzantıları, bir denge fonksiyonunun bir *yerde* bulunma olasılığına bağlan-

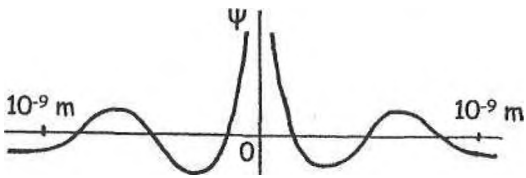
ması durumundan da öteye gider. Birdenbire, kuvantum davranışlarının tüm yönlerinin olasılığa dayandığı ortaya çıktı: olayın olduğu zaman, olaym sonuçlarından birinin *tercih edilmesi* vb.

6. Bölüm'de belirttiğim gibi, Einstein, olasılığın temel fizikte olmasından memnun değildi ve sık sık Tanrı'nın zar attığına inanmadığını söylerdi. Fizikçilerin neredeyse tamamı olasılıkla banştılar, ama bir kısmı da ondan rahatsız olmayı sürdürdü. Ben kuvantum fiziğiyle ilgili son sözün söylenip söylenmediğiyle ilgili büyür bir şüphe içindeyim.

Dalgalar ve Tanelilik

Atomun merkezinden uzaktaki, atom elektronlarından birinin dalga fonksiyonu sıfıra çok yakındır. Dalga fonksiyonu, atomun merkezinde en çok bire ulaşabilir, sonra atomun diğer tarafında tekrar sıfıra yakın bir değere inebilir. Bu durum hidrojen atomunun dalga fonksiyonunun en düşük enerji seviyesindeki (zemin seviyesi) davranışıdır ve Şekil 38'de gösterilmektedir. Daha enerjik seviyelerde (heyecanlı seviyeler), dalga fonksiyonu iki veya daha fazla türde dalgalanma yapar: ya Şekil 39'daki gibi içeri-dışarı yani atomun merkezine doğru yaklaşıp uzaklaşarak, ya da çekirdeğin etrafında dairesel hareketlerle dönerek.

Bu davranış, temel perdedeki ve daha yüksek ikinci perdedeki keman telinin titreşimini hatırlatır. Bir telin iki ucunda

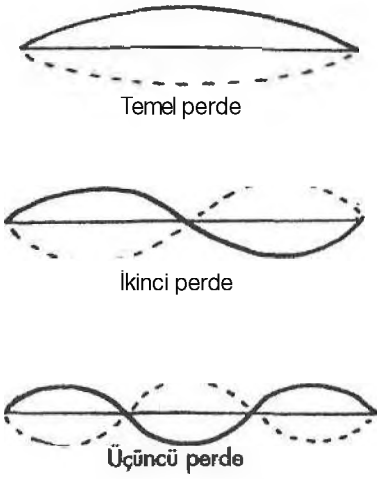


Şekil 39. Bir hidrojen atomundaki daha yüksek enerji seviyesindeki elektron dalga fonksiyonu.

sabit tutulan en alt titreşim frekansı, telin uzunluğunun bir yarım dalga boyu kadarıdır. İkinci perdedeki ses, uzunluğunun tamamı kadar bir dalga boyuna sahiptir. Üçüncü perdedeki ses ise uzunluğunun bir buçuk katı dalga boyuna sahiptir. Bu böylece devam eder. İkinci perdedeki ses temel perdenin iki katı frekansa sahiptir (müzik terminolojisine göre bir oktav daha fazladır), üçüncü perdedeki ses, temel perdenin üç katı frekansa sahiptir vb. Kemanın bir teli yay ile çalındığında bu armonik seslerin hepsi birlikte ses çıkarır. Sesin belirli bir kalitede olması armonik seslerin yoğunluk oranına bağlıdır. Fakat bu anlatılanlar içinde esas önemli olan şey keman telinin titreşiminin frekanslarının niceliği olmasıdır. Belirli bir uzunlukta ve gerginlikte olan keman teli sadece farklı bir frekans setinde titreşir.

Daha önce bu bölümde belirttiğim gibi, dalga boylarının bu klasik niceliği, de Broglie'u madde dalgaları olup olmadığı konusunda düşünmeye iten nedenlerden biridir. O, belki de, madde dalgalarının bir keman telindeki dalgalar gibi (ya da üflemeli bir müzik aletinin içindeki hava akımı gibi) sadece belirli frekanslarda titreşebileceğim ve bu gerçeğin, atomlarda karşılaşılan enerji miktarını açıklayacağını düşünmüştü. Gerçeğe yaklaşmıştı. Schrödinger'in dalga denkleminin fiziksel olarak kabul edilebilir çözümleri, dalga fonksiyonunun (ve de olasılığın) atomun çekirdeğinden uzaklaştıkça hızla sıfıra yaklaşmasında bulunur. Bu tür çözümler sadece belirli (niceliği olan) enerjilerde olur.

Diğer enerjilerde ise dalga fonksiyonu sıfır olması gerekirken sonsuz olur. Böyle bir olasılık doğanın işine yaramaz. Bu nedenle dalga fonksiyonunun atomun her iki yanında çekirdekten belirli bir uzaklıkta sıfır olması ihtimali (ya da pratikte sıfır olması) tıpkı bir keman telinin iki ucunu birleştirmeye benzer. Dalga fonksiyonunun, keman telindeki dalga gibi, sadece belirli dalga boyları vardır. En uzun dalgası (atomun bir ucundan ötekine tek bir iniş ve çıkış), keman telinin en alt titreşimine denktir ve atomun zemin seviyesini tanım-



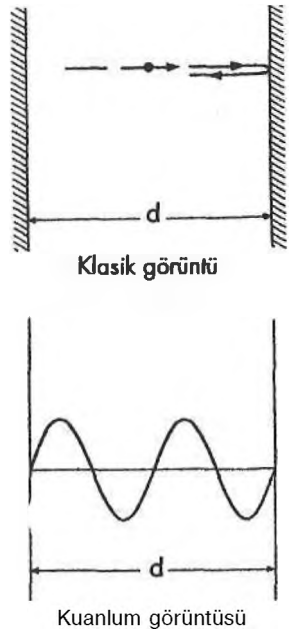
Şekil 40.
Titreşen bir keman teli.

lar. Daha fazla dalga daireleri olan dalga fonksiyonları armonik seslere denktir ve atomların heyecan seviyesinde bulunur.

Dalga fonksiyonu, bir parçacığın farklılığının aksine uzaya sürekli dağılmasına rağmen, yine de bu dalga fonksiyonunun enerjinin farklılığını açıklıyor olması ilk başta mantığa biraz aykırı gibi gelebilir. Müzikle kurulan benzerlik bunu daha makul hale getirmeye yardımcı olabilir.

Fizikçiler basit örnekleri sever ve kuvantum dünyasında *bir kutunun içindeki parçacıktan* daha basit bir örnek yoktur. Bir elektronun (veya başka herhangi bir parçacığm) delinmesi kesinlikle mümkün olmayan iki duvar arasında düz bir hat üzerinde ileri geri hareket etmeye zorlandığını düşünün.

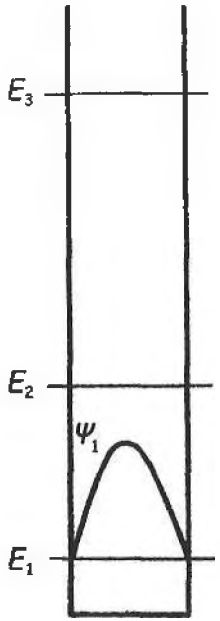
Klasik fizikte, bu parçacık herhangi bir miktarda kinetik enerjiyle hareket ettirilebilir ve bu enerjiyle ileri geri zıplamaya süresiz olarak devam edecektir, kuvantum tanımı ise çok farklıdır. Parçacığın momentumu tarafından belirlenen bir dalga boyu vardır, parçacığın momentumu büyükse dalga boyu kısa olur, momentumu küçükse dalga boyu uzun olur. Rastgele seçilen dalga boylarında, duvarlar arasında ileri geri hareket edecek olan dalga, kendisiyle karışacak ve bir süre



Şekil 4 1 . Bir kutunun içindeki parçacıktan görüntüler.

sonra kendini yok edecektir. İleri geri çok sayıda hareketten sonra parçacığı bir yerde bulma olasılığı sıfırdır. Bu felaketten kaçınmak için, dalga duvarları arasındaki çok sayıdaki yolculuğu sırasında kendisini kuvvetlendirecek dalga boyu seçilmelidir. Şekil 41 duvarlar arasındaki boşluğu tam olarak iki dalga boyunun kuşattığı bir örneği gösteriyor. Bu boydaki bir dalga, pek çok sayıda gidip gelme yolculuğundan sonra da güçlü kain ve kendini takviye edecek durumda olur. Bu tercih, kutunun içindeki parçacığın izin verilen, niceliği olan enerjisini tanımlar.

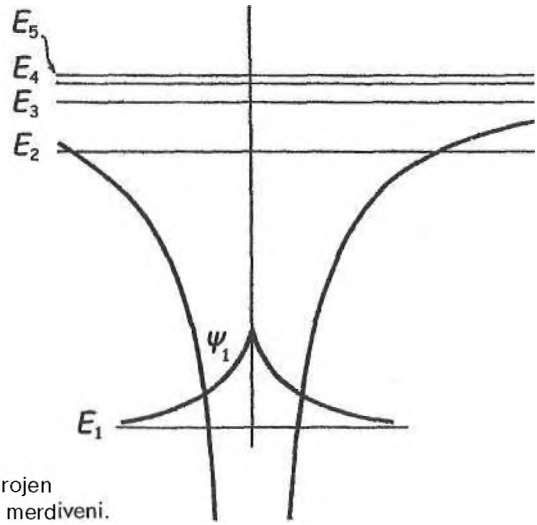
Bir kutunun içindeki parçacığın sahip olabileceği en uzun dalga boyu duvarlar arasındaki boşluğun iki katıdır; yani duvarlar arasında yarım dalga boyu mesafe vardır, tıpkı bir keman telinin en alt perdedeki dalga boyunun telin yarısı kadar



Şekil 42. Bir bütünün içindeki parçacığın enerji merdiveni.

olması gibi. İkinci olasılık ise duvarlar arasında bir dalga boyu olabileceğidir. Daha sonra 1,5 dalga boyu bu boşluğa sığar, sonra 2,0, sonra 2,5 vb. Bu dalga boyları düzenli bir sırada, başarılı bir şekilde kısalır. Momentumları, dalga boylarıyla ters orantılı olarak düzenli bir sırada büyür, aslında bunu eşit adımlarla yapar. Yani, ikinci seviye birinci seviyenin iki katı momentuma sahiptir, üçüncü seviye birinci seviyenin üç katı momentuma sahiptir vb. Eğer parçacık orantılı değilse (ışık hızına oranla yavaş hareket ediyorsa), enerjisi momentumun karesiyle orantılıdır. Bu nedenle, bir kutunun içindeki parçacığın niceliği olan enerjileri, gitgide genişleyen aralıklarla yukarı doğru ilerler. Şekil 42'de bu türde enerji seviyelerinin ilk üçü görülüyor.

Kutudaki parçacıktan çıkarılacak ders, bir yere hapsedil-



Şekil 43. Bir hidrojen atomunun enerji merdiveni.

meşinin, enerjinin miktarının artmasına yol açtığıdır. Duvarlar ne kadar yakınlaşırsa enerji seviyeleri o kadar uzaklaşır. (Yine müzikle bir benzerlik. Bir viyolonselin telleri bir kontrbasın tellerinden daha yüksek frekansta titreşim yaparken, bir kemanın telleri de bir viyolonselin tellerinden daha yüksek frekansta titreşir.) Eğer bir parçacık hiç kuşatılmamışsa, herhangi bir enerjiye sahip olabilir, çünkü herhangi bir dalga boyuna sahiptir.

Şimdi gelin sanal durumdan (kutudaki parçacık), atomun içindeki elektron gerçeğine dönelim. Atom elektrona bir tür duvar sağlar -elektrik gücü duvarları. Atomun duvarları sanal duvarlardan iki yönden ayrılır. İlki, bu duvarlar geçilemez. Elektronun dalga fonksiyonu belirli bir noktada tam olarak sıfıra ulaşmaz ve bu noktanın dışında sıfır kalır. Duvarın dışında kademeli olarak (aslında gerçekte oldukça hızlı bir şekilde) sıfıra iner. İkincisi, elektronun enerjisi arttıkça, atomun duvarları arasındaki mesafe genişler. Bu nedenle heyecan seviyesindeki bir elektron, temel seviyedeki bir elektrona göre daha az kuşatılmıştır. Buradan çıkarılacak sonuç, atomdaki

kuvantum enerjilerinin enerji arttıkça uzaklaşacağına yakınlaştığıdır; tıpkı kutudaki parçacık örneğindeki enerjilerin yaptığı gibi. Aradaki fark Şekil 43'de gösterilmiştir.

Dalgalar ve Sınırsızlık

Daha önce de söylediğim gibi, dalga doğası gereği yayılır. Dalga boyuna ve onu sınırlandıran şeye bağlı olarak bir bölgeye çok veya az yayılır. Atomların büyüklüğü, dalgaların belirli bir yerde sınırlanmaması sonucunda anlaşılır. Belirli bir enerjisi olan bir parçacık dalgasının, rahatça hareket edebileceği asgari düzeyde bir yere ihtiyacı vardır ve bu gerçek atomun büyüklüğünü belirler. Dalgaların belirli bir yerde sınırlanmamalarının başka bir sonucu ise, fizikçilerin küçük boyutları yeterince iyi inceleme şanslarının sınırlanmasıdır. Çok küçük bir boyuta ulaşmak demek çok küçük dalga boylan kullanmak ve dolayısıyla büyük momentum ve büyük enerji kullanmak demektir. Böylece fizikçiler, dalgaların belirli bir yerde sınırlanmamasının sıkıcı gerçekliğini araştırmak gibi en küçük atom içi süreçlerini incelemek için, dev maliyeti olan dev hızlandırıcılar inşa ederler.

Diyelim ki bir limandaki gemileri, ona vuran dalgaları analiz ederek incelemek istediniz. Demirli olan büyük bir gemiye çarpan dalgalar, gemiden güçlü bir şekilde etkilenir (sayfa 12'de gösterildiği gibi). Gemi sakin suda bir "gölge" bırakır ve geminin etrafındaki dalgalar belirli bir şekilde kırılır. Kırılan bu dalgaların bazıları diğerleriyle karışabilir. Geminin boyunu ve şeklini, ona farklı yönlerden çarpan dalgaları inceleyerek oldukça doğru bir şekilde öğrenebilirsiniz. Öte yandan, eğer dalgalar suyun içine çakılı olan bir kazığa vurmuş olsaydı, bundan çok etkilenmeyen bu kazığın boyunu ve şeklini ortaya çıkarmayacak şekilde sadece orada küçük bir şey olduğunu gösterirdi. Ancak bir kazığı analiz etmek için ışık dalgalarından yararlanırsanız, yani ışık dalgalarına

bakarsanız hiç sorun yaşamazsınız. Buradan çıkarılacak ders şudur: Eğer dalga boyu incelenen nesneden çok daha küçükse, bu dalgalar mükemmel analiz aracı olurlar. Eğer dalga boyu incelenen nesneden çok daha büyükse, nesneyle ilgili hiçbir detay öğrenilemez. Dalganın, dalga boyu tarafından yönlendirilen bir "belirsizliği" vardır.

Protonun iç yapısıyla ilgili bazı bilgiler veren ilk deneyler, 1950'lerin ortalarında Stanford Üniversitesi'nde, Robert Hofstadter tarafından yapıldı. Hofstadter'i Princeton Üniversitesi'nde ihtisas yaparken tanımıştım, o zamanlar Hofstadter orada, yüksek enerjili parçacıkları incelemek için daha iyi yöntemler icat edip geliştirmeyle uğraşan bir doçentti. Stanford'a geçmek istediğinde Princeton'in ona kalmasını teklif etmemesi çok büyük bir şans oldu, çünkü Stanford'da ihtiyacı olan şeye ulaştı: elektronlar doğrusal bir hızlandırıcı tarafından 600 MeV'lik bir enerjiye getirildi. Bu elektronların dalga boyu $2x10^{-15}$ m'ydi, yani protonun içini inceleyecek kadar (ucu ucuna) küçüktü. Bu dalga boyu kabaca bir protonun çapı kadardır, yani hidrojen atomunun boyundan 100.000 kat daha küçüktür. Hofstadler mükemmel bir deney uzmanıydı, üstelik kuramları, ortaya koymayı diğer fizikçilere bırakmayı da sevmezdi. Hidrojeni elektron bombardımanına tutmak ve atomların merkezindeki protonlar tarafından yolları değiştirilen elektron modellerinin incelenmesi amacıyla yaptığı deneylerin sonuçlarını, kendisi büyük bir dikkatle analiz ederdi. Protonu gerçekten açarak, hem elektrik yükünün hem de manyetik özelliklerinin yayıldığı bir iç yapısı olduğunu ve ölçülebilir büyüklükte bir varlık olduğunu gösterdi. Bu çalışmasından dolayı Hofstadter, 1961 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

Daha sonra Stanford'daki bilim insanları, artık elektronların enerjisini 50 GeV'e çıkartan iki mil uzunluğunda bir Stanford Doğrusal Hızlandırıcısı inşa ettiler. Enerjisi 50 GeV olan bu elektronların dalga boyu, tek bir proton ya da nötronun boyutlarından çok daha küçük olan $2,5x10^{-17}$ m uzunluğunday-

di. Chicago yakınlarındaki Tevatron'da bulunan Fermi labo ratuvarında, 1 TeV'lik (1 trilyon elektron volt) protonların dalga boyu yaklaşık 10^{-18} m'dir. Daha da küçük dalga boyuna sahip parçacıklar üreten, daha büyük bir hızlandırıcı şu anda inşa halindedir*. İlginçtir, çoklu GeV ve TeV enerji seviyelerinde, aynı enerjiye sahip olan proton ve elektronların dalga boyları yaklaşık olarak aynıdır. Bunun nedeni, kinetik enerjilerinin kütlelerinden çok daha büyük olması ve böylece kütlelerinin olup olmamasının ya da ne kadarlık kütlelerinin olduğunun hiçbir öneminin olmamasıdır.

Şunu da eklemeliyim ki, sürekli artan enerjiye ulaşmadaki amaç, sadece gitgide daha küçük dalga boyları elde etmek değildir. Enerjinin kendisi de önemlidir, çünkü yeni ve daha ağır parçacık kütleleri, mevcut parçacıkların kinetik enerjisinden oluşur. Dikkat ederseniz, Tablo B.4'de örneğin W ve Z bozonlarının kütleleri protonun kütlesinin yaklaşık 80 ile 90 katıdır, Tablo B.2'de ise zirve kuarkın kütlesinin protonunun kütlesinin yaklaşık 180 katı olduğu görülmektedir. Eğer daha büyük parçacıklar keşfedilmeyi bekliyorsa, onları yaratmak için daha da çok enerji gerekecektir.

Uzun dalga boyu, atomun iç yapısı ile ilgili çalışmalarda her zaman geri planda kalmaz. Termal enerjisi yavaşlatılan (1 eV'den daha aza indirilen) nötronların dalga boyları, bir atomun büyüklüğüyle kıyaslanabilecek bir ölçü olan 10^{-10} m civarındadır. Böyle bir nötronun "büyüklüğü" ya da "belirsizliği" bir çekirdeğin boyundan on binlerce kat daha büyüktür. Bu nötron çekirdeğin içiyle ilgili hiçbir detayı açıklayamaz ama klasik hesaplamalara göre geniş bir sınırı olmadan, çekirdeklere etkileşim kurmak üzere ulaşabilir. Böyle yaparak, sıfır açısal momentumda nötron-çekirdek etkileşiminin belirli özelliklerini gösterir. Üstelik, eğer nötron yeterince yavaş-

* Cenevre'deki CERN'de inşa edilen "büyük hadron çapıştırıcısı" Large Hadran Collider (LHC) protonların enerjisini 7 TeV'e yükseltecek. Bu protonlar eşit enerjideki karşıt protonlarla çarpışacak ve 14 TeV'lik bir enerjiyle yeni bir kütle yaratılması mümkün olacaktır.

latüırsa, her seferinde birden fazla çekirdekle etkileşime girebilir ve bir madde parçasındaki çekirdek dizisi tarafından kırılabilir. Nötronun çekirdeğe ulaşma durumu çekirdek kaynaşması için de önemlidir. Yavaş bir nötron, bir uranyum 235 çekirdeği bulabilir ve yörüngesi bütün çekirdekleri yok ediyor gibi görünse de, bir kaynaşma olayı gerçekleştirir.

Çakışma ve Belirsizlik İlkesi

1927 yılında kuvantum mekaniğinin yaratılmasının büyük telaşlı girdabının ortasında, Heisenberg *belirsizlik ilkesini* ortaya koydu: bazı fiziksel nicelik çiftlerinde, niceliklerden birinin doğru ölçüsü, diğer niceliğin ne kadar doğru ölçüldüğüyle sınırlıdır. Basitleştirecek olursak, kuvantum mekaniği bilme yeteneğimize bir sınır koyar. De Broglie'un denklemi ve iki-yarıklı madde dalgası karışma deneyinde olduğu gibi, belirsizlik ilkesi de kuvantum dünyasının temelinde önemli bir yer işgal eder.

Belirsizlik ilkesinin bir şekli şöyle yazılabilir:

A x *Ap* = %

Sağ tarafta hazır bulunan Planck sabiti (burada 2rc'ye bölünmüştür), kuvantum mekaniğinin her denkleminde görülür. Bu denklemde momentump ile, pozisyon (mesafe) *x* ile gösterilmektedir. A işaretleri ise burada "belirsizliği" ("değişikliği" değil) ifade eder: Ax mesafenin belirsizliğidir; Ap ise momentumun belirsizliğidir. Bu iki belirsizliğin çarpımı *n* sabitine eşittir*, *h* insan ölçülerine göre son derece küçük olduğundan, *Ax* ve Ap'nin^ıer ikisi de günlük hayattaki tüm uygulamalarda sıfır olarak kabul edilir. Büyük bir nesnenin pozisyonunun ve momentumunun ne kadar doğru ölçülebildiği konusunda doğanın koyduğu bir sınır yoktur. Eğer, örneğin, bir

* Doğrusunu söylemek gerekirse, bu denklem belirsizliklerin sonuçlarına daha az sınırlama getirir; bu, doğanın kendisinin koyduğu bir sınırdır. Daha büyük belirsizlikler, ölçümlerde yanlışlıklara yol açar.

kişinin yerini basit bir atomun çapı içinde belirlemek isteseydiniz, bu kişinin hızı (prensipte) 10^{-26} m/s civarında olurdu. Atomun içindeki dünyada hikâye daha farklıdır. Atomun içinde bir yerlerde olduğu bilinen elektron (yani yaklaşık 10^{-10} m'lik bir belirsizlik durumunda), doğal olarak saniyede bir milyon metrelik (10^{6} m/s) hız belirsizliğine sahiptir.

Belirsizlik ilkesi insanların hayal gücünü etkilemiş ve (ne yazık ki) bilimden başka alanlarda da kullanılmıştı. Bilime saldırmak isteyen bu insanlar, "kesin" olan bilimlerin aslında çok da kesin olmadığını kanıt olarak gösterebilirler. Aslında bu, doğa ve bizim bilme yeteneğimizle ilgili çok derin bir ifadedir, ama bunun, maddenin dalga doğasının çok daha az gizemli bir yönü olduğu düşünülebilir.

Belirsizlik ilkesini anlamak biraz zordur ama son derece önemli bir fikri kavramakla mümkündür: bir dalga ancak farklı dalga boyları karışırsa sınırlandırılabilir (kısmen hapsedilebilir). Farkla dalga boylarının bu karışımına *çakışma* denir ve çakışma kuvantum dünyasının temel özelliklerinden biridir.

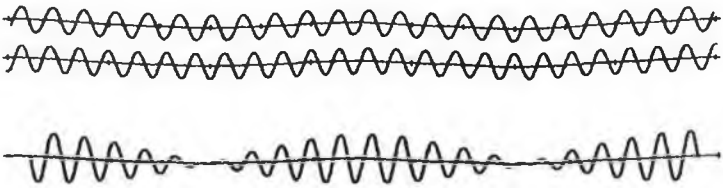
İlk olarak karışmamış bir dalga düşünün, bu Şekil 44'de gösterildiği gibi belirli bir dalga boyu olan bir dalga olsun. Eğer bu dalga bir maddeye aitse, momentumu, de Broglie'un $p = h/\lambda$ denklemindeki gibi olan (küçük bir farkla yeniden yazılmış) sabit bir hızda hareket eden bir parçacığı temsil eder. Peki bu parçacık nerede? Her yerde ya da farklı yerlerde olma olasılığı eşit (dalganın sınırsız boyutu üzerinde)*. Bu parçacığın yerinin belirsizliği sonsuz; momentumunun belirsizliği ise (ve de dalga boyunun) sıfırdır.

Bu sıra dışı bir durumdur, yani en azından belirsizlik ilkesiyle tutarlıdır. Eğer iki belirsizliğin sonuçları tutarlıysa, bun-

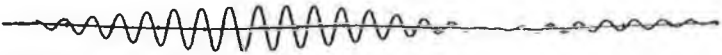
* Bir anlık zaman diliminde, Şekil 44'deki sinüs dalgasının karesinin tepeleri ve vadileri vardır, böylece parçacığın belirli yerlerde olma olasılığı, diğer yerlerde olma olasılığından daha fazladır. Ancak zamanla, dalga yayıldıkça parçacığın belirli yerde olmasının yüksek ve düşük olasılıkları değişir. Ortalama bir zaman geçince, parçacığın bir yerde olma olasılığı, başka herhangi bir yerde olma olasılığıyla eşit olur.



Şekil 44. Bir dalga boyundaki "saf" bir dalga.



Şekil 45. Dalga boyları
yüzde 10 oranında değişik olan iki dalga, ayrı ve üst üste.



Şekil 46. Dalga boyları yüzde 10 oranında değişen çok sayıda dalganın çakışmış görüntüsü.

lardan birinin sadece sonsuz büyük olması durumunda diğeri sıfıra yakın düzeyde küçük olabilir.

Şimdi pek çok farklı dalga boyunun çakıştığı zaman ne olduğunu düşünün. Şekil 45'de dalga boyları yüzde 10 oranında farklı olan iki dalganın çakışması sonucu görülüyor. Azami takviye noktasından beş dalga (yapıcı karışma) sonucunda, dalgalar yıkıcı olarak karışır. Sonuçta; her biri on dalga boyu genişliğinde olan dalgaların bölgelerde kümelenmesi şeklinde bir kısmi yerleşme olur.

Eğer pek çok farklı dalga boyu üst üste gelirse ama farkları hâlâ toplam yüzde 10 olursa, sonuç Şekil 46'da görüldüğü gibi, genişliği on dalga boyu olan bir bölgede kümelenmedir. Bu durumda, parçacığın yerinin belirsizliği yaklaşık on dalga boyu azaltılmıştır ve momentumunun belirsizliği de karışık dalga boylarıyla aynı oranda yani yüzde 10 oranında artmıştır.

Şekil 47. Pek çok dalga boyunun çakışmasının sonucu.



Dalganın yerini daha da sınırlamak mümkündür. Şekil 47'de tek bir iniş çıkışı olan bir dalga görülmektedir. Bunu başarmak yaklaşık yüzde 100'lük çakışan dalga boyu serisi ve böylece yaklaşık yüzde 100'lük momentum belirsizliğiyle mümkün olmuştur.

Bu örneklerin gösterdiği gibi, parçacığın yerinin (küçük Δx) belirsizliğini azaltmak, çok sayıda dalga boyu ile momentumun (büyük Δp) büyük belirsizliği ile karıştırmakla mümkün olur. Hidrojen atomunun zemin seviyesinin dalga fonksiyonu bu fikri açıklamaya yardımcı olur. Bir elektron atomun içinde kuşatılmıştır, ama nerede olduğu tam olarak söylenemez. Elektronun yerinin belirsizliği atomun tamamı kadar büyüktür. Benzer şeklide, bu elektronun momentumu sadece çok genel olarak belirlenebilir. Belirsizlik ilkesine göre elektronun momentumunun belirsizliği şöyle hesaplanabilir. $\Delta p = \hbar/\Delta x$.

Belirsizlik ilkesinin parçacık dünyasında bir başka şekilde uygulanışı ise şöyledir:

$\Delta t \, \Delta E = \hbar$.

Burada t zaman, E ise enerjidir. Zaman ile enerji yer ve momentum gibi, kendilerince bir doğruluğa göre birlikte ölçülemeyen bir çift niceliktir. Eğer zamanın belirsizliği küçükse, enerjinin belirsizliği büyüktür, ya da zamanın belirsizliği büyükse, enerjinin belirsizliği küçüktür. 3. Bölüm'de açıkladığım gibi, belirsizlik ilkesinin bu şekli yararlı bir amaç için kullanılabilir: yani son derece kısa ömürlü parçacıkların yaşam sürelerini ölçmede kullanılabilir. Böyle bir parçacığın kısa ömrünün anlamı, Δt'sinin küçük, ΔE'sinin büyük olmasıdır. Deney yapan fizikçi pek çok dönüşüm olayında gözlemlenen enerji "yayılımını" ölçer, böyle ΔE'yi bularak Δt ve

parçacığın yaşam süresini hesaplayabilir.

Öte yandan, belirsizlik ilkesinin zaman-enerji şekli her zaman çok yararlı değildir. Fizikçi, zamanı daha doğru belirlemek için sayısız miktarda araştırma yaparak, bir atomun içindeki belirli kuvantum sıçramaları tarafından yayılan radyasyonun frekansının olağanüstü doğruluğunu bilmek ister.

Bu frekans, Planck-Einstein formülündeki *(E - hf)* bağlantının enerjisi tarafından belirlendiği için, bağlantının enerjisi her ne belirsizlikte olursa olsun, yaydım frekansının belirsizliğiyle yansıtılacaktı. Buna karşılık enerji belirsizliği, heyecan seviyesinin yaşam süresine bağlıdır. Foton yayılımıyla dönüşmeden önce uzun bir süre yaşamış olan bir seviye, uzun bir zaman belirsizliğine sahiptir; yayılan fotonun enerjisindeki belirsizlik, benzer şekilde, küçük olacaktır. Zaman tutmayla ilgili en ileri araştırma, kısmen, atomların içindeki çok uzun ömürlü uygun heyecan durumlarının araştırılmasına dönüşecektir.

Belirsizlik ilkesinin gizemini daha da azaltmak için, bu ilkenin büyük ölçekli dünyada bilinen bir zaman-frekans versiyonu olduğunu belirtmeliyim. Bu versiyonda Planck sabiti yoktur, ama dalgalar vardır. Bir elektrik mühendisi, bir telin perdesi uzun bir zamana yayılmadıkça, bu telden doğru frekanslı bir perdenin geçmesinin imkânsız olduğunu bilir. Darbeyi kısaltmak, ister istemez, bir frekans belirsizliğine yani bir dizi frekansa neden olur. Örneğin siz telefonda konuşurken telden geçen duyulabilir sesler, yıldırım hızıyla gönderilemez. Eğer her bir sesin süresi epey kısaltılsaydı, frekanslar birbirine karışırdı ve santral hangi tuşlara bastığınızı bilemezdi. (Otomatik arama yapmak "tuşlama"yı saniyede on ya da civarında darbeye indirebilir, ancak saniyede bir darbe beklemek kendimizi kandırmak anlamına gelirdi.) Mızıka çalan bir kişi, çok hareketli bir hızda, çok düşük frekanslı notaları çalmaya çalışmanın mantıklı bir şey olmadığım bilir. Eğer her bir perdenin süresi aşın derecede azaltılırsa, sesler frekansların birbirine karışması nedeniyle boğuk çıkar.

Heisenberg'in belirsizlik ilkesiyle günlük hayatta dalgaların sergilediği belirsizliğin çok önemli olan farkı, de Broglie'un dalga boyuyla momentum arasındaki bağlantısıdır. Bu durum, klasik dünyada karşılığı olmayan Planck sabitini ortaya çıkaran saf kuvantum bağlantısıdır.

Dalgalar Gerekli mi?

Havada uçuşan o şey ne? Bir dalga! Bir parçacık! Her ikisi de! Bu, dalga-parçacık ikiliğinden bahsederken kullanılan tipik bir konuşma şekli. Bir şeyin *hem dalga hem de parçacık* olduğunu söylemek kesinlikle tuhaf, kabul edilmesi ve benimsenmesi zor bir fikirdir. Ancak bazı koşullar altında parçacık görünüşünün, farklı bazı koşullar altında da dalga görüntüsünü varolduğunu aklınızda tutarsanız, dalga - parçacık ikiliği *daha az şaşırtıcı* olur. Ofiste Casper Mikmetoast (Casper Korkak), direksiyonda Mad Max (Çılgın Max) olan bir adam düşünün. Bu adamın, aynı anda hem Casper hem de Max olduğunu söyleyemezsiniz, çünkü duruma göre biri ya da diğeri olur. Bir kuvantum varlığı için de durum aynıdır. Yaratıldığında ve yok edildiğinde (yayılıp yutulduğunda) bir parçacıktır. Bu iki olay arasındaki süreçler ise bir dalgadır. Ancak, kuvantumun tuhaflık etkisini yok etmek için bu görüşü kabul etmek yeterli değildir. Yine de şu soruyu sormak isteyebilirsiniz. Eğer bir dalga, parçacığın yaratıldığı noktadan dışarıya doğru yayılmaya başlarsa, parçacığın yok olma sinyalini vermek için nerede, ne zaman "çökeceğini" nasıl bilecek? Bu sorunun tek yanıtı bu dalganın bir olasılık dalgası olduğudur. Bu durum, parçacığın yaşamına gelecekte bir zamanda, herhangi bir başka yerde son vereceğiyle benzerlik gösterir.

1940 ya da 1941 yılında Princeton Üniversitesi'nde ihtisas yapan ve her zaman neşeli olan Richard Feynman, proje danışmanı John Wheeler'a gider ve şöyle der, "Dalgalarla uğ-

raşmaya ne gerek var? Zaten hepsi parçacık." Feynman, bir kuvantum parçacığının doğum anından ölüm anına kadar olan yaşam öyküsüne yeni bir vizyon katmıştı. Doğru kuvantum sonuçlarını, dalgayı sonsuz sayıda parçacık yolunun yerine koyarak elde edebileceğini keşfetti. Parçacık, yaratıldığı noktadan belirli bir uzaklıktaki noktaya giden mümkün olan tüm yollan aynı anda kullanır. Her yolun belirli bir "genliği" vardır ve bu genliklerin toplamı, parçacığın o noktada gerçekten görülebileceği olasılığını tahmin etmeyi mümkün hale getirir. (Bir parçacığm bir karışma örneğindeki karanlık bir şerit gibi belirli bir noktaya gidecek olması, örneğin kimi artı kimi eksi olan genlikler sıfırla toplanınca sıfır olasılık sonucunu vermesiyle olabilir.) Wheeler bu fikirden çok etkilendi, ona *yaşam öykülerinin toplamı* adını verdi ve bunu gidip Einstein'a anlatmak için derhal bir görüşme fırsatı yarattı. Daha sonra bu görüşmeyi bir kitapta anlatan Wheeler şöyle yazmıştı*:

> Fikir beni heyecanlandırmıştı. Einstein'ın evine gittim, üst kattaki çalışma odasında onunla oturdum ve yaklaşık yirmi dakika ona Feynman'ın fikrini anlattım. Sonunda, "Profesör Einstein" dedim, "kuvantum mekaniğine bu yeni bakış biçimi, size bu teoriyi kabul etmek için tamamıyla mantıklı bir yolmuş gibi gelmiyor mu?"
> Einstein daha önce söylemiş olduğu sözü geri almadı. "Ben hâlâ Tanrının zar attığına inanmıyorum," dedi.
> Einstein, bir zamanlar, kendisinin katır gibi inatçı olduğunu söylemişti.

Feynman'ın etkileyici düşünce tarzı dalgaları geri plana atmadı. O, sadece kuvantum fenomenlerine alternatif bir açıdan baktı. Ancak bu, çok önemli bir alternatifti çünkü Feynman kuvantum mekaniğinin merkezi bir ilkesi olan çoklu

*John Wheeler, *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics* (New York: Norton, 1998), sayfa 168.

genlik çakışmasmm üzerinde durdu. Ayrıca, bu son derece küçük dalgalar yayılırken "aslında" neler olduğunu açığa çıkardı. Pek çok uygulamada dalga, kullanımı en basit olan kavramdır. Yaşam öykülerinin toplamı yaklaşımında bile dalga boyu, kıvrılma ve karışma gibi kavramlara rastlanır*. Bu nedenle bu bölümün başlığındaki "Dalgalar gerekli mi?" sorusunun yanıtı: "Hayır, hiç değiF'dir. Ancak dalga davranışlarını yakından takip ederek dalgalardan gerçeği tanımlamada yararlanılabilir.

*Büyüleyici kitabı *QED'de* (Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1985), Feynman yaşam öykülerinin toplamı yaklaşımıyla fotonlann ve elektronların davranışlarım açıklamıştır.

10. bölüm

Sınırları Genişletmek

Kuvantum fiziğinin geleceğiyle ilgili üç soru sorulabilir. Birincisi, bilim insanları ve mühendisler kuvantum dünyasını çalışır duruma getirecekler mi? Yani, atomun içindeki dünyanın kanunları ve fenomenleri toplum için elverişli teknolojik biçimde kullanılacak mı? Yanıtlardan biri zaten bunların lazerler, mikro devreler, tünel kazmayı tarayan mikroskoplar (STM) ve nükleer reaktörler (nükleer bombaları saymayalım) şeklinde kullanıldığıdır. Diğer cevabın ise, kuvantum hesaplamaları gibi yeni ve şaşırtıcı uygulamaların olması muhtemel. Açıklamaya değer kuramsal ve doğal olmayan bir örnek ise parçacık-karşıt parçacık yok oluşunu uzay seyahatini motive edecek bir güç olarak kullanmaktır (ya da en gelişmiş bombalar için patlayıcı bir güç olarak).

İkinci soru: Atomun içinin içindeki dünya diye adlandırabileceğimiz - yani şimdiye kadar incelenenden çok daha küçük yerlerden yeni ve verimli bilgiler ortaya çıkacak mı? Böyle bir şeyin olacağına ve son derece küçük alanı olan kuvantum teorisi ile yerçekiminin birleşeceğine dair belirtiler var.

Ve işte üçüncü soru: kuvantum teorisinin mantığı keşfedilecek mi? Yetmiş beş yıldır kuvantum teorisi, hiçbir deneysel sınavda başarısızlığa uğramadığı halde fizikçileri huzursuz etmiştir. Niels Bohr yıllar boyu her sabah kalkıp kuvantum terimiyle savaşmış ve Albert Einstein'la birlikte onu tartışmaktan hiç yorulmamıştır. 2001 yılında 89 yaşında kalp krizi geçirdikten sonra John Wheeler, "Fazla vaktim kalmadı. Kalan zamanımı kuvantumu düşünerek geçirmeliyim," demişti.

Ve sayıları gün geçtikçe artan sayıdaki genç fizikçiler şu anda bunu yapmakla meşgul.

Niçin fizikçiler kusursuz bir şekilde işleyen bir teoriden bu kadar rahatsız oluyorlar? Rahatsızlıklarının nedeni onun sadece sezgi ve sağduyuyu ihlal etmesi değil. Görelilik de aynı şeyi yapıyor ama hiç kimseyi rahatsız etmiyor. Rahatsızlar; çünkü kuvantum teorisi izi olmayan, gözlemlenemeyen niceliklerle (dalga fonksiyonları) ilgileniyor, olasılığı temelinde barındırıyor ve kuvantum dünyasıyla insanın algı dünyası arasındaki sınırı oldukça belirsiz bırakıyor. Kuvantum teorisinin mantığı, eğer varsa, altta ve üstte olabilir. Bu mantık, uzay ve zamanın en küçük aralıklarındaki atomun içinin içindeki alanda ya da evreni yöneten bazı kozmik ilkelerde bulunabilir.

Umarım bu üç sorunun yanıtının bulunduğunu genç okuyucularım görür. Eğer bulunursa, yanıtlar teknolojinin ve aklın sınırlarını genişletecektir.

Kuvantum Fiziği ve İçinde Yaşadığımız Dünya

İlk bakışta kuvantum dünyası ile klasik dünya birbirlerinden oldukça uzak görünür. Günlük hayatta fotonları görmezsiniz; bir atomun bir kuvantum seviyesinden diğerine sıçradığını, ya da bir pionun aniden yok olarak bir muonla bir nötrinonun ortaya çıkışını asla izlemezsiniz; bir şeyi ne kadar doğru ölçtüğünüzün, prensipte, sınırları olduğunun farkında değilsiniz; ve bir beysbol topunun dalga doğası nedeniyle iki yarıktan derhal geçtiğini ya da bir karışma örneği sergilediğini asla görmediniz. Aslında, kuvantum fenomenlerinin günlük hayattaki deneyimlerden uzak olması, kuvantum teorisinin, insanlık tarihinin niçin yeni bir bilimsel alanı olduğunu ve kuvantum fenomenlerinin çok tuhaf gözükmesinde niçin rol oynadığını açıklar. Kuvantum fenomenlerinin doğrudan farkında olan küçük yaratıkların bulunduğu uzak bir galaksi-

deki bir gezegende, kuvantum teorisinin gezegenin bilim tarihinin başlangıç döneminde keşfedilmiş olması gerekir. Ama bu yaratıklar kuvantum fenomenlerini son derece normal ve akla uygun mu bulurlar, yoksa Bohr gibi sonsuza kadar anlamım mı düşünürler?

Daha detaylı düşünürseniz, günlük hayatımızdaki hemen hemen her şeyin kuvantum mekaniğinin istediği şekilde olduğunu fark edersiniz. Maddenin hacmi vardır çünkü atomların büyüklüğü vardır ve atomların büyüklüğü, onların kuvantum tabiatı nedeniyle vardır. Maddelerin renkleri, yapıları, sertlikleri ve şeffaflıkları; oda sıcaklığındaki maddelerin doğası (ister katı, sıvı ya da gaz olsun); bir elementin başka bir elementle kimyasal reaksiyona girmekteki istekliliği ya da isteksizliği -tüm bunlar sonuçta atomun içindeki elektronların davranışını düzenleyen reddetme ilkesine ve böylece elektronların biryarım dönüşlü fermionlar olduğu gerçeğine dayanır. Bir dükkanın vitrinindeki neon tabeladan yayılan kırmızı ışık ile sodyum gazlı bir sokak lambasından yayılan san ışık, belirli atomların içindeki belirli kuvantum sıçramaları nedeniyle kendi renklerini gösterir. Dünyanın merkezi sıcaktır çünkü ağır elementler radyoaktif bozunuma girerler, zayıf etkileşimler "delinemeyen" bariyerlerin delinmesi ve kuvantum olasılığının kanunları rehberliğinde, milyarlarca yıllık enerji açığa çıkarırlar. Hidrojen atomunun çekirdekleri kademeli olarak helyum çekirdeklerine yapışırken, güçlü, zayıf ve elektromanyetik etkileşimleri enerji açığa çıkaran bir kombinasyon nedeniyle güneş parlar. Liste uzayıp gider. Sadece uydunun yerçekimsel dünyasına ve gezegensel devinime geldiğimizde, kuvantum mekaniğinin kanunları geri planda kalır.

Bazen kuvantum fenomenleri, kendilerini büyük ölçekli dünyada daha "saf gösterir. Bose-Einstein yoğunlaşması buna bir örnektir. Düşük sıcaklıklarda belirli maddeler tarafından gösterilen süper iletkenlik özelliği ve yine düşük sıcaklıkta görülen sıvı helyum süper akışkanlık özelliği de buna verilebilecek diğer örneklerdir.

Sürekli devinimin imkânsız olduğunu şüphesiz duymuşsunuzdur. Bu durum termodinamik kanunlarıyla uyuşmaz. Patent uzmanları, iddialan derinlemesine incelemeden sürekli devinim mekaniklerine patent vermeyi, bu icatların fizik kanunlarını ihlal ettiği temeline dayanarak düzenli olarak reddeder. Ancak bu kanunlar, etkileşimsel tarafları olan karmaşık sistemlerin kanunlarıdır. Kuvantum dünyasında sürekli devinim (ne güzel) olağandır*. Atomun içindeki bir elektron asla yorulmaz. Sürtünme onu asla yavaşlatmaz. O hareketine devam eder. Süper iletkenlik ve süper akışkanlık durumları gibi çok özel durumlardaki, atomsal ölçülerde yaygın olan bu sürtünmesiz sürekli devinim, kendini insan ölçülerindeki dünyada da açıkça gösterir. Eğer kuvantum bilgisayarları gerçekleştirilirse, onlar da atomun içindeki devinimin sürtünmesizlik özelliğinden yararlanmalıdır.

Karşıt Cismi Kullanmak?

Bir güç kaynağı olarak karşıt cisim prensipte mümkündür. Bu nedenle ve ondan bahsetmek eğlenceli olduğu için, ona burada yer vereceğim. Karşıt cisim kesinlikle "bir sınırı genişletiyor". Eğer günün birinde karşıt cisim yapılabilirse, bu bizim uygarlığımıza benzemeyen gelişmiş bir uygarlığın bulunduğu bir yerde olur. Biz insanlar için ise karşıt cisim bir hayaldir.

Hiçbir şey -ne karşıt cisim ne de başka bir şey- gerçekte bir enerji *kaynağı* değildir, çünkü enerji sadece dönüştürülebilir, yaratılamaz veya yok edilemez. Enerjiyi "tüketirken", aslında onu daha yararlı bir şekilden daha az yararlı bir şekle dönüştürüyorsunuzdur (ve genellikle size sağlanan bu ayncalığını bedelini ödüyorsunuzdur). Yine de enerji kaynaklann-

* Tüm uygulamalarda, küçük sürtünme kuvvetlerinin sonunda Ay'ın ve gezegenlerin yörünge ve dönüşlerini değiştirmesine rağmen, çok büyük vücutların sürekli devinimi de doğaldır.

dan bahsetmek sıradan bir şey (ve kullanışlı). Günlük kullanımla, bir enerji kaynağı depolanmış bir enerjidir (benzin veya pilde -veya kuramsal olarak karşıt cisimde olduğu gibi) ya da geçiş yapan bir enerjidir (güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi). Fizikteki kavramlar arasında, enerji en çok çeşiti olan kavramdır, bu nedenle kullanımda enerji çok çeşitli şekillere dönüşür.

Bir yelkenli teknede olduğu gibi, kullanılan enerji çok kısa bir süre depolanmış olabilir ya da depolanması için hiç vakit ayrılmamış olabilir. Şöminede yanan odun gibi, düzinelerce yıl depolanmış olabilir. Ya da bir güç santralinde yanan kömür gibi, milyonlarca yıl depolanmış olabilir. Veya bir nükleer reaktörü (kökeni çok uzun süre önceki süpernova patlamalarına dayanan) çalıştıran uranyumda olduğu gibi, milyarlarca yıl depolanmış olabilir. Depolama süresinin üst sınırı, Büyük Patlama'nın hemen ardından bugüne kadar yaklaşık on dört milyar yıldır Güneş'e güç veren hidrojene aittir.

Kimyasal enerjisi (nükleer enerjisinin yerine) kullanılan hidrojen, genelde neredeyse tükenmez bir enerji kaynağı olarak tanımlanır, çünkü hidrojen deniz suyunun temel bileşiğidir. Keşke! Aslında, kaçımlamaz yetersizlikler nedeniyle, hidrojenin sudan (ya da hidrokarbonlardan) çıkarılmasında gerekli olan enerji, elektrik akımı veren bir cihazdaki hidrojenin yakılması veya kullanılmasıyla ortaya çıkan enerjiden daha fazladır.

Hidrojen, enerjiyi depolamak ve aktarmakta kullanılan bir yöntemdir, kullanışlıdır çünkü bir yerden diğerine borularla aktarılması kolaydır ve çünkü her ne kirliliğe yol açıyorsa da, o kirlilik kullanıldığı değil üretildiği yerde kalır (ve burada kontrol edilebilir).

Bilimkurgu dünyasındaki karşıt cisim, gerçek dünyadaki hidrojen gibi görülür. Karşıt cisim, enerjinin arttırılması ile yaygın olarak bulunan maddeden yapılır; sonra depolanır, aktarılır ve enerjinin gerekli olduğu yerde yararlı bir enerjiye dönüştürülür. Aslında, karşıt cisimden daha güçlü bir enerji

"kaynağı" yoktur, bu nedenle "Atılgan Uzay GemisF'ni çalıştırmak doğal bir tercihtir. Bir otomobilin motorunda benzin yandığında, benzinin kütlesinin milyarda birinden daha azı enerjiye dönüşür. Uranyum çekirdekleri bir reaktörü harekete geçirmek üzere kaynaştığında, uranyum kütlesinin yaklaşık binde biri enerjiye dönüşür. Karşıt cisim ile cisim, "Atılgan"ı çalıştırmak için yok olurken, karşıt cismin yüzde 100'ü enerjiye dönüşür (eğer yok olan cismin katkısını da hesaba katarsanız, o zaman yüzde 200 olur). Karşıt bezelye kabuğunun içinden çıkan bir karşıt bezelye, bin arabalık bir filoyu bir yıl boyunca çalıştıracak olan yarım milyon galon (1.890.000 litre) benzin kadar enerjiyi açığa çıkarır. Tek bir enerji patlamasıyla yok edilmesi planlanan bir karşıt bezelye, 1945'de Hiroşima'yı hedef alan bir bomba kadar yıkıcı olurdu.

Peki bütün bunlar nasıl oluyor? Eğer insanlar kafalarını yorarlarsa, teoride mümkün olan her şeyin eninde sonunda pratikte gerçekleşeceği yönünde bir inanç vardır. Böyle bir durumda, ben bunun asla olmayacağını söylüyorum. Karşıt cismi depolamak son derece zor bir iş. Karşıt cisim, 1932 yılında pozitronun gözlemlenmesiyle keşfedildi. Karşıt protonlar ilk olarak 1955'de, karşıt nötronlar ise 1956'da yaratıldı. O zamandan beri, yüksek enerjili hızlandırıcı laboratuvarlarında düzenli olarak karşıt parçacıklar yaratıldı ve incelendi, ama bunlar daima son derece az miktarlarda ve daima karşıt atom yaratamayacakları kadar yüksek enerjilerde yaratıldılar. İsviçre'deki CERN laboratuvarmda çalışan araştırmacılar, 2002 yılında milyonlarca karşıt proton ile milyonlarca karşıt elektron (pozitron) yaratıp depolayarak ve bunlardan on binlerce karşıt hidrojen atomu oluşturup yaklaşık yüz tanesinin yok oluşunu gözlemleyerek çok önemli bir iş başarmış oldular. Tahmin edeceğiniz gibi, bir karşıt hidrojen atomu, etrafı pozitif bir karşıt elektronla çevrilmiş negatif bir karşıt proton içerir.

Doğadaki cisim-karşıt cisim simetrilerini incelemek isterseniz, bunun çok çekici bir konu olduğunu görürsünüz, ama

bu konu enerji kaynağı konusunda kullanışlı değildir. CERN deneyinde yüklü karşıt parçacıklar hiçbir maddeye değmemeleri için manyetik alanlarda (geçici olarak) depolandı. Nötr karşıt atomlar şekillenince, manyetik kapandan kaçtı ve aletin duvarları içinde yok oldu.

On bin karşıt hidrojen atomu çokmuş gibi düşünülebilir. Ancak kullanılabilir enerji açısından bakıldığında çok fazla değildir. On bin karşıt hidrojen atomuyla aynı potansiyel enerjiye sahip miktardaki benzini mikroskop kullanmadan görmek mümkün olmazdı. Yok olmak üzere olan bir milyar karşıt hidrojen atomu bile, arabanızı bir incin (2,54 cm) beş binde biri kadar ileri götürürken kullandığınız enerji kadar enerji sağlar. Kullanışlı miktarda enerji için, bir milyar milyardan (1018) daha fazla karşıt hidrojen atomuna ihtiyacınız vardır. *Uzay Yolu* mürettebatı, yakıtlarının nasıl depolandığını asla açıklamaz.

Teoride doğada olması gereken bazı olaylar gerçekleşmez. Şu an içinde bulunduğunuz odanın havasındaki moleküller, örneğin, odanın başka bir bölümünde kümelenerek, sizi havasız bırakabilir. (Eğer şu an bu kitabı açık havada okuyorsanız, etrafınızdaki hava molekülleri bir anda kaçarak, nefes alışınıza aynı kötü etkiyi yapabilir.) Bu tip şeyler olmaz. Bunların olma olasılığı rahatlıkla hesaplanabilir. Bu nedenle bir molekül kaçışının, evrenin yaşam süresi boyunca bir kere bile gerçekleşmesi mümkün değildir. Biz insanların, belirli bir miktar karşıt cismi depolayıp sonra kullanmanın bir yolunu bulabilme şansımız, bir istatistiksel değişimin bizi şaşırtması kadar uzak bir ihtimal değildir, ama bana yine de mümkün değilmiş gibi geliyor.

Çoğu parçacık gibi, çoğu karşıt parçacık da sabit değildir. Yani, yok olma eğilimine aldırmadan, kendi istekleriyle diğer parçacıklara dönüşürler. Bu durum karşıt nötron, karşıt lambda ve karşıt muonlar vb. için geçerlidir. Fermionlar içinde sadece karşıt protonlar, karşıt elektronlar ve karşıt nötrinolar sa-

bittir. Karşıt nötrinolar yakalanamadığı için, sadece karşıt protonlar ve karşıt elektronlar potansiyel karşıt cisim enerji kaynağı olurlar. Hayalperest biriyseniz, karşıt nötronların, karşıt çekirdekler oluşturmak üzere karşıt protonlarla birleşerek dengelenebileceğini söyleyebilirsiniz. Bu bizi karşıt periyodik tabloya götürür.

Acaba evrenin bir yerlerinde karşıt cisim ya da belki de karşıt galaksiler var mı? Bu, tamamıyla reddedilemez ama pek mümkün değilmiş gibi gözüküyor. Eğer karşıt cisim bölgeleri olsaydı, evrenin cisim ve karşıt cisim bölgeleri arasında sınırlar olurdu ve bu sınır bölgelerinde yanlış yola sapan elektron ve karşıt elektronlar buluşup, yok olur, bunun sonucunda da her biri yaklaşık 0,5 MeV'luk enerjisi olan gamma ışınlı foton çiftleri oluşurdu. Böyle bir ışın yayılımına galaksiler arası uzayda rastlanmamıştır. (Proton ile karşıt protonun yok oluşu daha fazla enerjili radyasyon üretirdi, ama fark edilmesi daha zor olurdu, çünkü bu radyasyon orta pionlarla birlikte bir dizi enerjiyle ortaya çıkardı.)

Ancak "başlangıç evresi"nde bir karşıt cisim (Büyük Patlama'dan arta kalan) hiç olmasa bile, şimdiki evrende büyük enerji süreçleri tarafından sürekli üretilen bir miktarda mevcuttur. Dünya'ya çarpan kozmik radyasyonda bir miktar karşıt proton görülür ve ayrıca kendi galaksimizin merkezinden gelen yok olan pozitronların radyasyonu da görülür.

Son dönemlerde kabul edilen bir teoriye göre, Büyük Patlama'nın ardından saniyenin ilk milyonda birinde ya da civarda*, evren kuarklar, leptonlar ve bozonlardan (fotonları da içeriyor) oluşan koyu sıcak bir çorbaydı ("girdap" daha iyi bir sözcük olabilir). Evren aşağı yukarı saniyenin milyonda biri yaşına geldiğinde ve sıcaklık yaklaşık on trilyon dereceye düştüğünde, kuarklar, pek eşit sayıda olmayan proton ve karşıt protonlar (ve de nötron ve karşıt nötronlar) oluşturmak için üçlü gruplar halinde birleştiler. Bu baryonların ve karşıt *ba'-*

*0 sırada evren son derece büyük ve son derece hızlı bir şekilde büyüdü (buna şişkinlik deniyor), ama bu hikâye, kitabımızın konusunun dışında kalıyor.

yonlann sayısı küçük bir cisim-karşıt cisim asimetrisi nedeniyle eşit değildi: CP korunmayış yaklaşımı James Cronin ve Val Fitch tarafından 1964'de keşfedildi (Bkz. 8. Bölüm). Sonunda, dönen her bir milyar karşıt protona karşılık, bir milyar bir tane proton oluştu, aynı asimetri nötron ve karşıt nötronlarda da vardı. Genişleyen evren bir milyar derece olacak kadar soğuduğunda (saniyenin bir sonraki yüzde biri civarında), karşıt baryonların hepsi ve baryonun büyük bir kısmı yok edildi. (Daha az kütleli pozitronların yok edilmesi daha sonra, yani evren yaklaşık on beş saniye yaşındayken gerçekleşti.)*

Bugünkü evrendeki galaksiler, yıldızlar, gezegenler, siz ve ben geride kalan milyarda birden oluşuyoruz. Evrenin bugün her bir proton için bir milyar foton içermesi ve son derece önemsiz miktarda karşıt proton içeriyor gözükmesi gerçeği bu teoriyi destekler. Val Fitch'in söylediği gibi bizim burada bulunmamızın nedeni cisim ile karşıt cismin az miktardaki asimetrisidir.

Çakışma ve Dolanıldık

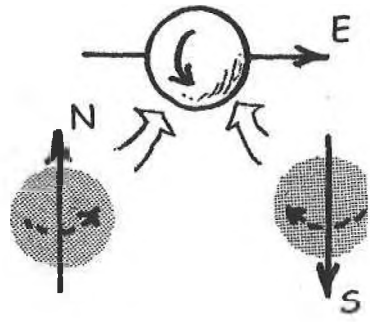
9. Bölüm'de farklı dalga boyundaki dalgaların çakışması ve bunun dalgaları belirli bir yerde sınırlamasından (ya da kısmen sınırlamasından) bahsetmiştim. Şimdi, izin verirseniz, de Broglie denklemini *(X = h/p)* tekrar sahneye çıkaracağım. Bu denklem dalga boyunun momentuma bağlı olduğunu söyler: belirli her dalga boyu için, belirli bir momentum vardır. Yani çakışan dalga boyları çakışan (ya da karışan) momentumlara eşittir. Bu nedenle bir elektronun -diyelim ki hidrojen atomu içindeki bir elektronun- tek bir devinim seviyesi, her bir farklı momentuma sahip pek çok farklı seviyenin karışımı olarak da görülür. Bir enerji, *çok sayıda* momentum.

* Eğer evrenin toplam yükü sıfırsa (doğruluğu ortada, ama nedenini kimse bilmiyor), hayatta kalan elektronların sayısı tam olarak hayatta kalan protonlarla eşittir.

Ust paragrafta anlattığım şey kuvantum mekaniğinin imzası olarak adlandırılabilir -bu durum, her şeyin ötesinde, kuvantum teorisini klasik teoriden ayırır. Klasik teoride, örneğin, bir çekirdeğin etrafında dönen elektronun her an belirli bir enerjisi ve belirli bir momentumu vardır. Momentum bir andan diğerine değişir, ancak momentumun aynı anda iki ya da daha fazla değere sahip olması fikri klasik teoride kesinlikle mümkün değildir. Klasik fizikçiler bu fikri tamamıyla saçma bulurlar. Ancak çakışma kuvantum teorisinin bir kuralıdır. Bir parçacığın ya da bir çekirdeğin veya bir atomun *her* devinim seviyesi, diğer seviyeleri, bazen de sonsuz sayıdaki diğer seviyelerin çakışması (ya da karışması) olarak düşünülebilir. Bu durum, kuvantum dünyasının çok tuhaf görünmesinin nedeninin büyük bir bölümünü oluşturur.

Eğer şöyle sorarsanız, "Bir hidrojen atomunun içinde belirli bir elektronun momentumu kaçtır?" kuvantum fizikçisi şöyle bir yanıt verir, "Çok sayıda farklı momentumun karışımı kadardır." Diyelim ki ısrarlısınız ve soruyorsunuz, "Ama elektronun momentumunu ölçüp bulamaz mısınız?" O zaman kuvantum fizikçisi şöyle cevap vermeli, "Evet, bulabilirim - ve eğer bulursam, bu belirli bir momentum olur. Ölçüm sonucunda, karışmış pek çok momentum arasından sadece bir tanesi seçilir." İşte burada çakışma ve olasılık el ele verir. Eğer ölçüm pek çok benzer atomla defalarca tekrarlanırsa, pek çok farklı sonuca ulaşılacaktır. Belirli herhangi bir sonuç olasılığına, farklı momentumlann karışma şekli karar verir. Momentumlar, her biri bir momentuma ait olacak şekilde farklı "dalga genlikleri" ile karışırlar; ve her bir dalga genliğinin karesi bu belirli momentumun ölçüleceği olasılığını gösterir*. Şimdi çok önemli bir noktaya geliyoruz. Çakışma bir elektronun şu veya bu momentuma sahip olabileceği anlamına *gelmez* ve bir elektronun bu momentumlardan hangisine sahip olduğunu bilmeyiz. Yani elektron gerçekten aynı anda

* Daha önce de belirtildiği gibi, olasılık tam olarak, karmaşık bir sayı olan bir dalga genliğinin mutlak karesidir.

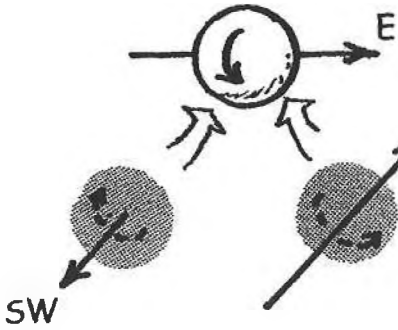


Şekil 48. Doğu yönelimli dönüş, kuzey ve güney yönelimli dönüşlerin eşit karışımıdır.

tüm momentumlara sahiptir. Eğer bunu gözünüzde canlandıramıyorsanız, endişelenmeyin. Fizikçiler de canlandıramıyor. Sadece onunla yaşamayı öğrendiler.

İşte çakışmaya bir örnek daha, bu sefer sadece iki seviye karışmış. Şekil 48'de görüldüğü gibi, bir elektronun dönüş yönü doğuyu gösteriyor. Normalde bir elektronun sadece iki yöne doğru, yani yukarıya ve aşağıya doğru döndüğünü söyleriz. Ancak bu dönüş farkı herhangi iki yönde de olabilir. Bu nedenle eğer bu elektron dönmek için doğuya yönelirse batıya *yönelmez*. Dönüş yönü bellidir. Doğu yönelimli dönüşünde, elektronun belirli bir *seviyede* olduğunu söyleriz. Ancak bu seviye, diğer bütün kuvantum seviyeleri gibi, diğer seviyelerin çakışması şeklide ifade edilebilir. Bu seviye, örneğin, Şekil 48'de görüldüğü gibi eşit dalga genliği olan, kuzeye ve güneye yönelmiş dönüşün çakışması şeklinde düşünülebilir. Eğer bir fizikçi, dönüşün kuzeye doğru olup olmayacağını görmek için ölçüm cihazı kurarsa, yüzde 50 olasılıkla kuzey yönelimli bir dönüşe rastlayacaktır. Yani, *kesinlikle* doğuya yöneleceği bilinen bir dönüş, ölçümün yarısında kuzeye (ve yarısında güneye) yönelir.

Sayısal olarak, hem kuzeye dönüş hem de güneye dönüşün dalga genliği 0,707'dir, bunların karesi ise 0,50'dir. Aynı zamanda, doğuya dönüşün dalga genliği 1,00, batıya dönüşün dalga genliği ise sıfırdır.



Şekil 49. Doğu yönelimli dönüş, kuzeydoğu ve güneybatı yönelimli dönüşlerin eşit olmayan miktardaki karışımıdır.

Şu anda başınızın hangi yöne doğru döndüğünü merak ediyor olabilirsiniz. Daha kötüsü de olabilirdi. Eğer başınız bir elektron olsaydı, seçtiğiniz herhangi bir eksen üzerinde aynı anda iki farklı yönde dönerdi. Doğu yönelimli dönüşü olan bir elektron, örneğin, Şekil 49'da görüldüğü gibi kuzeydoğu ve güneybatı yönelimli dönüşlerin çakışmış şeklidir. Dönüşün yönünün kuzeydoğu olup olmadığını bulmak için deney yapan bir fizikçi, bu dönüşün yüzde 85 bu yöne, yüzde 15 ise farklı yöne doğru olduğunu bulacaktır (deneyin aynı şekilde pek çok kez tekrarlandığı varasayılacak).

Özetlemek gerekirse: bir parçacığın, bir çekirdeğin veya bir atomun hatta *herhangi* bir kuvantum sisteminin basit herhangi bir seviyesi, aynı zamanda iki ya da daha fazla seviyenin çakışması (ya da karışması) demektir. Bunlar çok tuhaf bir şekilde karışırlar: bir pastanın içindeki malzemeler gibi bireysel özelliklerini kaybedecek şekilde değil, ya da trafikteki şerit ayrımları gibi değil, kuvantum karışımı (teknik ismi *superposition* -çakışma) parçalan ayırmadan birbirleriyle birleştirir, bu durumu gözde canlandırmanın en iyi şekli bir gölete atılan iki çakıl taşının üst üste binen dalgaları gibi bir karışım düşünmektir. Üst üste biniş, sistem rahatsız edilmediği ve ölçülmediği müddetçe korunur. Bu sanki saklambaç oyunu gibidir.

Sistemin gözlemlendiği anda, ya da bir "klasik" nesneyle bile etkileşimdeyken (gözlemcinin insan olması gerekli değil), karışımın bir elemanı sihirli bir şeklide ortaya çıkarken, diğer eleman eşit düzeyde sihirli bir şeklide ortadan kaybolur. Hangi elemanın kendini gösterdiğine olasılık karar verir -kuvantum dünyasının bir parçası olan *temel olasılık.*

Sistemin iki parçası uzayda çok büyük bir oranda birbirlerinden ayrıldığında, çalışma çok ilginç bir hal alır. Bu bölümün ilerleyen sayfalarında böyle bir örneği açıklayacağım. Bu örnek, tamamıyla farklı iki yol izleyen iki seviye çakışırken tek bir fotonun ortaya çıktığı *ertelenen tercih* deneyidir. Foton bölünür.

İki ya da daha fazla farklı sistemin çakıştığı bir durumla da karşılaşılabilinir. Böyle bir durum, Bose-Einstein yoğunlaşmasında, farklı sistemlerin (atomların) uzayda tamamıyla çakışmalarında görülür. Ancak başka bir olasılık ise, bu iki "sistem"in (örneğin iki parçacığın) bir yerde, birlikte çakışmış durumda yaratılıp, sonra bunların uçup gitmesidir. Örneğin, bir fizikçi bir elektronla bir pozitronu yok ederek toplam dönüşü sıfır olan bir çift foton yaratabilir. Her bir fotonun dönüşü bir birim olduğu için, bu iki foton birbirlerinden ne kadar uzaklaşırlarsa uzaklaşsmlar, yine de ters yönlerde dönüş yapmalıdır. Çakışma durumlarından birinde, birinci fotonun dönüş yönü yukarı, ikinci fotonun dönüş yönü aşağı olur. Diğer durumda ise tam tersi olur: yani birinci fotonun dönüş yönü aşağı, ikinci fotonun dönüş yönü yukarı olur. Elektron ile proton yok olurken yaratılan çakışma durumu şöyle ifade edilebilir:
(1 yukarı, 2 aşağı) + (1 aşağı, 2 yukarı).

İki olasılık karışır ve fotonlardan birinin veya diğerinin dönüşü ölçülene kadar ya da bu fotonlardan biri herhangi bir şeyle etkileşim kurana kadar böyle kalır. Bu iki fotonun yaratıldığı yerden beş metre (ya da beş ışık yılı) uzakta çalışan bir fizikçi, birinci fotonun dönüşünü ölçerek onun, yukarı yöne-

limli dönüşü olduğunu bulur. Bu durumda ikinci fotonun dönüş yönünün aşağı doğru olduğunu hemen bilir. Ancak ölçüm, birinci fotonun dönüş yönünü aşağı ikinci fotonun dönüş yönünü ise yukarı olarak gösterebilir. Bu durum Einstein'ı kuvantum mekaniğiyle ilgili çok endişelendiren "uzaktaki hayalet etkisi"dir. Her bir foton kendi yolunda ilerlerken, yukarı dönüş ve aşağı dönüş gibi farklı çakışma olasılıkları vardır. Ölçüm işi, bu olasılıklardan birinin fark edilmesine ve derhal diğer fotonun dönüş yönünü -o ana kadar yukarı ve aşağı dönüş şeklinde karışık olan- açıklamaya yarar. Burada anlattığım deneye çok benzeyen bir olay, parçacık yerine atomların yok olmasıyla yayılan bir foton ve ışık yılı yerine metreyle birbirlerinden ayrılan mesafelerde, gerçekten olmuştu. Ama eğer fotonlar engellenmeden ışık yılı mesafesinde uçsaydı ve eğer biz, uzaylı yaratıklarla bunların ölçülmesi konusunda bir anlaşma yapsaydık, şüphesiz sonuçlar kuvantum çakışmasına dayanan tahminleri doğrular nitelikte olacaktı.

Çakışma durumuna, uzayda ayrılan iki ya da daha fazla sistem dahil olduğunda, buna genellikle *dolanıldık* diyoruz. Bu güzel bir sözcük. Birbirlerinden ayrı uçan iki fotonun durumunun gerçekten dolanık olduğunu görürsünüz. Bu durum biraz, birbirlerinden ayrı yaşayan aile fertlerinin yaşamlarının dolanıklığı gibidir. Ancak temeline bakıldığında, çakışma ve dolanma kesinlikle aynı şeydir. Bunun nedeni, iki tane çakışmış sistemin tek bir sistem oluşturmasıdır. Tek bir atomun iki çakışma durumu ile atomların iki çakışma durumu arasında prensipte hiç fark yoktur. Yukarıdaki paragrafta iki fotonun birbirlerinden ayrı uçması örneği, gerçekten tek bir sistemin parçalarını gösterir. Tek bir dalga fonksiyonu onların birleşik devinimini tanımlar.

Bir elektronun dönüş yönünü iki tane olabilirliği sisteme *"kübit"* denmeye başlanmıştır. Bu sistem, hesaplamanın temel birimi olan çift değişkenli birimin benzeridir. Ancak arada önemli bir fark var. Klasik birimde sistem, açık veya ka-

palı, yukarı veya aşağı veya sıfır ya da birdir. Aynı anda ikisi birden olmaz. Kübit aynı anda iki durumda birden olabilir. Çakışma nedeniyle, bir kübit açık ve kapalı, veya yukarı ve aşağı, ya da sıfır ve bir karışımları şeklinde görülebilir. Üstelik bu karışımların eşit olması da gerekmez. Kübit, diyelim ki yüzde 87 yukarı ve yüzde 13 aşağı, ya da herhangi farklı bir kombinasyon şeklinde olabilir. Bu nedenle, prensipte, klasik açık -kapalı, evet- hayır biriminden çok daha fazla bilgi içerir.

Kübitin özellikleri, son yıllarda kuvantum hesaplamaları denen yeni bir alanda (hâlâ tamamıyla kuramsal bir alan ve uygulamasının gerçekleşmesi çok uzak) büyük bir faaliyet patlamasına yol açtı. kuvantum hesaplamasının bize yol gösteren ilkesi şöyledir: uygun bir şekilde düzenlenen "mantık kapısı" (prensipte her bilgisayarın merkezinde olan şeyin benzeri), klasik mantık kapısında yapıldığı gibi aynı anda tek bir işlem yapacağına, *hem* açık *hem de* kapalı, ya da hem sıfır hem de bir gibi kübit olasılıklarını gerçekleştirir. Bu olay, teorik olarak, gücün kullanımında iki kattan fazla kazanç sağlar. Eğer bir miktar çakışmış kübit içeren tek bir sistem düşünürseniz, kübitlerin karıştırılabileceği tüm şekilleri açıklayan çok sayıda yöntem olabileceğini görürsünüz. İki kübit dört şekilde karışabilir, on tanesi bin şekilde karışabilir, yirmi tanesi bir milyon şekilde karışabilir. Bu çakışma sisteminde derhal harekete geçen mantık kapısı, tüm olasılıkları derhal işleme koyar, bunu yaparken sistemi bozmaz, aksi taktirde herhangi bir etkileşim tüm olasılıklar içinden, kesin bir olasılıkla sadece bir tanesini çıkarır. Bu nedenle kuvantum hesaplamaları teorisyenleri, bir çakışma (ya da karışma) sisteminin bir işlemcide nasıl hayatta kalacağım ve ileride incelemek üzere diğer tarafa nasıl geçeceğini düşünmelidir.

Sonuç olarak bilgi, kübit ya da kübit seti karışımından çıkarılmalıdır. Bu olduğu zaman, süper! - bir klasik bilgi parçası daha ortaya çıkar. Ölçüm olayı, o zamana kadar çakışmış pek çok olasılıktan sadece bir tanesini ortaya çıkarmıştır. Bu

durum kuvantum hesaplamasının kuramsal avantajını bozar mı? Hayır, çünkü pek çok problemde tek istenen şey basit bir cevaptır.

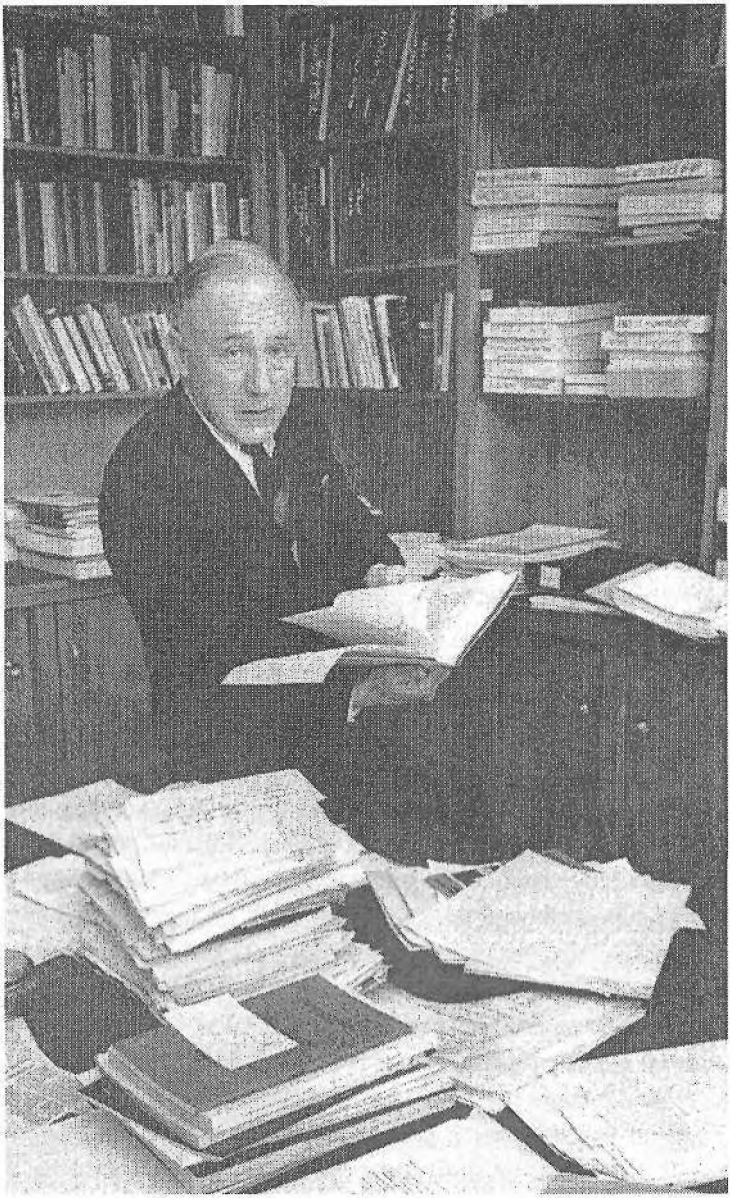
Bu alanda çalışan bilim insanları, gelecekte hava durumu tahminlerinde kuvantum hesaplamalarının kullanılacağına inanmasa da, bu alan karmaşık verilerle basit bir sonuç elde edilebileceğinin örneğini gösterir. Örneğin şöyle sorabilirsiniz: Yarın Philadelphia'da yağmur yağacak mı? Evet ya da hayır şeklideki basit yanıt için çok sayıda veri ve çok sayıda hesaplama gerekir. Bu tür problemlerde, kuvantum hesaplaması kendiliğinden ortaya çıkar. İngiltere Cambridge'teki evinden nadiren çıkan, dünyadan elini eteğini çekmiş, dahi ve kuvantum hesaplamalarının öncüsü olan David Deutsch, bir kuvantum hesaplaması sonucu ortaya çıkan tek bir parça bilginin, çakışmış genlikler arasındaki karışımın sonucu olabildiğini, böyle olunca çakışan çok sayıdaki bilginin en son cevaba ulaştırdığını söylemiştir*.

Ertelenmiş Tercih

Şu anda doksanlı yaşlarda cin gibi bir adam olan John Wheeler, efsanevi nezaketini ve cana yakınlığını, gençliğinde miyop olmasına bağlar. Anlattığına göre 1920'lerin sonlarında Johns Hopkins'de öğrenciyken, kampüste yürürken karşılaştığı arkadaşlarına selam vermek ister. Ancak gözleri iyi görmediği için, yaklaştığı kişinin bir arkadaşı mı yoksa yabancı mı olduğunu bilemez. Mahcup olmamak için, önünden geçtiği herkese gülümser ve bazen de el sallar. Daha sonra bu bir alışkanlığa dönüşür.

Wheeler'ın görüş sınırı ne olursa olsun, geniş anlamdaki görüşü kesinlikle zarar görmemiştir. Sıcakkanlılığının yanı

*David Deutsch ve kavuntum hesaplamaları hakkında daha detaylı bilgi için Bkz., Julian Brown, *The Questfor the Quantum Computer* (New York: Simon and Schuster, 2000)



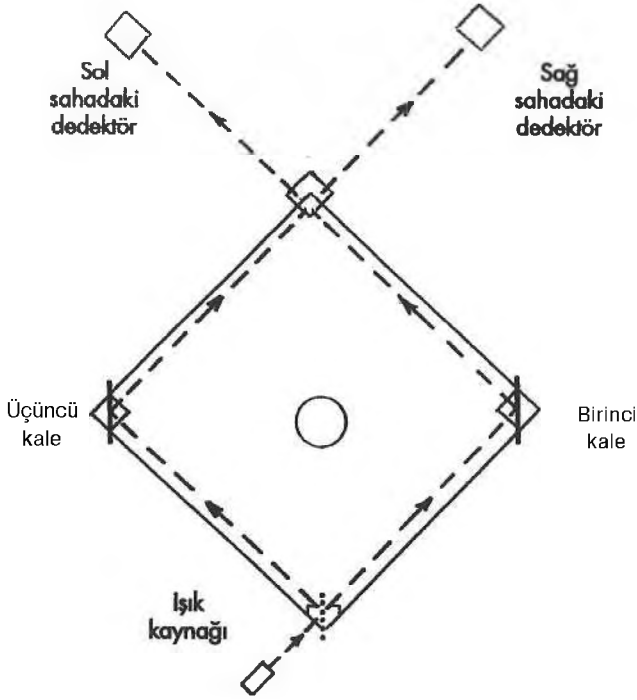
John Wheeler (doğum 1911), 1980. Fotoğraf John Wheeler arşivi.

sıra fiziğin ufkunun ötesine bakabilme yeteneğiyle de ünlüdür. Örneğin *geonlann* varlığını (çok yoğun oldukları için ortak bir merkezin etrafını çeviren, hiçbir madde olmadan kendi yerçekimi güçleriyle yörüngede tutulan foton konsantrasyonları -hâlâ gözlemlenmemiş varlıkları) öne sürdü; pek çok fizikçi varlığına inanmadan önce, o kara delikleri keşfetti ve onlara isim verdi; kuvantum belirsizliğinin uzay-zamanda kendi kendine "kuvantum köpüğü" (bir başka Wheeler sözcüğü) yaratmak için çalıştığı son derece kısa mesafeleri ve kısa süreleri ölçen Planck ölçeğini buldu; ve "it from bit" (bilgilerden oluşan dünya) vecizesiyle (gerçek dünyanın sonuçta bilgilere dayandığı görüşü), kuvantum bilgi teorisiyle ilgili tüm güncel çalışmalar için uygun zemini oluşturdu.

Bu bölümde, Wheeler 1978 yılında yaptığında ufkun ötesinde kalan, ancak o tarihten sonra ilk olarak 1984'de Maryland Üniversitesi'nde Carroll Alley ve çalışma arkadaşları tarafından araştırmaları sırasında fark edilen, daha sonra da pek çok laboratuvarda farkına varılan bir deneyden bahsedeceğim*. Bu deney, bir fotonun kaynağını terk ettikten uzun bir süre sonra, dedektöre doğru tek bir yol mu, yoksa çakışmış iki yol mu izlemesi gerektiğine deneyi yapan fizikçinin karar vermesine izin veren bir düzenlemedir.

Bu deneyi tarif etmek için, Wheeler'ın 1998'de yazdığı *Geons, Black Holes, and Quantum Foam* adlı otobiyografisinde kullandığı beysbol sahası örneğini vereceğim. Eğer Amerikan beysbolünü bilmiyorsanız, neler olduğunu gözünüzde canlandırabilmek için lütfen birinden yardım alın. Şimdi ben deneyi yapan kişi olacağım. Başlangıç kalesi levhasının arkasında ve bir kenardan biraz daha uzakta, levhanın üzerine monte ettiğim yarı gümüş bir aynaya doğur gelen bir foton seline yol gösteren bir ışık kaynağı hazırladım. Bu cam levha çok ince bir gümüş tabakasıyla kaplı, böylece üzerine çarpan ışığın yarısını yansıtıyor, diğer yarısının ise içinden

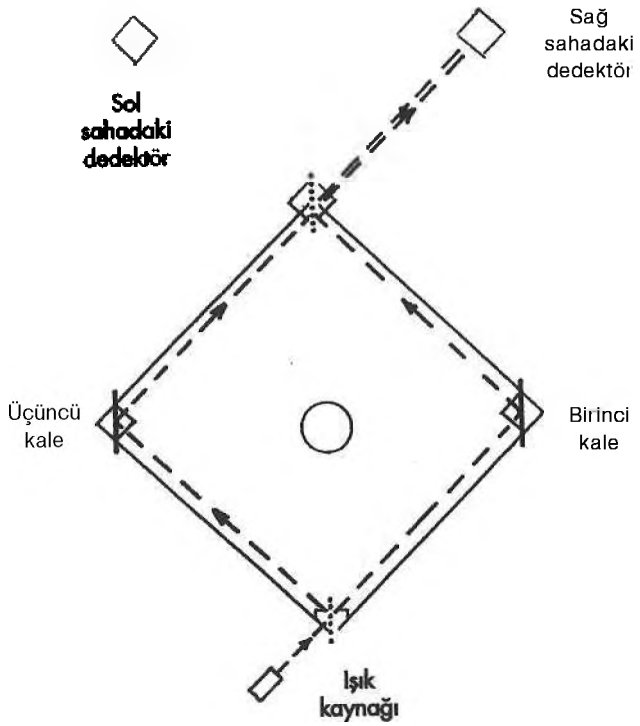
* Karışma ve ertelenmiş seçimlerle ilgili zengin bir çeşitliliğe sahip deneyler şu anda Paris, Ceneve ve Viyana laboratuvarlanndan yola çıkmakta.



Şekil 50. Her bir fotonun, üzerinde hiçbir şey olmayan ikinci kalenin solundaki veya sağındaki sahaya gitmek için yüzde 50 şansı var. Bu nedenle, her bir dedektöre fotonların yarısı ulaşır.

geçmesine izin veriyor. Bunun anlamı bir foton tanesinin yüzde 50 olasılıkla yansıtılıyor, yüzde 50 olasılıkla aynadan geçiriliyor olmasıdır. Bunun başka bir anlama geldiğini de tahmin edersiniz: yarı gümüş aynaya çarpan bu foton *hem* yansıtılacak *hem de* aynadan geçirilecek, böylece fotonun dalga fonksiyonu bölünecektir. Aynaya çarptıktan sonra, iki farklı yayılma yönünde çakışma durumunda olacaktır.

Yarı gümüş aynayı, ondan geçen ışık birinci kaleye yönelecek şekilde ve ondan yansıyan ışık üçüncü kaleye yönelecek şekilde ayarladım (Bkz. Şekil 50). Bu iki kalenin üzerlerine bütün ışığı (ya da bütün fotonlan) ikinci kaleye göndere-



Şekil 5 1 . İkinci kalenin üzerindeki yarı gümüş bir ayna ile karışım, her fotonun sağdaki sahaya gitmesine neden olur.

cek tam yansıtmalı aynalar yerleştiriyorum. İkinci kalenin üzerindeki yeri boş bırakırsam ve hem soldaki hem sağdaki sahalara dedektörler yerleştirirsem, bu dedektörler fotonların gelişini (bütün fotonlan!) kaydedecektir. Soldaki sahadaki tık sesi, birinci kaleden bir fotonun geldiğini gösterir. Sağdaki sahadaki tık sesi üçüncü kaleden bir fotonun geldiğini gösterir. Şu ana kadar çakışma olduğunu gösteren hiçbir kanıt yok, elimizde sadece iki ayrı yolla ilgili bir olasılık ölçüsü var. Ortalama olarak, fotonların yarısı soldaki sahada, diğer yarısı da sağdaki sahada görülecek.

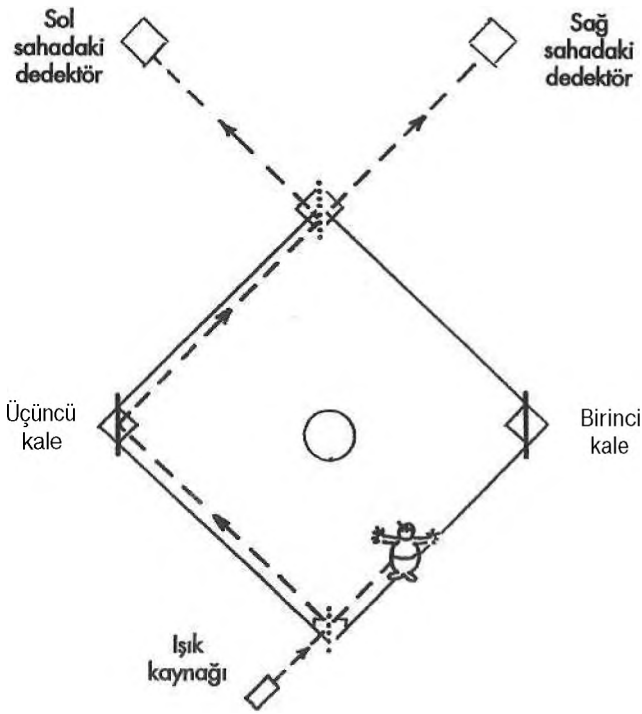
Fotonların aynı anda gerçekten de iki yol izlediğini göster-

mek için, başka bir yarı gümüş ayna bulup ikinci kalenin üzerine yerleştiriyorum. Bu şekilde birinci kaleden gelen ışığın yarısı sağdaki sahaya yansıtılıp, diğer yarısı ise soldaki sahaya dümdüz gönderilirken, üçüncü kaleden gelen ışığın yarısı soldaki sahaya yansıtılıp, diğer yarısı ise sağdaki sahaya dümdüz gönderiliyor. Bu ayna, soldaki sahaya giden iki ışığın yıkıcı bir şekilde, sağdaki sahaya giden iki ışığın ise yapısı bir şekilde karışacağı biçimde dikkatle yerleştirilebilir.

Klasik düşünecek olursak, ne olacağını tahmin etmek kolay. Bütün ışık sağdaki sahada toplanacak. (Bkz. Şekil 51). Kale çizgisi boyunca yayılan ışık dalgaları, soldaki sahaya giden yola girmede birbirlerine engel olacak, sağdaki sahaya giden yola girmek için ise birbirlerine destek olacaktır. Peki ya tek başına olan fotonlar? Wheeler'ın doğru tahmin ettiği gibi, sağdaki sahadaki dedektör fotonların gelişini tık sesiyle tekrarlayıp dururken, sol sahadaki dedektör sessiz kalacak. Buradan sadece tek bir sonuç çıkarılabilir: her bir foton aynı anda iki yol izler. Her fotonun sağdaki sahaya gideceği gerçeği, foton dalgasının kendisiyle yapıcı ya da yıkıcı şekilde karışarak bölünmesi ve eski haline dönmesi şeklindeki foton dalga fonksiyonu (ya da dalga genliği) aracılığıyla açıklanabilir.

Bu durumda bir tercih hakkım var. İkinci kalenin üzerini boş bırakabilirim, böylece ölçümlerim her bir fotonun izlediği yolu gösterir. Ya da oraya yarı gümüş aynayı koyabilirim, böylece her bir fotonun aynı anda iki yol izlediğini gösterebilirim. Şimdi sahneye *ertelenmiş tercih* çıkıyor. Işık kaynağını sadece bir nano saniyeliğine (bir saniyenin milyarda biri) açıyorum. Işık kaynağım bu sürede, diyelim ki, birkaç düzine foton yayıyor. Sonra kırk ya da elli nano saniye kadar durup, başımı kaşıyarak şimdi ne yapmam gerektiğine karar veriyorum. Bir foton bir nano saniyede yaklaşık bir foot'luk (30,48 cm) bir hızda ilerlediği için, ben kararımı verene kadar, fotonlar çoktan levhadan yayılmış olacaklar; ancak henüz ikinci kaleye ulaşmamış olacaklar. Yani yolda olacaklar.

Diyelim ki her fotonun izlediği yolu bulmaya karar ver-



Şekil 52. Antrenör birinci kaleye giden yolu kapadığında, fotonlar eşit sayılarda soldaki ve sağdaki sahalara ulaşır.

dim. Bu çok kolay. İkinci kalenin üzerini boş bırakırım ve fotonların, soldaki ve sağdaki sahalardaki dedektörlere varışını sayarım. Her bir dedektöre fotonların yarısını ulaştığını bulurum. Bu durum, ben sonuca ulaştığımda, her fotonun kendisini çoktan birinci ya da üçüncü kaleye giden yola "adadığını" gösterir. Diyelim ki, fotonlar yola koyulduktan sonra, her bir fotonun aynı anda her iki yolu da izleyip izlemediğini bulmaya karar verdim. Bu defa yan gümüş aynayı ikinci kale üzerine koyarım. Mucizevi bir şekilde, her foton sağdaki sahadaki dedektöre ulaşır, her fotonun kendisiyle karıştığı her birinin aynı anda her iki yolu da izlemesinden anlaşılır.

Bir şey daha yapabilirim. Yarı gümüş aynayı ikinci kalenin olduğu yerde bırakır, merkezdeki levhadan birinci kaleye giden yolu kapatacak biçimde, sahaya bir antrenör gönderirim (Şekil 52'deki gibi). Şimdi ne olduğuna bakalım. Hiçbir foton (ya da foton dalgası) bu durumda ilk kaleye giden yolu tamamlayamaz. İkinci kaleye ulaşan her foton (ya da foton dalgası) üçüncü kaleye giden yola girmeliydi. Bu defa dedektörlerden eşit sayıda tık sesi gelir. Üçüncü kaleden ikinci kaleye gelen her fotonun doğruca sağdaki sahaya gönderilme olasılığı yüzde 50'dir, soldaki sahaya yansıtılma olasılığı da yüzde 50'dir. Karışma, bu olayın dışında bırakılmıştır. Fotonlar yeniden belirli yolları izleyen basit parçacıklar gibi davranmaktadır.

Modern elektronik bilimi ile nano saniyelerde "kararlar" almak hiç de zor değildir. Eğer bir deney bir laboratuvarda yapılabiliyorsa, bir beysbol sahasında yapılmaması için hiçbir neden yoktur. Ayrıca John Wheeler'ın söylediği gibi, kozmik uzaklıklarda da bu deneyin yapılmaması için hiçbir neden yoktur. Uzaktaki bir gök cisminden Dünya'ya mümkün olan iki yolu izleyerek gelen ışığı düşünün. Bu ışık A galaksisinin yanından geçerken, diyelim ki, sola doğru kırılarak Dünya'ya ulaşacağı yola girebilir. (Işığın yerçekimi tarafından kırılması artık gerçekleştirilebilen ve çoğunlukla gözlemlenen bir olaydır.) Ya da B galaksisinin yanından geçerken, diyelim ki, sağa doğru kırılarak Dünya'ya ulaşacağı farklı bir yola girebilir. Eğer bir astronom teleskopla A galaksisine bakarsa, gökcisminden çıkarak A galaksisinin yanından geçen bu fotonları görür.

B galaksisine bakan astronom, bu galaksinin yanından geçen fotonları görür. Ama astronom bir şey daha yapabilir. Her iki galaksiden gelen ışığın ulaştığı yerdeki gözlemevine yarı gümüş kaplı bir ayna koyabilir. Sonra (prensipte) iki farklı yol izlemiş olan ışık sadece bir yönde (sadece sağdaki saha gibi) görünen fotonlar üreterek karışabilir. Astronom, belirli bir yol arama ya da iki yol arasında karışım aramayla ilgili

kararım, ışık gökcismini terk ettikten bir milyar yıl sonra verebilir. Einstein'm deyimiyle bu hayalet görüntüdür. Ama gerçektir.

Kuvantum Mekaniği ve Yerçekimi

Kuvantum Köpüğü

Daha önce de belirttiğimiz gibi kuvantum köpüğü, uzay zamanın 10^{-35} m'lik uzaklıkta ve 10^{-43}'s'lik süredeki bulanıklığıdır. Bugüne kadar bilim insanlarının incelediği bir atom çekirdeğinin büyüklüğünden çok daha küçük boyutlardaki dünyada, yerçekimi ve kuvantum teorisinin birbiriyle hiç ilgisi yoktur. Ancak Wheeler'ın söylediği gibi, eğer uzay zamanın dokusunu çok daha derin araştırmayı düşünürseniz, parçacıkların özelliğini oluşturan düzensiz değişimlerin ve belirsizliklerin uzay zamandan uzak durduğu bir noktaya ulaşırsınız. Bizi çevreleyen uzayın tekdüzeliği ve zamanın ileri doğru düzenli ilerleyişi, görülmesi imkânsız tuhaf büklümlere neden olur. Bu *Planck ölçekli fiziktir* (Max Planck'in kendini geri çektiği fizik), bugün bu fizik dalı kuramsal fizikçiler tarafından geniş bir şekilde keşfedilmiştir.

Yaylar

Planck boyutunun altında, ya da çok üzerinde olmayan bir yerde, başka bir grup teorisyenin üzerinde çalıştığı kuramsal yaylar vardır. Yay teorisine göre, fizikçinin parçacık olarak gördüğü (ve matematiksel açıdan yaklaştığı) şey -yani bir matematiksel noktada varolan bir varlık- aslında ya bir çizgi şeklinde ya da bir ilmik şeklinde olan ve titreşen küçük bir yaydır. Bu yayın titreşimi, parçacık dediğimiz şeyin kütlesinin ve diğer özelliklerinin oluşmasına neden olur. Yay teorisinin matematiği ürkütücü derecede zordur ve teori gerçek te-

mel parçacıkların özelliklerini açıklamaktadır.

Ancak bu teori, kuvantum teorisiyle yerçekimi teorisini birleştirme potansiyeline sahip en ilginç fikirlerden biridir. Yay teorisinin en cazip özelliklerinden biri, hem felsefi hem de matematiksel yönden sorun olan nokta parçacıklarının yerine uzayın, küçük bir bölgesinden yayılan varlıkları geçirmesidir. Bir noktada gerçekten bir yükün olduğunu hayal edin. Bu yükün yanındaki elektrik alanı, yüke olan uzaklığın ters karesi kadar değişir; bu nedenle siz yüke yaklaştıkça, alan sınırsız bir şeklide büyür. Yükte ise bu sonsuzdur. Bu, nokta parçacıklarının sonsuzluğuyla ilgili basit bir örnektir. Eğer parçacık dediğimiz ve belirli noktalarda görünen şeyler sonunda uzayda belirli bir bölgeye yerleşirse (bu bölge her ne kadar inanılmaz derecede küçük olsa da), fizikçiler mutlu olacaktır.

Buharlaşan Kara Delikler

Kara delik genellikle, ışık da dahil olmak üzere hiçbir şeyin ondan kaçamayacağı şekilde yoğun bir çekim gücüyle kuşatılmış bir varlık olarak tanımlanır. Bu tanım, 1974 yılına kadar geçerli bir tanımdı, o yıl ünlü İngiliz fizikçi Stephen Havvking, kuvantum teorisine dayanarak, bir kara delikten bir şeylerin kaçabileceğini ve aslında bütün kütlesi ışın olarak yayılana kadar bir kara deliğin kademeli olarak buharlaştığını göstermişti. Her şey, John Wheeler'ın ihtisas yapan öğrencisi Jacob Bekenstein'a şöyle demesiyle başladı: "Jacob", dedi Wheeler (yakın sözcükler kullanarak anlatıyorum), "Eğer masanın üzerine bir fincan sıcak çay koyup soğumasına izin verirsem, sıcak çaydan daha serin olan odaya ısı transferi olacağından, dünyanın çaydan daha serin olan odaya ısı transferi olacağından, dünyanın genel düzensizliğini arttırıp, evrenin aleyhinde çalışarak suç işlemiş olurum. Ama eğer sıcak çayı bir kara deliğe dökersem, suçun cezasından kurtulurum. Çünkü bu olay düzensizliği arttırmaz." Wheeler, birkaç ay soma Bekenstein'ın ofisine gelerek şöyle dediğini söylüyor (yine

yakın sözcükler kullanarak anlatıyorum): "işlediğiniz suçtan ceza almadan kurtulamazsınız. Kara delik etkisizdir (bir etkisizlik ölçüsü vardır), bu nedenle çayı kara deliğe döktüğünüzde, evrendeki düzensizliği arttırıyorsunuz ve evrenin ölüme yaklaşmasına, çayı masanın üzerine bıraktığınız zamanki kadar katkıda bulunuyorsunuz."

Hawking ilk başta, Bekenstein kara deliğin entropisi (etkisizliği) olduğu görüşünü yayınladığında, bunu kabul etmekte zorlandı. Ancak bu görüşü kabul ettiği zaman, aşağıdaki satırlardaki gibi düşünmeye başladı. Eğer bir kara deliğin entropisi varsa, bir sıcaklığı olması gerekir ve eğer bir sıcaklığı varsa, bunu yayması gerekir (tıpkı Güneş'in ve her nesnenin ne kadar soğuk olursa olsun belirli bir düzeyde ısı yayması gibi). Peki, eğer hiçbir şey bir kara delikten kaçamazsa, bu yayılım nereden gelecek? Havvking, boşlukta kuvvet içerip kendileri geri planda kalan parçacıkların sürekli yaratılış ve yok oluşlarının bu soruyu yanıtlayabileceğim fark etti. Normalde, eğer bir parçacık çifti -diyelim ki bir elektron ve bir pozitron- yaratılırsa, bir an için durgunluğu korunarak hızlı bir şeklide yok edilir*. Ama eğer parçacık çifti bir kara deliğin tam "ufuk"unda yaratılırsa (yani, hiçbir şeyin kaçamadığı iç bölge ile kaçışın mümkün olduğu dış bölge arasındaki sınırın tam üzerinde) yaratılan parçacıklardan biri, delik tarafından yutulurken diğeri ise uçup gider. Tam sonuç ise, kara deliğin enerjisinin küçük bir kısmının kaçan parçacığa verilmesi ve kara deliğin kütlesinin bir miktar azalmasıdır. Hawking'in hesapları, çok büyük bir kara deliğin "buharlaşma" oranının son derece yavaş olduğunu, ama ömrünün sonuna doğru kara deliğin kütlesi küçüldüğünde -ya da ilk başta da küçük kütleli olduğunda- buharlaşma oranının hızlı olabileceğini göstermiştir. Kara delik son bir gösterişli patlamayla yok olur. Bugüne kadar, böyle bir yöntemle haya[f]ına son ve-

* "Durgunluk" tam doğru bir sözcük değil, çünkü yaratılış ve yok olma dansı her an her yerde devam eder ve uzay boşluğunu oldukça hareketli bir yere dönüştürür.

ren bir kara deliğe rastlanmamıştır, ama bu olduğunda, Wheeler'm "suç"unun cezası ölçülüp verilecektir.

Kara Cisim

Bugün evrenin gizemlerinden birisi, çözümü için parçacık fiziğinin ve kuvantum teorisinin yardımcı olabileceği *kara cisim* gizemidir. Uzun bir süre astronomlar ve evren bilimciler, evrendeki cismin büyük bir kısmının ışık saçtığını düşündüler. Bizim güneş sistemimizde gezegenler ve asteroidler denen bir kara cisim vardır. Ancak bu kara cismin toplam kütlesi, güneşin kütlesinden çok daha azdır. Işık saçan Güneş'in kütlesi yaklaşık olarak tüm güneş sisteminin kütlesine eşittir. Eğer uzaylı bir astronom Güneş'in kütlesini hesaba katıp, Güneş'in çevresindeki bilinmeyen ve görünmeyen nesnelerin kütlesini göz ardı etseydi, çok büyük bir hata yapmış sayılmazdı. Diğer güneş sistemlerinde de bizimki gibi büyük bir yıldızın az miktarda zayıf kara cisim yığınlarıyla çevrili olduğunu düşünmek mantıklı olurdu. Parlaklığın sadece görünebilen ışık demek olmadığını burada belirtmeliyim. Astronomlar gökyüzündeki nesneleri, kızıl ötesi ve mor ötesi dalgalarla, radyo dalgalarıyla ve X ışınlarıyla da "görüyor". Kara cisim görülen hiçbir tür ışın yaymayan gerçekten kara bir cisimdir. (Soğuk cisimler ve büyük kara delikler biraz ışıma yapar, ama kozmik uzaklıklardan görülebilecek düzeyde değildir.)

Kara cisim sezilebilir bir ışıma yapmasa da, varlığını çekimsel etkisiyle gösterir. Bilinen ve bilinmeyen bütün cisimler çekim gücü için çaba sarf eder ve onu hisseder. Son yıllarda astronomlar, evrende çok miktarda kara cisim olduğuna dair sağlam kanıtlar toplamıştır ve bugün, kara cismin kütlesinin ışık yayan cismin kütlesinden yaklaşık altı kat fazla olduğunu tahmin etmektedirler. Kanıtlardan birinin kaynağı halka şeklindeki galaksilerin dönüş oranıdır. Bir galaksideki yıldızlar bir çarkın parçalan gibi dönmez. Belirli bir yıldızın dönüş oranı, onun galaksinin merkezine olan uzaklığına ve

yörüngesindeki toplam kütleye bağlıdır. Diğer galaksilerdeki devinimi inceleyen astronomlar, yıldızların diğer yıldızlar tarafından daha çok çekildiği sonucuna varmıştır. Kümeler halindeki bütün galaksiler de, "orada" bizim görebildiğimizden çok daha fazla kütle olduğunu gösterecek şekilde hareket eder. Bu, şaşırtıcı bir sonuç. Biz evreni "görebildiğimizi" sanmıştık, halbuki şimdi onun büyük bir bölümünü göremediğimizi fark ettik.

Kara cisim nedir? Kimse bilmiyor. Bu, bizim evrenimizle ilgili en zorlayıcı sorulardan biri. Yanıtı bulunduğunda şunun gibi sorulara da ışık tutacak: Büyük Patlama'nın hemen ardından ilk olarak tam olarak neler oldu? En sıradan fikirlerden biri, kara cismin sıradan "madde" yığınlarından (toz, kayalar, gezegenler, parlayamayacak kadar küçük yıldızlar) meydana geldiğidir. Başka bir düşünce ise kara cismin nötrinolardan oluştuğudur. Nötrinolann kütlesi bilinmiyor ama bunlar galiba kara cisim için kabul edilebilecek büyüklükte kütleye sahip adaylar. Kesinlikte sıradan olmayan bir görüş ise kara cismin bizim laboratuvarlarımızda bilinmeyen yeni türde parçacıklar (daha iyi bir isim bulunamadığı için bunlara *egzotik parçacıklar* deniyor) içermesidir. Bu durum kesinlikle en ilginç yanıt olurdu. Böyle kuramsal parçacıklar, eğer ağırsa (yeni bir proton kadar ağırsa), zayıf bir etkileşim içinde olmalı, yoksa şu an onlan görebilmemiz gerekirdi.

Bu nedenle, bu parçacıklara WIMP'ler yani zayıf etkileşimli ağır parçacıklar (weakly interacting massive particles) dendi. Acaba bu parçacıklar günün birinde Ek B'deki parçacık tablosunda yer alabilecek mi?

Kara Enerji

Evrenimizle ilgili popüler bir varsayım (gitgide büyüyen bir kanıtla desteklenen) evrenin sonsuza dek genişleyecek olması görüşüdür. Aslında, bu kanıt *hızlı* genişlemeye işaret eder. İzin verirseniz, bunun niçin oldukça tuhaf olduğunu

açıklayayım. Dünyanın yüzeyinden yukarıya doğru fırlatılan bir nesne düşünün. Eğer bu nesne bir beysbol topu ya da oyuncak raketse, biraz yükselecek, bir an duracak ve sonra yere düşecektir. Eğer bu nesne kaçış hızı denilen bir hızdan daha yüksek bir süratle fırlatılan bir uzay gemisiyse, yıldızlararası uzayda asgari hıza inene kadar yavaşlayarak, sonsuza kadar uçacaktır. Eğer bu uzay gemisi, kaçış hızına tam olarak eşit bir hızda fırlatılırsa, dünyanın yerçekimi alanından kaçabilecektir, ama ucu ucuna. Sonsuza kadar gitmeye devam edecektir, ancak dünyadan uzak bir mesafede sıfır hızına yaklaşana kadar yavaşlamayı sürdürecektir. Bu üç olasılığın ortak özelliği, itici gücü durduğu zaman fırlayışın hızının yavaşlamasıdır. Dünyadan uzakta hiçbir şeklide *hızlanmayacaktır* (gönderildikten sonra).

Bilim insanları bundan kısa bir süre öncesine kadar, evrenin bir bütün olarak aynı üç seçeneğe sahip olduğunu düşünmüşlerdi. Evrende Büyük Patlama tarafından fırlatılan madde, azami uzaklığa uçabilirdi, sonra geri dönüp sonunda "Büyük Çatırdama" ile çökebilirdi. Beysbol topunun ya da oyuncak raketin uçuşuna benzeyen bu davranış, teoriye göre, eğer evrenin toplam enerjisi (kütle enerjisi artı diğer enerji türleri) yerçekiminin onun uzaklaşmasını durdurup geri döndürecek kadar büyük olsaydı gerçekleşirdi. Ya da, çok daha küçük miktarda enerjiyle ve bunun sonucunda daha zayıf bir çekim gücüyle, evren sabit bir genişleme oranına (en düşük hız) yaklaşana kadar yavaşlayıp sonsuza dek genişleyebilirdi. Belirli bir *asgari enerjiyle* evren, daima yavaşlayarak ama asla durmayarak, sonsuza kadar ucu ucuna genişlerdi.

Evrenin genişlemesinin hızlandığını gösteren şaşırtıcı kanıt ilk olarak 1998 yılında açıklandı. Araştırmacılar, hem hızını hem de uzaklığını ölçebildikleri, uzak galaksilerdeki belirli bir türde süpernovanın özelliklerini incelediler.

Genişleyen bir evrenden bekleneceği gibi, daha uzakta süpernovaların daha hızlı hareket ettiği gözlemlendi. Ancak veride bir sürpriz vardı.

Süpernova ne kadar uzaktaysa, yani araştırmacılar ne kadar uzak geçmişi inceledilerse, hızı bir genişlemeden beklenen yavaşlama ya da değişmeme durumundan daha azdı. Daha önce de belirtildiği gibi, şu andaki genişleme oranı milyarlarca yıl öncekinden daha büyüktür. Kısaca, genişleme hızlanmaktadır. Teorisyenler bir kovboy filminde silah çeken şerifin hızıyla bir açıklama yapmakta hiç zorlanmadılar. Hızlanan genişlemenin suçunu *kara enerjiye* yüklediler.

Peki kara enerji nedir? İlk olarak, *karadır,* kara cisim gibi, yani görünmezdir. Varlığını, dünyadan gözlenebilecek herhangi bir tür ışın yayma yoluyla bildirmez. İkincisi, bir *enerjidir.* Yine, kara cisimde olduğu gibi, bir enerji biçimidir. Ancak kara cisim ile kara enerji arasında iki büyük fark vardır. Birincisi, kara cismin uzayda yayılan cisim kırıntılarından oluştuğunun varsayılmasıdır, bu "kırıntılar" basit parçacıklar veya kayalar, ya da gezegenler, hatta kara delikler bile olabilir. Bunların aksine kara enerji, uzayda belirli bir şekilde yayılır. Hatta onun, uzayın bir özelliği olduğu bile düşünülür. Kırıntılar halinde kümelenmemiştir. Her yerdedir.

İkinci fark ise kara cismin çekici, kara enerjinin itici olmasıdır. Bunu biraz açıklamak gerekiyor. Kara cismin, diğer tüm cisimler gibi, bütün cisimleri cazibesiyle kendine doğru çektiği düşünülür. Sıradan cisim gibi, evrenin genişleyişini yavaşlatma eğilimindedir. Kara enerji ise cismi tam olarak itmez. Onun yerine, uzayın kendisini genişletmesine neden olur ve böylece, dolaylı olarak cismi uzaklaştırıyormuş gibi görünür. Bu nedenle kara ve sıradan cisim birlikte evrenin genişleyişini *yavaşlatırken,* kara enerji ise *hızlandırır.* Teoriye göre, kara ve sıradan cismin *çekişi* zaman geçtikçe zayıflarken (evrenin parçaları da uzaklaşmıştır), kara enerjinin itişi sabit kalır. Bunun anlamı, zaten neredeyse on dört milyar yıldır zafer kazanan hızlanmanın, sonsuza kadar bu durumunu koruyacağıdır.

Sıradan cisim, kara cisim ve kara enerjinin ortak noktası, bu üçünün uzayın eğriliğine olan etkisidir. Uzayın, geniş anlamda, basketbol topunun yüzeyi gibi "pozitif eğriye sahip

olması, veya bir eyerin yüzeyi gibi "negatif eğriye sahip olması, ya da Utah'daki Bonneville Tuz Arazileri gibi "düz" olması, evrendeki toplam enerjiye bağlıdır.

1990'larm sonlarında evren bilimciler tarafından varılan tuhaf sonuç (bir kısmının umduğu şeyi doğrular), evrenin düz olduğudur. Üstelik, pek çok kaynaktan edinilen kanıt, bu düzlüğe katkısı olan enerjinin şöyle bölünebileceğini söyler: sıradan cisim, yüzde 4; kara cisim, yüzde 23; kara enerji, yüzde 73. Bizim küçük dünyamız, parlayan cismin engin evreninde varolan en küçük nokta değildir, parlayan her şey "oradaki" toplam enerjinin sadece küçük bir kesitidir.

Kara enerji konusunu bitirmeden öne, konuyla ilgili tarihten bazı açıklamalar yapmak istiyorum.

Einstein, 1915 yılındaki genel görelilikle ilgili özgün çalışmasının ardından endişe duymaya başlamıştı çünkü onun denklemleri evrenin *dinamik* olduğunu gösteriyordu; yani evren ya genişliyordu ya da daralıyordu. O dönemde, dinamik evrenle ilgili hiçbir kanıt yoktu. Einstein hemen hemen diğer bütün bilim insanlarıyla birlikte, evrenin *statik* olduğunu varsayıyordu (yani evreni oluşturan iç elemanlar dönüyor ve hızla akıyordu, ama tamamıyla büyüyüp, küçülmüyordu). Bu nedenle Einstein denklemlerine, *kozmolojik sabit* dediği bir terim ekledi. Bu terimin anlamı yerçekimine karşı koymaktı; aslında karşıt çekim gibi davranmaktı ve böylece statik bir evrenin varlığına izin vermekti.

Bundan on yıl kadar sonra, Amerikalı astronom Edwin Hubble evrenin aslında genişlediğini keşfetti. Aslında kozmolojik bir sabite ihtiyaç da yoktu. Einstein'm *özgün* denklemleri, kozmolojik sabit olmadan, Büyük Patlama'nın bütün yan etkilerini görünüşte güzel bir şekilde açıklıyordu. Rivayete göre Einstein ortaya koyduğu bu sabiti en büyük hatası olarak adlandırmıştı*. Bu sabit yaklaşık son yetmiş beş yıldır

* Rivayete göre Einstein bu sözleri George Gamow'la sohbet ederken söylemişti (Almanca). Einstein yazılarında "en büyük hata"sına hiç değinmezken, bu sözler onunla ilgili en çok aktarılan sözlerdir.

fizikte kullanılmamaktadır.

Ancak hızlanan genişlemenin ona ihtiyacı var. Einstein'm kozmolojik sabit dediği şey (tamamıyla yumuşak bir terim) bugün kara enerji denilen şeyin bir kısmına çok benzer. Yeni terim, uzayın bu tuhaf karşıt çekim güçlü esnekliğinde neler olduğunu daha açık bir fiziksel görüş olarak ifade eder. Eğer kara enerji yoğunlukla tam olarak uyum sağlasaydı, prensipte statik bir evrenin oluşmasına neden olurdu. Ancak bunu yapmıyor. Güncel bir kanıta göre, kara enerji geleneksel çekim gücünü etkileyip, evreni her zamankinden çok daha hızlı bir şeklide genişletiyor. Einstein'm "en büyük hatası" belki de onun dehasının bir başka göstergesidir.

Ürkütücü Bir Teori

Benim ve eşimin bir zamanlar çocuklarımızla birlikte oynadığımız uyaklı bir sözcük oyununun pek çok adı vardır. Biz bu oyuna Stinky Pinky deriz. Oyunculardan biri "üstün kazak" gibi bir tamlamanın anlamını sorar, diğerleri uyaklı yanıtı bulmaya çalışır: "daha iyi süeter" gibi. Ya da "hayal" kırıklığına uğratan dağ zirvesi"nin anlamı "kuralları çiğneyen doruk"tur. Oyun böyle sürer gider.(Sözcük sonlarında İngilizce'de uyak vardır.) Peki 'kuvantum mekaniği' nedir? "Ürkütücü bir teori"dir. Bu konuyu açıklamak için bu kitapta temel parçacıkların yanı sıra atomları ve çekirdekleri de kullandım. Fizikçiler genellikle birbirlerine, kuvantum mekaniğini çok fazla düşündüklerinde başlarının döndüğünü söylerler. Bu kitapta daha önce de bahsettiğim gibi, kuvantum mekaniği sağduyuya karşı geldiği için sadece ürkütücü değildir. Daha derin nedenlerden dolayı tuhaftır da: gözlemlenemeyen niceliklerle ilgilidir; doğanın temel kanunlarının olasılıkları dayandığını gösterir; parçacıkların, aynı anda iki veya daha fazla devinim durumunda olmasına onay verir; bir parçacığın kendisiyle karışmasına izin verir; birbirlerinden oldukça uzakta olan parçacıkların karışabileceğim söyler. Bütün bunlar çoğu fizikçiyi,

atomun içindeni fenomenleri açıklamasındaki uzun ve kusursuz başarı listesine rağmen, kuvantum mekaniğinin eksik olduğuna inanmaya yöneltir. Her geçen gün, fizikçi John Wheeler'la aynı görüşü daha fazla paylaşmaktadır: "Kuvantum da neymiş?" Bu güzel bir sorudur.

Ek a

Ölçüler ve Büyüklükler

Tablo A. 1 Büyük ve küçük çarpanlar

Çarpan	isim	Sembol	Çarpan	İsim	Sembol
yüz 10^2	hekto	h	Yüzde bir İO^2	Santi	c
bin İO^3	kilo	k	Binde bir 10^3	Mili	m
bir milyon 10^6	mega	M	Milyonda bir İO$^{"6}$	mikro	ji
bir milyar 10^9	giga	G	milyarda bir İO$^{"9}$	nano	n
bir trilyon İO^{12}	tera	T	trilyonda bir İO:$^{'2}$	piko	p
bir katrilyon İO^{15}	peta	P	Katrilyonda bir İO$^{"15}$	femto	f
bir quintillion İO$^{'8}$	exa	E	quintillionda bir 10$^{""8}$	atto	a

Tablo A.2 Ölçü Tablosu

Fiziksel nicelik	Büyük ölçekli, dünyada kullanılan birim	Atomun içindeki dünyadaki büyüklükler
Uzunluk	Metre, m (bir yarddan biraz daha fazla; ayrıca santimetre, cm (0,4 inç), ve kilometre, km (0,6 mil)	Atomun boyu, yaklaşık 10" ^{10} m (0,1 nanometre, ya da 0,lnm) Protonun boyu, yaklaşık İO'^{5} m (1 femtometre, 1 fm)
Hız	Metre saniye, m / s (yürüme hızı) veya kilometre saniye, km/s (bir merminin hızı)	Işık hızı, 3x10^{8} m/s
Zaman	Saniye, s (bir saat sarkacının sallanma süresi); ayrıca saat, gün, yıl	Bir parçacığın bir çekirdek içinden geçtiği süre, yaklaşık 10'^{23} s. "Uzun ömürlü" parçacığın ortalama yaşam süresi, yaklaşık İO"^{10} s.
Kütle	Kilogram, kg (1 litre suyun kütlesi)	İki elektronun kütlesi, yaklaşık 1 milyon eV, ya da 1 MeV. Protonun kütlesi, yaklaşık 1 milyar eV, ya da 1GeV
Enerji	Joule, J (10 cm yükseklikten düşen kitabın kinetik enerjisi)	Hava molekülü leV'den az, TV tüpündeki elektron yaklaşık 10^{3}eV, en büyük hızlandırıcıdaki proton 10^{12}eV (1 elektron volt [eV] = 1,6xlO"J)
Elektrik yükü	Kulomb, C (ampulü 1 s yakar)	Elektron ile protonun yük büyüklüğü = 1,6x10" C
Dönüş	kg X m X m/s (dönen bir insan)	Fotonun dönüşü *h* - İO'^{34} kg X m X m/s

Tablo 8.1 Leptonlar

İsim	Sembol	Yük (birim:e)	Kütle (birim : MeV)	Dönüş (birim: $\hbar$)	Karşıt Parçacık	Tipik Dönüşüm	Ortalama Ömür
Çeşni 1							
Elektron	e	- 1	0,511	1/2	e^+	Sabit	
Elektron nötrinosu	ν_e	0	$3x10^{-6}$dan az	1/2	$\bar{\nu}_e$	Sabit (başka nötrinolara dönüşebilir)	
Çeşni 2							
Muon	μ	−1	105,7	1/2	μ^+	$\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$	$2,2 \times 10^{-6}$s
Muon nötrinosu	ν_μ	0	0,19'dan az	1/2	$\bar{\nu}_\mu$	sabit (başka nötrinolara dönüşebilir)	
Çeşni 3							
Tau	τ	−1	1.777	1/2	τ^+	$\tau \rightarrow e + \nu_\tau + \bar{\nu}_e$	$2,9 \times 10^{-13}$s
Tau nötrinosu	ν_τ	0	18'den az 1/2	1/2	$\bar{\nu}_\tau$	sabit başka nötrinolara dönüşebilir	

Tablo B.2 Kuarklar

İsim	Sembol	Yük (birimi: e)	Kütle (birim: MeV)	Dönüş (birimi:$\hbar$)	Baryon sayısı	Kesit parçacık
1. Grup						
Aşağı	a	-1/3	5 ile 8,5 arası	1/2	1/3	$\bar{a}$
Yukarı	y	2/3	1,5 ile 4,5 arası	1/2	1/3	$\bar{y}$
2. Grup						
Tuhaf	t	-1/3	80 ile 155 arası	1/2	1/3	$\bar{t}$
Tılsım	t	2/3	1.000 ile 1.400 arası	1/2	1/3	$\bar{t}$
3. Grup						
Dip	d	-1/3	4.000 ile 4.500 arası	1/2	1/3	$\bar{d}$
Zirve	z	2/3	174.000	1/2	1/3	$\bar{z}$

Tablo B.3 Bazı bileşik parçacıklar

İsim	Sembol	Yük (birim:e)	Kütle (birim: MeV)	Kuark bileşimi	Dönüş (birim: $\hbar$)	Tipik Dönüşüm	Ortalama Ömür
Baryonlar (bunlar fermiondur)							
Proton	p	1	938,3	yya	1/2	Bilinen yok	10^{25} yıldan fazla
Nötron	n	0	939,6	aay	1/2	$n \rightarrow p+e+\bar{\nu}_e$	886 s
Lambda	Λ	0	1.116	yas	1/2	$\Lambda \rightarrow p+\pi^-$	$2{,}6\times10^{-10}$s
Sigma	Σ	1, 0, -1	1.189 (+&-)	yys (+), aas(-)	1/2	$\Sigma^+ \rightarrow n+\pi^+$	$0{,}80\times10^{-10}$s (+&-)
			1.193 (0)	yas (0)		$\Sigma^\circ \rightarrow \Lambda+\gamma$	7×10^{-20}s (0)
Omega	Ω	-1	1.672	sss	3/2	$\Omega \rightarrow \Lambda+\pi^-$	$0{,}82\times10^{-10}$s
Mesonlar (bunlar bozondur)							
Pion	π	1, 0, -1	139,6 (+&-)	$y\bar{a}$ (+),$a\bar{y}$ (-)	0	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$	$2{,}6\times10^{-8}$s (+ & -)
			135,0 (0)	$y\bar{y}$ &, $y\bar{a}$ (0)		$\pi^\circ \rightarrow 2\gamma$	8×10^{-17} s (0)
Eta	η	0	548	$y\bar{y}$ & $a\bar{a}$	0	$\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^0 + \pi^-$	$5{,}6\times10^{-19}$s
Kaon	K	1, 0, -1	494 (+&-)	$y\bar{s}$ (+), $\bar{y}$ s (-)		$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	$1{,}24\times10^{-8}$s (+&-)
			498 (0)	$a\bar{s}$ & as (0)	0	$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$	$0{,}89\times10^{-10}$s (0)

Tablo B4 Güç taşıyıcıları

Tablo B4 Güç Taşıyıcıları

İsim	Sembol	Yük	Kütle (birim:e)
Yerçekimi (kuramsal, asla gözlemlenmemiş)	—	0	0
W artı	W+	1	80.400
W eksi	W-	-1	80.400
Z parçacığı	Z^0	0	91.190
Foton	ψ	0	0
Gluon (8 parçacıklı bir seri	g	0 (ama 3 tane "renk yükü")	0

Dönüş (birim : MeV)	Karşıt Parçacık (birim: $\hbar$)	Taşınan güç
2	Kendisi	Yerçekimsel
1	W-	Zayıf
1	W+	Zayıf
1	Kendisi	Zayıf
1	Kendisi	Elektromanyetik
1	Kendisi	Güçlü

EkC

Altını Alanlar

Üçüncü bölümün konusu olan leptonlar, çok sayıda Nobel Ödülü getirmiştir İşte bunlardan başlıcaları:

Sir Joseph Thomson 1906'da "gazlarda elektrik iletkenliğinin araştırılması" (elektronu keşfetmesi) ile,

Prens Louis-Victor de Broglie 1929'da "elektronların dalga doğasını keşfetmesi" ile,

Cari David Anderson 1936'da "pozitronun keşfi" (karşıt elektron) ile,

Cecil Frank Powell 1950'de "mesonlarla ilgili keşifler" (muonun piondan farklı olduğunu göstermesi) ile,

Sheldon Glashow, Abdus Salom, ve Steven Weinberg 1979'da "zayıf ve elektromanyetik etkileşimin birleşmesi teorisi" (nötrinoları yöneten güçlerle yüklü parçacıklan yöneten güçlerin birbirine bağlanması) ile,

Leon M. Lederman, Melvin Schwartz ve Jack Steinberger 1988'de "muon nötrinosunun keşfi" ile,

Frederick Reines 1995'de "nötrinonun keşfi" ile,

Martin L. Perl 1995'de "tau leptonunun keşfi" ile,

Raymond Davis, Jr. ve Masatoshi Koshiba 2002'de "kozmik nötrinoların keşfi" ile bu ödülü almışlardır.

Eğer elektronların özellikleri ve davranışlarıyla ilgili yapılan çalışmalara verilen Nobel Ödüllerine de değinseydik, liste çok daha uzun olurdu. **Arthur Compton** 1927'de elektronlar tarafından yayılan fotonlann görülmesi ve yorumlanması ile; **Clinton Davisson ve George Thomson** (JJ. Thomson'ın oğlu) 1937'de elektron dalgalarını kırmak için kristal

kullanması ile; **Wolfgang Pauli** 1945'de hiçbir iki elektronun aynı anda aynı devinim durumunda olmayacağını keşfetmesi ile; **Willis Lamb** 1955'de hidrojen atomundaki elektron enerjilerinin tam olarak ölçülmesi ile; **Polykarp Kusch** 1955'de elektronun manyetik özelliklerinin tam olarak belirlenmesi ile; **Robert Hofstadter** 1961'de protonların ve nötronların içini incelemek için elektronların kullanılması ile; **John Bardeen, Leon Cooper ve J. Robert Schrieffer** 1972'de süper iletkenlik teorisi (elektronların bazı maddelerdeki sürtünmesiz devinimi) ile; ve **Jerome Friedman, Henry Kendall ve Richard Taylor** 1990'da nükleonlardaki kuarkları göstermek için elektron ışınlarını kullanması ile bu listede yer alırdı.