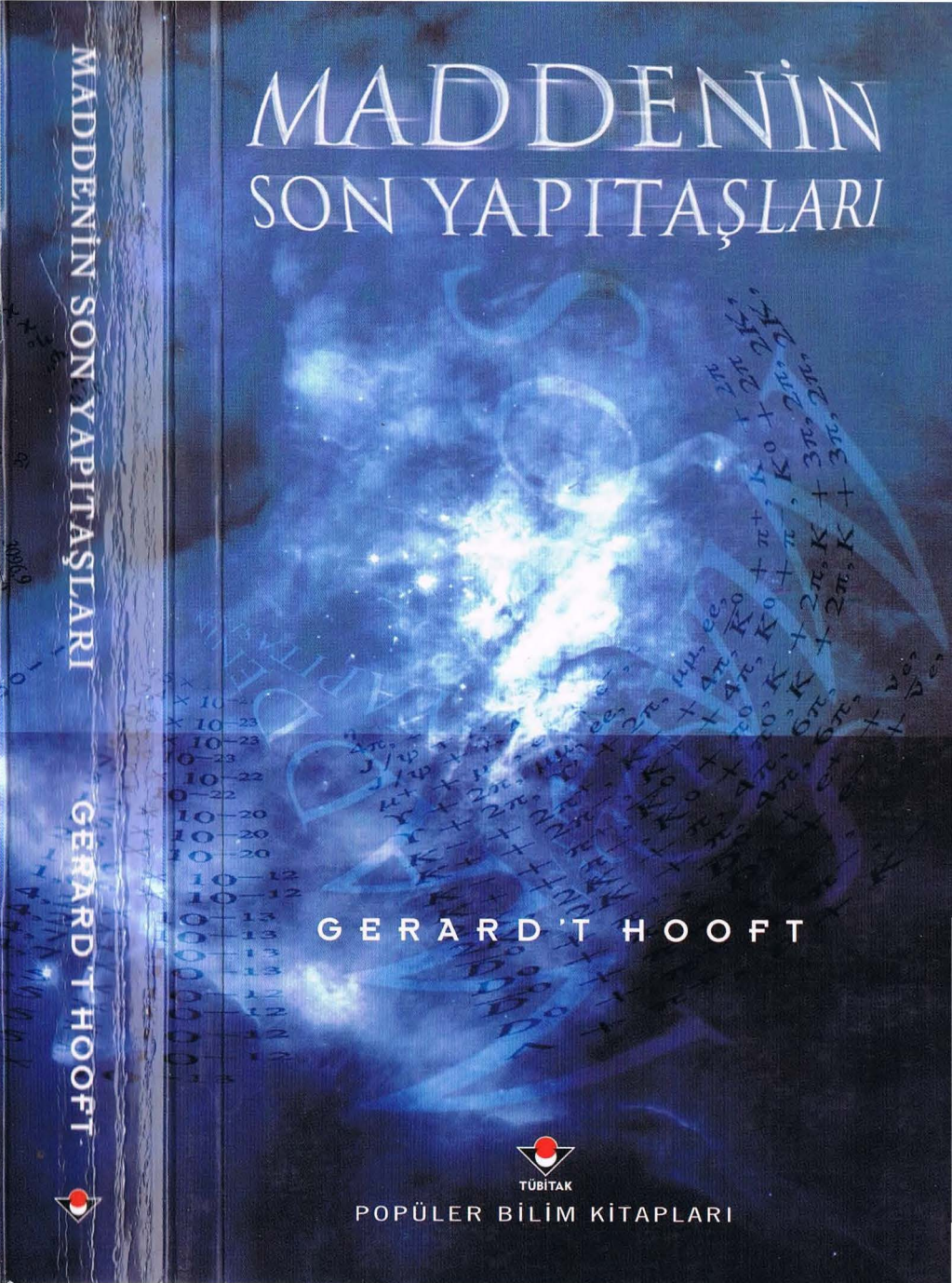
MADDENİN SON YAPITAŞLARI



GERARD 'T HOOFT

TÜBİTAK

POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

MADDENİN SON YAPITAŞLARI

GERARD 'T HOOFT

Maddenin Son Yapıtaşları

Gerard 't Hooft

TÜBİTAK
POPÜLER BİLİM KİTAPLARI

Maddenin Son Yapıtaşları
In Search of the Ultimate Building Blocks
Gerard 't Hooft
Çeviri: Mehmet Koca - Nazife Özdeş Koca
Türkçe metnin bilimsel danışmanı: Prof. Dr. Tekin Dereli

© Gerard 't Hooft, 1996
© Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu, 1999

Bu yapıtın bütün hakları saklıdır. Yazılar ve görsel malzemeler, izin alınmadan tümüyle veya kısmen yayımlanamaz. Türkçe yayın hakları Kesim Ajans aracılığı ile alınmıştır.

TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları'nın seçimi ve değerlendirilmesi TÜBİTAK Yayın Komisyonu tarafından yapılmaktadır.

ISBN 975 - 403 - 193 - 2

1. Basım Eylül 2000 (5000 adet)

Yayın Yönetmeni: Sedat Sezgen
Yayına Hazırlayan: Barış Bıçakçı
Teknik Yönetmen: Duran Akca
Grafik Tasarım: Cemal Töngür
Uygulama: İnci Karakul

TÜBİTAK
Atatürk Bulvarı No: 221 Kavaklıdere 06100 Ankara
Tel: (312) 427 33 21 Faks: (312) 427 13 36
e-posta: kitap@tubitak.gov.tr
İnternet: kitap.tubitak.gov.tr

Kılıçaslan Matbaacılık - Ankara

Maddenin Son Yapıtaşları

Gerard 't Hooft

Çeviri
Mehmet Koca
Nazife Özdeş Koca

TÜBİTAK POPULER BİLİM KİTAPLARI

Anneme

Babamın anısına

Bętteke'ye, Saskia'ya ve Ellen'e

ithaf edilmiştir.

İçindekiler

Önsöz 1

I. Bölüm 1
Küçükler Dünyasına Seyahat:
Kâğıt Kesme

II. Bölüm 5
Moleküllere ve Atomlara Doğru

III. Bölüm 13
Kuantumların Büyüsü

IV. Bölüm 27
Aşırı Hızlar

V. Bölüm 37
1970 Öncesi Temel Parçacıklar
Bahçesi

VI. Bölüm 55
Yaşam ve Ölüm

VII. Bölüm 63
Çılgın Kaonlar

VIII. Bölüm 75
Görünmez Kuarklar

IX. Bölüm 83
Alanlar mı Potin Bağları mı?

X. Bölüm 103
Yang-Mills Bonanza

XI. Bölüm 121
Süperiletken Boş Uzay:
Higgs-Kibble Makinesi

XII. Bölüm 135
Modeller

XIII. Bölüm 151
Güçlü Kuvvetlerde Renklenme

XIV. Bölüm 171
Manyetik Tekkutup

XV. Bölüm 181
Çingene

XVI. Bölüm 193
Standart Modelin İhtişamı

XVII. Bölüm 213
Anomaliler

XVIII. Bölüm 227
Aldatıcı Kusursuzluk

XIX. Bölüm 233
Nötrinoların Tartılması

XX. Bölüm 243
Büyük Çöl

XXI. Bölüm 251
Teknik-renk

XXII. Bölüm 259
Büyük Birleşme

XXIII. Bölüm 269
Süper-kütleçekimi

XXIV Bölüm 281
On Bir Boyutlu Uzay-Zaman

XXV. Bölüm 287
Süpersicim

XXVI. Bölüm 301
Kara Deliklere Doğru

XXVII. Bölüm 313
Henüz Var Olmayan Teoriler

XXVIII. Bölüm 319
En Küçükler Kuralının Egemenliği

Sözlük 329

Dizin 343

Önsöz: Bir özür dileme

En küçükler âleminde geçerli olan Doğa yasalarını çok iyi anlamadan, değil o âleme girmeye cesaret etmek onun hakkında konuşmak bile zordur. Çok küçük taneciklerin nasıl hareket ettiğini ve bunların diğer özelliklerini o âlemdeki kuvvetler belirler. Bu tanecikleri gerçekten gözleyip gözleyemeyeceğimiz ve gözlem biçimimiz de bu kuvvetlere bağlıdır.

Doğa yasaları karmaşık olduğundan gözlem yapmak kolay bir iş değildir. Bu alanda gittikçe daha fazla sayıda uzman karışık bir matematiksel dile sığınıyor. "Sıradan" bir insanın bu dili anlaması oldukça zordur. Fizik yasalarının kaya sertliğindeki mantığını gerçekten kavrayabilmek için matematikten vazgeçmemek gerekir. Bununla birlikte, biz fizikçiler, bütün güzel buluşlarımızda duyduğumuz hazzı bizi dinlemek isteyen herkesle paylaşma ihtiyacını duyarız. Ancak, bunu yaparken matematikten tamamen uzak durmamız önerilir. Bu nedenle, istemeyerek de olsa bu öneriyi yerine getirmeye çalışacağım.

Niyetim son yirmi beş yılda maddenin en küçük tanecikleri üzerine yapılmış olan araştırmaları bir

öykü diliyle anlatmak. Bu yirmi beş yılda şunu anladım ki, Doğa insanlığın bir bütün olarak başvurduğu bir zekâ testidir; oynamamız için yapılmış bir bozyaptır. Sık sık, elimizdeki parçalara çok iyi uyan, büyük ya da küçük, yeni parçalara rastlarız. Bu durumlarda hissettiğim zafer coşkusunu sizlerle paylaşmak istiyorum.

Öyleyse yapmam gereken şey matematiksel ifadeleri kolay anlaşılır bir dile çevirmektir. Bunu yapmak elbette mümkün. Ancak bazı teorileri ve tanımları doğrulayabilmek ya da bir kısmını dışlayabilmek için kullanılan genel kanıtları açıklamaya çalışırken resmin bir kısmı kaybolabilir. Sevgili okur, kanıtlarımın anlaşılır olmadığını düşünebilir ve bu yüzden beni suçlayabilirsin. Ancak beni mazur görmeni isteyeceğim. Çünkü matematiksel formülleri biraz sulandırmadan kolay anlaşılır bir hale getirmek her zaman olanaklı değildir.

Çoğu kez kesin bir açıklama yapmaya bile çalışmayacağım. Teorik fiziğe yabancı olan bir okur birçok anlatımımı kanıtsız olarak doğru kabul etmek zorunda kalabilir. O zaman yapılacak iş, bu konuya ait bilgilerin ayrıntılarına girmeden size kaba bir fikir vermek olmalı.

İlk dört bölüm moleküller, atomlar ve atom çekirdeklerine ait kabul edilmiş bilgilerin bir özetidir. Bu kitap, bu bilgileri sağlayan son derece heyacan verici araştırmaları özetleyerek vere-

cektir. Bu araştırmaların yapıldığı tarihlerde kitabın yazarı doğmamıştı bile; o yüzden bu konuyu bilim tarihçilerine bırakmayı yeğliyor.* Bu kitap o tarihlerden sonra ne olmuşsa onunla ilgilenecektir.

Son yirmi beş yılda temel parçacıklar hakkında bildiklerimiz öylesine gelişti ki bazı araştırmacılar bu araştırma dalının "sonuna" gelindiğine dair görüşler ileri sürmeye başladılar: tüm parçacıkların ve kuvvetlerin son teorisi anlamına gelen Her Şeyin Teorisi (HEŞET, İngilizcesinin kısaltması TOE). Her şeyi kapsayan böyle bir teori düşüncesi bile, yeteneklerimizin sınırsız olduğu ya da evrenimizin son derece karmaşık oluşunu hafife aldığımız anlamına gelmez mi? Bu konuda daha sonra bir şeyler söyleyeceğim. Kısaca söylemek gerekirse, HEŞET fikri sanıldığı kadar anlamsız olmayabilir.

Bu kitap, temel parçacıklar hakkında bildiklerimizin tarihsel bir özetini yapmak amacıyla yazılmadı. Böyle kitaplar var ve birçoğu oldukça iyi.** Her ne kadar okuyucuda öyle bir kanı uyandırsa

* Örneğin bakınız, A.Pais, *Inward Bound, Of Matter and Forces in the Physical World* (Fizik Dünyasındaki Madde ve Kuvvetlerin Alt Sınırı) (Oxford, Clarendon Press/New York, Oxford University Press, 1986)

** Örneğin bakınız, Robert P. Crease ve Charles C.Mann, *The Second Creation: Markers of the Revolution in Twentieth-Century Physics* (İkinci Yaratma: Yirminci Yüzyıl Fiziğinde Devrim Yapanlar (New York, Macmillan, 1986).

da parçacık fiziğine sistematik bir giriş yapmak niyetinde değilim.* Bazı okuyucuların isteklerini yerine getirmek maksadıyla kitabın sonuna bir de sözlük ekledim. Bu kitap, bu alandaki gelişmeleri kişisel olarak değerlendirmenin ötesinde bir amaç taşımaktadır. Herkes tarafından anlaşılabilir olduğunu umduğum sözcükleri kullanarak benim ve meslektaşlarının duyduğu heyecanı sizlerle paylaşmak istiyorum.

Kitapta adları geçen bilim adamları, maddenin en küçük parçacıklarına ait araştırmalarda şu veya bu şekilde en önemli rolü oynamış olanlardır. Onlara bilime katkılarından dolayı büyük hayranlık duymaktayım. Bazı isimleri atlamış veya yanlış yazmış olabilirim, bunun için şimdiden özür diliyorum.

Ulusal gururumu bir miktar ön plana çıkarırsam affedileceğimi umuyorum. Bu alanda ün yapmış bir hayli Hollandalı bilim adamı var ve bunların birçoğundan bahsedeceğim. Kendi rolümü olduğundan fazla göstermiş olmam kuşkusuz kolay bağışlanacak bir şey değildir. Bundan tamamen kaçınabileceğimi söyleyemem. Her şeyden önce temel parçacıklar kavramını kendi gözümle gördüğüm gibi açıklamayı planlıyorum. Neden derseniz, yakından bakı-

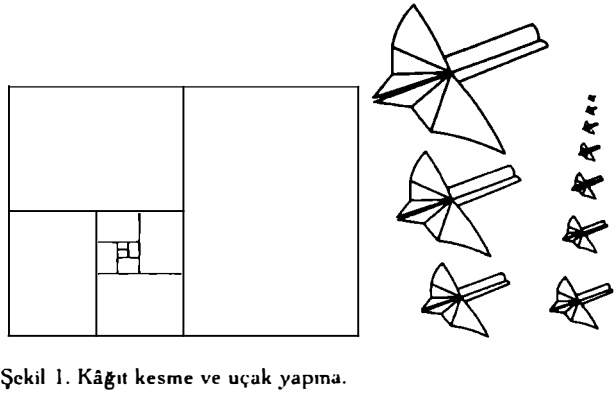
*Örneğin bakınız, Anthony Hey ve Patrick Walters, *The Quantum Universe* (Kuantum Evreni) (Cambridge University Press, 1987), ya da Leon M. Lederman ve David N. Schramm, *From Quarks to the Cosmos, Tools of Discovery* (Kuarklardan Kozmosa, Keşif Araçları (New York The Scientific American Library 1989)

lan şey büyük görünür. Bu ayrıntılı değerlendirmeyi yapmamı sağlayan fizik dünyasındaki konumuma pek çok insanın üzerimde bıraktığı güçlü etki olmadan ulaşamazdım. Bunların başında lise hocam Dr. W.P.J. Lignac ve dayım Prof. Dr. N.G. Van Kampen ve daha sonra tez hocam Prof. Dr. M.J.G Veltman gelir. Bunların her biri fiziksel dünyanın doğası hakkındaki görüşlerini benimle paylaştı ve benim görüşlerim bu görüşlerden hareket ederek ortaya çıktı. Konuşmalarından büyük zevk aldığım ve yeni buluşlarda büyük bir heyecan duymamı sağlayan son derece değerli fizikçiler de vardı.

Bu kitabı yazarken, tatillerde kendilerinden ziyade dizüstü bilgisayarımla ilgilendiğim halde ailem benden desteğini esirgemedi. Bu kitabın İngilizce çevirisini bitirdiğimi sandığım bir zamanda, bozuk İngilizcemin düzeltilmesinde Bayan Robin Mize bana çok yardımcı oldu.

Küçükler Dünyasına Seyahat: Kâğıt Kesme

Küçükler dünyasına yapacağımız seyahate, bildiğimiz fizik yasalarının uygulandığı ve çıplak gözle görebileceğimiz nesnelerle başlayalım. Büyükçe bir kâğıt parçası alın ve katlayarak bir uçak yapın. Kâğıdı iki eşit parçaya bölerek iki küçük uçak yapmayı da düşünebilirsiniz. Hatta kâğıdı biraz daha küçük parçalara ayırıp daha da küçük uçaklar yapabilirsiniz. Kâğıdın özellikleri ve katlayarak ondan uçak yapma kuralları değişmez. Sadece uçaklar gittikçe küçülür. Bununla birlikte, kâğıdı küçültmeye devam ederseniz uçak yapımı giderek zorlaşır. Başlangıçta işe ya-



Şekil 1. Kâğıt kesme ve uçak yapma.

rayan kâğıt parçalarından sonunda elinizde çok küçük parçalar kalır. Böylece kâğıdın "uçak yapılabilme" özelliği kaybolur.

Bir kova su alıp küçük kovalara boşaltmaya başladığımız zaman da benzer bir durumla karşılaşırız. Suyun fiziksel özellikleri, örneğin "yukarıdan aşağıya akma" özelliği, sonunda bir damladan daha az bir miktar kalıncaya dek değişmez. Kovayı sarsmadan damlaları yukarıdan aşağıya dökemezsiniz.

Oyuncak arabalarla ve bebeklerle oynayan her çocuk büyük şeylerin küçük boyutlarda da taklit edilebildiğini fark eder. Yazar Jonathan Swift, ünlü hikâyelerini bu kavram üzerine kurmuştur. Gulliver adlı bir maceraperest çok küçük insanların yaşadığı Lilliput ülkesine seyahate çıkar. Orada her şey çok küçüktür: Doğa, bitkiler ve hayvanların tümü küçük boyutlardadır. Kendisi orada bir dev gibi görülmektedir. Hatta, kraliyet sarayında

çıkan çok tehlikeli bir yangını işeyerek söndürür.

Başka bir seyahatte, mucizevi kuvvetler, Gulliver'i alışageldiği boyutlardan daha büyük insanların, diğer canlı ve cansızların bulunduğu Brobdingnag diye bilinen bir ülkeye getirir. Gulliver orada, Glumdalclitch adlı bir küçük kızın kucağında gezdirdiği bir cücedir. Sonunda, Gulliver kafesindeyken bir kartal tarafından kaldırılıp denize bırakılır. Sonra da normal boyuttaki denizciler tarafından kurtarılır. Denizciler Gulliver'in hikâyesini dinler ama inanmazlar.

Gulliver'e inanmamakta denizciler haklıdır. Ne kadar iyi anlatılmış olursa olsun bu tür masallar insanda şüphe uyandırır. Örneğin, biliyoruz ki küçük mumların alevleri neredeyse büyük mumların alevleri kadardır. Lilliput'daki mumların alevleri ne büyüklükteydi acaba? Düşündükçe insanın aklına daha fazla soru gelir: Lilluput ve Brobdingnag'daki yağmur damlaları ne büyüklükteydi? Bu iki ülkede su için geçerli olan fizik yasaları kendi dünyamızdaki yasalardan farklı mıydı? Sonunda fizikçi şu soruyu sorar: Bu yerlerde atomlar ne büyüklükteydi? Gulliver'in vücudundaki atomlarla o atomlar nasıl bir kimyasal tepkimeye girmişti?

Bu sorular karşısında hikâyeler inandırıcılığını kaybeder. *Gulliver'in Seyahatleri*'ndeki dünya gerçek olamaz, çünkü kitapta ölçek değiştiği zaman Doğa yasaları da değişir. Bu durum felaket filmlerinde bazen açık bir şekilde görülür. Örneğin bir

gelgit dalgası ya da yanan bir gökdelen ölçekli bir modelle taklit edilerek filme çekilir. Bu durumda en iyi sonuç, zaman için ölçekleme çarpanı, uzunluğun karekökü ile orantılı seçildiğinde elde edilir. Gökdelen 1:9 ölçeğinde yapılmışsa film gerçek hızının üçte biri oranında yavaş oynatılmalıdır. Böyle olduğunda bile, dikkatli bir göz filmde olan ile gerçek dünyada gözlenen arasındaki farkı ayırt eder.

Özetleyecek olursak, fizik dünyasını yöneten yasaların iki önemli özelliği vardır: Pek çok Doğa yasası ölçeği değiştirdiğiniz zaman değişmez, ama öyle olaylar vardır ki buna uymaz; yanan mum ve su damlası örneğinde olduğu gibi. Bu da şunu gösteriyor: Çok küçük cisimler dünyası normal dünyadan tamamen farklıdır.

II. Bölüm

Moleküllere ve Atomlara Doğru

Canlılar âleminde ölçek kuşkusuz önemli farklılıklar yaratır. Bir farenin anatomisi birçok bakımdan bir filin anatomisinin aynısıdır, ancak bir fare dik bir kaya parçasına herhangi bir zorlukla karşılaşmadan tırmanabildiği halde (kendi boyundan kat kat yüksek bir yerden düşmüş bile olsa fazla yaralanmaz) bir fil bu başarıyı gösteremez. Genel olarak, ister canlı, ister cansız varlıklar olsun cisimler küçüldükçe yerçekimi etkisi önemini yitirir.

Tekhücreli yaratıklara baktığımızda bunlar için yukarı ve aşağı kavramının anlamı olmadığını gö-

rürüz. Onlar için suyun yüzey gerilme kuvveti yerçekimi kuvvetinden çok daha fazla önemlidir. Örneğin, yüzey gerilimi, su damlasına kendi şeklini kazandıran kuvvettir. Tekhücreli yaratıkların boyutlarıyla karşılaştırıldığında, su damlaları oldukça büyüktür. Bu ölçekte yüzey geriliminin çok önemli olduğu apaçık.

Yüzey gerilimi, atom ve moleküllerin birbirlerini, Van der Waals kuvveti dediğimiz bir kuvvetle çekmelerinin bir sonucudur. Van der Waals kuvvetinin menzili çok kısadır. Daha kesin söylemek gerekirse, bir r uzaklığında kuvvetin şiddeti yaklaşık olarak $1/r^7$ ile orantılıdır. Bu şu anlama gelir: İki atom arasındaki uzaklığı yarıya indirirseniz birbirlerini çekme kuvveti, yani Van der Waals kuvveti 2 x 2 x 2 x 2 x 2 x 2 x 2 = 128 kat şiddetli olur. Atom ve moleküller birbirlerine çok yaklaştıkları zaman bu kuvvet sayesinde sıkıca bağlanabilirler.

Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) 1873'de Leyden'den mezun oldu ve yazdığı tezle ünlendi. Bu tez Felemenkçe yazılmıştı ve başlığı şöyleydi: "Over de continuïteit van de gas- en vloeistoftoestand" (Gaz ve Sıvı Hallerin Sürekliliği Üzerine). O zamanlar molekül ve atomların varlığı herkesçe kabul edilmiş değildi. Oysa Van der Waals, son derece küçük parçacıkları olan atom ve moleküllerin, uzayda belli bir hacmi işgal ettiği ve birbirlerinden yeteri kadar uzaklaştırıldıklarında

birbirlerini çekmeye başladıkları varsayımına dayanarak, sıvı ve gazların özelliklerinin çok iyi anlaşılabildiğini gösterdi. Bu çalışmadan çok etkilenen ünlü İngiliz fizikçi James Clerk Maxwell, bu çalışmanın birkaç araştırmacıyı "Kaba Felemenkçe"yi öğrenmeye teşvik ettiğini söylemişti.* Van der Waals 1910'da Nobel Ödülü'nü almıştı ama "Kaba Felemenkçe" kendisini hiçbir zaman uluslararası bir bilim dili olarak kabul ettiremedi. Eski çağlarda bilim dilleri Latince ve Yunanca'ydı, daha sonra Almanca, Fransızca ve İngilizce kullanıldı. Bazıları sevmese de günümüzde bütün bilimlerde İngilizce bilim dili olarak kullanılıyor.

Tekhücreli hayvanlar ile bitkilerin boyları mikrometre veya kısaca "mikron" olarak ölçülür; 1 mikron 1/1 000 milimetredir ve sıradan bir mikroskopta ayrıntıyla görülebilen en küçük büyüklüktür. Mikroplar âlemi çok ilginç, ama bu kitabın konusu değil. Küçükler dünyasına yaptığımız seyahatimize atom ve moleküllere varıncaya dek devam etmeliyiz. Bu noktada Van der Waals kuvveti yerini çok daha karmaşık olan kimyasal kuvvetlere bırakır.

Kimyacılar atomları, çapları birkaç angstrom olan hemen hemen küresel cisimler olarak görürler. Bir angstrom 1/10.000 mikron veya 10^{-10} metredir (bir metrenin on milyarda biri). Aslında bir

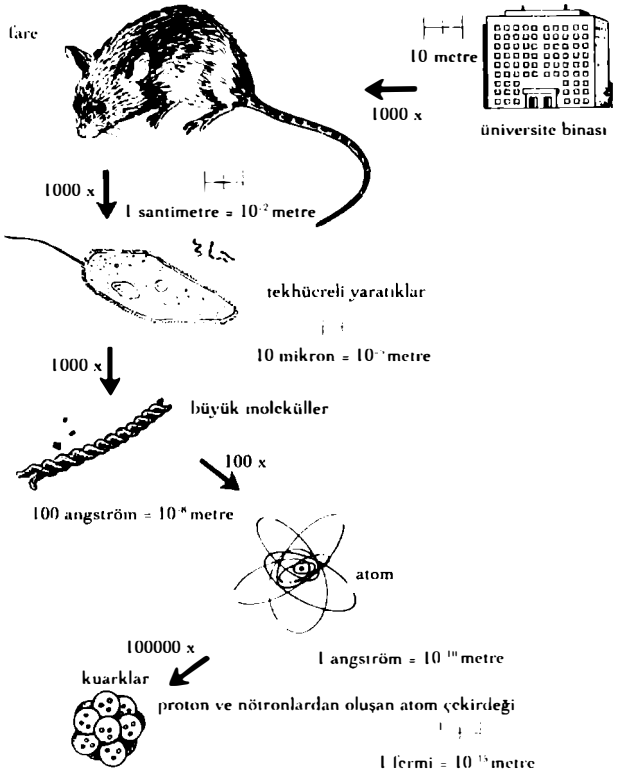
* Bakınız H.G.B. Casimir, *Haphazard Reality* (Rastlantılı Gerçek) (New York, Harper & Row, 1983)

atomun tüm kütlesi*, çekirdek adı verilen ve merkezde yer alan son derece küçük bir zerrede toplanmıştır. Bu konuya daha sonra döneceğiz.

Küçük mesafelerde atomlar arası kuvvetler son derece karışıktır; atomları, birbirlerine kanca ve halkalarla kenetlenmiş küçük cisimler olarak düşünebiliriz. Bu şekilde birden fazla atomun meydana getirdiği dayanıklı yapıya molekül denir. Örneğin, oksijen atomunu (O) ele alalım. Oksijen atomunun iki kancası vardır. Hidrojen atomunun (H) bir halkası vardır. Bir O ve iki H atomu, H_2O su molekülünü meydana getirmek üzere birbirlerine kenetlenir. H_2 hidrojen gaz molekülünde olduğu gibi iki halka birbirine geçebilir, aynı şekilde, O_2 oksijen gaz molekülünde ise kancalar birbirine geçer. Bununla birlikte bu tür bağlanmalar çok güçlü değildir.

Oksijen atomundaki iki kanca tam karşılıklı değil, aralarında 104 derece olacak şekilde yerleşmiştir. Diğer birçok atom için de benzer şeyler söylenebilir. Sonuç olarak, moleküller karmakarışık bir şekil oluşturur. En güzel yapıtaşlarından biri, üzerinde dört halkası bulunan ve birbirlerine bu halkalar aracılığı ile tutunan karbon atomudur. Canlıların çoğu molekülü, karbon atomları (C) zincirinden oluşmuştur.

* Kütle kavramına alışık olmayan bir okuyucu için şunu söyleyebiliriz: Dünya'daki cisimlerin kütleleri ağırlıklarına eşittir (kütleler de gram veya kilogram olarak ölçülür); aslında ağırlık, bir cismin Dünya tarafından yere doğru çekilme kuvvetidir. Bir uzay gemisindeki ağırlığınız neredeyse sıfır, ancak kütleniz Dünya'daki kütleniz ile aynıdır.

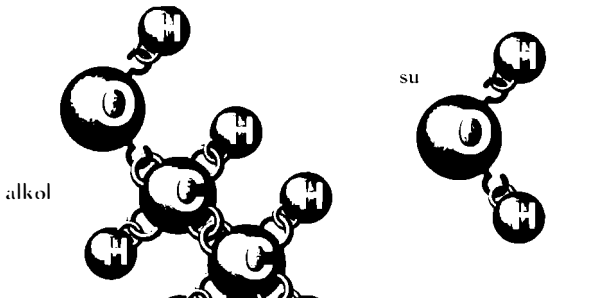


Şekil 2. Bağıl büyüklükler.

Yüzden fazla atom çeşidi vardır ve her bir atom kendine özgü bir kuvvet uygular. Bu kuvvetler atomdan atoma, az ya da çok, değişir. Yalnızca tek bir tür atomdan meydana gelmiş olan maddelere kimyasal element denir. "Atom" sözcüğü Yunanca "bölünemez" anlamına gelen ατομος sözcüğünden türetilmiştir ve "element" sözcüğünün kullanılıyor olması maddenin temel yapıtaşlarına ulaştığımız iz-

lenimini verir. Bu terimlerin icat edildiği on dokuzuncu yüzyılın ortalarında, gerçekten böyle olduğu sanılıyordu. Şimdi biliyoruz ki, bu bir hataydı. Çünkü atomlar parçalanabilir ve bu yüzden elementler gerçek anlamda temel parçacık değildir. Yanlış da olsa bu terimlere alışmış olduğumuzdan kullanmaya devam ediyoruz. Sakın insanların bundan ders aldığını sanmayın! "Temel parçacıklar" ifadesi de bu denli yakışıksızdır. Benzer şekilde, "modern müzik" ve "post-modern müzik" gibi ifadeler için ne demeli? Kuşkusuz bir zaman gelecek ve böyle bir terminoloji ürettiğimize pişman olacağız.

Atomları, kancalı ve halkalı küçük küreler olarak gösterdiğim resmi yeterince bilimsel bulmayabilirsiniz. Doğru, çünkü atomların birbirlerine bağlanma biçiminden söz ettiğimizde "kimyasal bağlanma kuvveti" terimini kullanırız. Bu kuvvetleri bu şekilde belirtmem tuhaf, çünkü bunların çok güzel bir özelliği var: kimyasal bağlanma kuvvetlerinden sorumlu olan Doğa yasaları tamamen biliniyor! Şimdi bu ifade size bir sürpriz gibi gelebilir. Gazeteler böyle bir devrimci buluştan hiç bahsetmedikleri halde, bütün kimya bitti ve artık yapacak bir şey kalmadı mı, diye sorabilirsiniz. Benim cevabım hayır olacaktır, çünkü tamamen bilinen yalnızca kimyasal bağlanma kuvvetlerinin arkasında yatan temel denklemlerdir. Maalesef, bu denklemlerden başlayarak yapılan tüm hesaplar öylesine karışık ki, yaklaştırım yöntemleri kullanmak zorunda



Şekil 3. Atomların halka ve kancalarla birbirlerine bağlanması.

kalıyoruz. Bu matematiksel yöntemlerin yeteri kadar hassas olduğunu söylemek kolay değil. En basit moleküller, örneğin su ve alkol molekülleri bile, sözünü ettiğimiz denklemleri kullanarak hesaplar yapmak yerine, bu maddelerle basit deneyler yapmak suretiyle daha iyi incelenebilir. Bugünlerde, matematiksel yaklaştırım yöntemleri oldukça gelişmiştir ve sonuçta bu yöntemler atomlar için yaptığımız halkalı ve kancalı küre benzetmesinin hiç de kötü bir benzetme olmadığını göstermektedir.

Aslında, halka ve kanca diye bir şey yok. Bir atoma küreye benzer bir görüntü veren, çekirdek etrafında dans eden elektrik yüklü elektronlardır. Elektron çok hafif bir parçacıktır. Kütlesi en hafif çekirdeğin (hidrojen atomunun çekirdeği) kütlesinin 1/1836'sı kadardır. Elektronun ve çekirdeğin yükleri birbirine zıttır; elektronlar, çekirdek tarafından güçlü bir şekilde çekildikleri halde, birbirlerini iterler. Bir atomdaki elektronların toplam

elektrik yükü ile çekirdeğin yükü eşitse atomun dengede olduğu söylenir. Bunun için genellikle birçok elektrona gerek vardır. O zaman atomun elektriksel olarak yüksüz olduğunu söyleriz.

Elektronları yöneten kuvvet gerçekte matematiksel olarak çok basittir; buna elektrostatik veya Coulomb kuvveti diyoruz. Atom, "kimyasal bağlanma" diye adlandırdığımız bu olağanüstü özellikleri elektronlara borçludur. Bunun nedeni elektronların hareket yasalarının çok özel olmasıdır. Elektronların hareketleri "kuantum mekaniği" ile tam olarak açıklanır. Kuantum mekaniği dediğimiz teori yirminci yüzyılın başlarında tamamlandı. Paradoks içeren, anlaşılması ve açıklanması güç fakat heyecan verici çok güzel ve devrimci bir teoridir. Bugünün teorik fiziğini kuantum mekaniği olmadan düşünmek imkânsızdır ve kuantum mekaniği teorik temel parçacık fiziğinin tam merkezinde bulunmaktadır. Kuantum mekaniği hakkında daha sonra pek çok şey söyleme gereğini duyacağım, ancak bu teoriyi kullanarak kimyasal bağlanma kuvvetlerini açıklama girişiminde bulunmayacağım (aslında mümkün).

Yalnız elektronlar değil, atom çekirdeği ve hatta bir bütün olarak atomlar da kuantum mekaniği yasalarına uyar. Bununla birlikte, çekirdek ve atomlar elektronlardan daha ağır olduğundan uygulamanın sonuçları daha az ilgi çekicidir. Kimyacı, atomları, yalnızca çok yaklaştıklarında birbirlerine çok özel kuvvetler uygulayan sıradan bilardo topları gibi düşünebilir.

III. Bölüm

Kuantumların Büyüsü

Yirminci yüzyıl fiziği tam olarak 1900 yılında, Alman fizikçi Max Planck'ın fizikçilerin yıllarca üzerinde uğraştıkları bir problemin kabul edilebilir bir çözümünü bulmasıyla başladı. Problem, belli bir sıcaklığa kadar ısıtılmış bir cisimden yayılan ışıkla ve daha soğuk cisimlerden düşük şiddette yayılan daha yumuşak kızılötesi ışıkla ilgilidir.

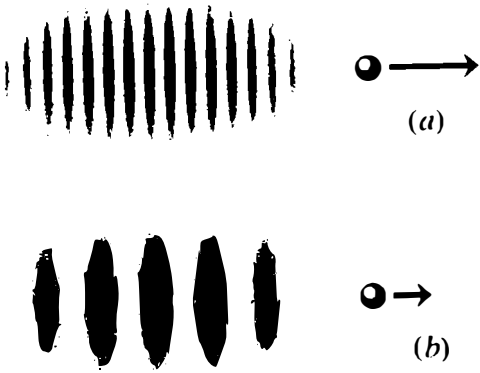
Tüm bu ışınımın elektromanyetik bir kaynaktan kaynaklandığı herkes tarafından kabul edilmişti. Üstelik, elektromanyetik dalgalar için Doğa yasaları zaten biliniyordu. "Termodinamik" adı veri-

len, sıcaklık ve soğukluk için geçerli olan yasalar da biliniyordu ya da bilindiği sanılıyordu. Ancak, söz konusu ışınımın şiddetini hesaplamak için termodinamik yasalarını kullandığımızda, sonuçtan hiçbir anlam çıkmıyordu. Böyle bir hesap bize, çok uzak morötesinde aşırı derecede ışınım salımı olması gerektiğini göstermektedir. Kuşkusuz olup biten bu değildir. Olan şu: Işınının şiddeti belirli, tipik bir dalga boyunda en yüksek değere ulaşırken, bu dalga boyundan daha büyük ve küçük değerlerde sıfıra doğru yaklaşır. Bu tipik dalga boyu ışınım yapan cismin mutlak sıcaklığı ile ters orantılıdır (mutlak sıcaklık, –273°C'den başlayan bir sıcaklık ölçeğiyle tanımlanır). Bir cisim 1000°C'de akkor halindedir; bu sıcaklıkta cisim görünür ışık yayar.

Planck, ışınımın büyüklükleri belli paketler halinde yayıldığını ileri sürmüştü. Böyle bir paketteki ya da kuantumdaki enerji miktarı, dalga boyuyla ters yayılan ışınımın frekansı ile de doğru orantılıdır. Formül şu:

$$E = h \times \upsilon$$

Burada E, bir paketin enerjisini, υ, frekansını ve h, Planck sabiti adı verilen Doğa'nın yeni, temel bir sabitini göstermektedir. Planck bu yeni formülü uygulayarak ısı ışınımının şiddetini hesapladığında, sonucun gözlemlerle tamamen uyuştuğunu gördü.



Şekil 4. Dalgalara karşılık gelen parçacıklar. Fazla enerjili parçacıklar (a), az enerjili parçacıklara (b) göre daha kısa dalga boylu ve hızlı salınım yapan dalgalardan meydana gelir.

Çok geçmeden, 1905'de, Einstein bu teoriyi daha radikal bir şekilde formüle etti: Einstein'ın iddiasına göre, ısınmış cisimler ışınımı sadece enerji paketleri halinde yaymakla kalmaz, bu ışınım aynı zamanda Planck enerji paketinin tamsayı katıdır. Bu fikirden hareket ederek Fransız fizikçi Louis-Victor de Broglie şöyle bir hipotez ortaya attı: Salınım yapan herhangi bir şey belirli bir enerjiye sahip olmakla kalmaz, enerjisi olan herhangi bir şey de uzayın belirli bir bölgesinde, Planck denkleminde belirtildiği gibi, υ frekansı ile salınım yapan bir 'dalga' gibi hareket eder. O halde bundan sonra ışık ışınlarının kuantumlarına temel parçacıklardan biri gözüyle bakılacaktır: foton. Diğer bütün parçacık türlerinin kendi kuvvet alanlarıyla ilgili olan

değişik salınım dalgaları vardır. Bu konuya daha sonra döneceğiz.

Bir atomdaki elektronların Danimarkalı ünlü fizikçi Niels Bohr tarafından keşfedilen ve incelikle ele alınan acayip davranışları, de Broglie dalgalarıyla açıklanabiliyordu. Daha sonra, 1926'da, de Broglie dalga teorisini kesin matematiksel denklemlere dönüştüren kişi Erwin Schrödinger oldu. Tüm bu hesapların uygulamasından çıkan sonuç çok şaşırtıcıydı ve hemen arkasından tüm küçük cisimlerin davranışının, yeni keşfedilen "kuantum dalga denklemleri" ile tam olarak belirlendiği anlaşıldı.

Kuantum mekaniğinin çok iyi iş gördüğü konusunda şüphe edecek hiçbir şey yok. Bununla birlikte, çok özel bir problemle karşı karşıyayız: Bu denklemler gerçekte ne anlama gelmektedir? Bunlar neyi tanımlamaktadır? 1687'de Isaac Newton, gezegenlerin Güneş etrafındaki hareketlerini formüle ettiğinde, bu denklemin ne anlama geldiği herkesçe çok iyi biliniyordu. Gezegenler uzayda kolayca bulunabilen konumlarda bulunurlar; belirli bir andaki konum ve hızlarını biliyorsak, zaman içinde bu konum ve hızların nasıl değişeceğini kesin olarak belirleyebiliriz.

Ancak elektronlar için durum tamamen farklı. Onların davranışı bir giz perdesi arkasına saklanmış gibidir. Öyle görülüyor ki elektronlar aynı anda değişik yerlerde "bulunabiliyor". Elektronlar

sanki bulut gibi, dalga gibi davranıyorlar. Bu hiç de ihmal edilecek bir şey değil. Yeterince hassas deneyler yapılırsa, tek bir elektronun, birbirlerinden oldukça uzak yörüngeler üzerinde aynı anda hareket ediyormuş gibi davrandığı gösterilebilir. Bu ne anlama gelmektedir?

Niels Bohr, bu soruya anlaşılır bir yorum getirebildi ve günümüzde fizikçilerin çoğu bu yorumu doyurucu buluyor. Buna kuantum mekaniğinin "Kopenhag yorumu" denilmektedir. Elektronun bir x ya da bir y noktasında bulunduğunu söylemek yerine bir elektronun durumundan söz edebiliriz. Yani elektron yalnız "x" ya da "y" durumunda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda "kısmen x ve kısmen y" durumunda da bulunabilir. O halde tek bir elektron, birçok yerde aynı anda bulunabilir. Kuantum mekaniği böyle bir elektron durumunun zaman ilerledikçe nasıl değişeceğini kesin olarak tayin eder.

Bir "dedektör" herhangi bir yerde bir parçacık bulunup bulunmadığını tayin etmede kullanılan bir alettir. Dedektör bir parçacık sayacı, ya da hassas bir selüloit parçası, hatta insan gözü olabilir. Bir parçacık bir dedektöre girdiğinde durumunda değişiklik olur. Eğer parçacığın durumunun daha sonra nasıl değişeceğini incelemek istemiyorsak, parçacığın yolunun üzerine dedektör koyabiliriz. Kuantum durumunu biliyorsak dedektörün parçacığı kaydedeceği x noktasındaki olasılığı hesapla-

yabiliriz. Eğer parçacık o noktada kaydedilmişse, o andan* itibaren parçacık "x" konumunda bulunmaktadır.

Kuantum mekaniğinin yasaları çok kesin bir şekilde formüle edilmiştir. Öğrenmek istediğimiz herhangi bir şeyi nasıl hesaplayacağımızı biliyoruz. Ancak sonuçlarımızı "yorumlamak" istediğimizde, tuhaf, temel bir belirsizlikle uğraşmak durumundayız: yani son derece küçük parçacıkların bazı özelliklerini aynı anda tam olarak belirtemiyoruz. Örneğin, bir parçacığın hızını tam olarak belirlediğimizde onun nerede olduğunu tam olarak bilemeyiz. Ya da bir parçacığın konumunu tam olarak belirleyebiliriz ama hızını belirleyemeyiz. Eğer bir parçacığın "spin"i varsa (kendi ekseni etrafında dönüyorsa), o zaman dönme yönü (spin ekseninin yönü) büyük bir hassasiyetle belirlenemez.

Bu belirsizliğin nereden kaynaklandığını basit terimlerle açıklamak kolay değildir. Ancak günlük yaşamdan da verebileceğimiz benzer örnekler vardır. Bir sesin frekansı ile bu sesi işittiğiniz an arasında, benzer bir karşılıklı belirsizlik ilişkisi var-

* Bir parçacığın gözlenmesi nedeniyle başka bir kuantum durumuna "sıçraması" bazen kuantum mekaniğinin özel bir aksiyomu olarak ifade edilir. Gerçekte bu sıçrama, dedektörde meydana gelen karmaşık bir etkileşmenin çok ciddi bir şekilde anlatımından başka bir şey değildir. Mikroskopik bir olaya bağlı olarak (tek bir parçacığın hareketinde olduğu gibi) "gözlem" gerçekte şu anlama gelir: "Dedektör"de (bir iğne ya da bir ışık belirtici) çok sayıdaki molekül değişik durumlara doğru hareket ettirilmiştir.

dır. Bir müzik aleti akort edilmek istenirse, bir notayı bir süre dinleyerek, titreşmekte olan bir ses çatalı ile karşılaştırmak gerekir. Çok kısa notaların kolayca tanınabilen bir frekansı yoktur; bu yüzden, örneğin, çok kısa notalar çalınıyorsa aletin iyi bir şekilde akort edilip edilmediği kesin bir şekilde anlaşılamaz. Bu söylediklerim özellikle pes notalarda geçerlidir. Burada sesin, müzikle herhangi bir ilişkisi olmayan temel bir özelliğinden bahsediyorum. Diyebilirsiniz ki, çok iyi bir müzisyen çok kısa notalar çalındığında bile müzik aletinin iyi ya da kötü akort edildiğini anlayabilir. Ancak bunun nedeni müzisyenin müzik aletini, frekansları daha iyi ayırt edilebilen armonik sesler yoluyla akort edebilecek kadar iyi tanımasıdır.

Kuantum mekaniği kuralları, küçükler âlemindeki tüm doğal fiziksel olaylara aynı şekilde uygulandığı takdirde geçerlidir. Virüslere, bakterilere hatta insanlara bile bu kuralları uygulayabilirsiniz. Bununla birlikte, bir cisim büyüdükçe ve ağırlığı arttıkça, kuantum mekaniği ile hareketin normal "klasik" yasaları arasındaki farkı görmek giderek güçleşir. Teorinin bu kendine özgü ve önemli özelliğine "holizm" diyeceğim.Yalnız bu, bazı filozofların kullandığı "holizm" sözcüğü ile aynı anlama gelmemektedir. Onlar "holizm"i, "bir bütün kendi parçalarının toplamından daha fazladır" anlamında kullanmaktadır. İyi hoş da, fizik bize bir şey öğretmişse, o da gerçeğin bunun tam tersi olduğudur:

Çok sayıda parçacıktan oluşan bir cismi tam olarak anlamak için, onu meydana getiren parçaların (parçacıkların) özelliklerini bilmek ve toplamı doğru yapmak gerekir; ancak, kuantum mekaniğinde bu toplamayı yapmak hiç de kolay değildir. Evet, holizm'den kastım, bütün, parçaların toplamıdır, ancak yalnızca parçaların tümü aynı yasalara uyuyorsa toplama yapabilirsiniz. Örneğin, Planck sabiti h =6,626075... x 10^{-34} jul-saniyedir ve her yerde, her şey için tam olarak aynı değere sahiptir ve evrensel bir sabittir.

Kuantum mekaniği kuralları öylesine iyi işlemektedir ki, onları yadsımak mümkün değildir. Werner Heisenberg, Paul Dirac ve diğer pek çok fizikçinin keşfettiği dâhiyane yöntemlerle, genel kurallar daha da geliştirilip güçlendirildi. Bununla birlikte, Einstein ve Erwin Schrödinger gibi kuantum mekaniğine katkı yapmış diğer öncüler, bu yoruma karşı daima ciddi itirazlarda bulundular. Evet iyi çalıştığı kesin, ancak elektron tam olarak nerede, x noktasında mı, yoksa y noktasında mı? Kısaca, gerçekte nerede? Formüllerimizin arkasına saklanan gerçek nedir? Eğer Bohr'a inanırsak böyle bir gerçeği aramak anlamsız. Üzerinde durmamız gereken gerçekler, kuantum mekaniğinin kendi kuralları ve dedektörler kullanılarak yapılan gözlemlerdir.

Günümüzde çoğu araştırmacı Bohr'un pragmatik yaklaşımı ile aynı görüştedir. Tarih kitapları

Bohr'un Einstein'ın yanlış olduğunu kanıtladığını yazar. Ben dahil diğer fizikçiler Einstein yorumunun uzun vadede geri dönebileceği görüşündeyiz: Kopenhag yorumunda eksik kalan bir şey olmalı. Einstein'ın özgün itirazı çürütülmüş olabilir. Buna karşın tüm Evren'in kuantum mekaniği (ki burada ölçümler hiçbir zaman tekrarlanamaz) yazılmaya kalkılırsa ve kuantum mekaniği yasaları ile kütleçekim yasaları uzlaştırılmaya çalışılırsa, problemler tekrar ortaya çıkacaktır. Bu hikâyede fazla ileri gittim (XXVIII. Bölüm'de bu konuya tekrar döneceğim). Kuantum mekaniği atom ve molekülleri doğru bir şekilde anlatmak bakımından mükemmel bir teoridir.

Kuantum mekaniğinin görünmez gizi bir hayli çelişkiye neden oldu; ciltleri aşan anlamsız iddialar öylesine çoğaldı ki, aklı başında bir fizikçi bunlara yanıt vermek için nereden başlayacağını bile kestiremez hale geldi. Kimileri, "yeryüzündeki hayatın bir kuantum sıçramasıyla başladığını", "özgür iradenin" ve "bilincin" kuantum mekaniğinden ileri geldiğini iddia ediyor. Hatta doğaüstü olayların bile kuantum mekaniğiyle ilgisi olduğunu ileri sürenler var.

Korkarım ki tüm bunların altında yatan düşünce, "anlaşılmaz" olayları (örneğin doğaüstü olayları), "anlaşılmaz" nedenlere (örneğin kuantum mekaniğine) bağlama girişimidir. Ancak kuantum mekaniği hiç de anlaşılmaz bir şey değildir, tersine, te-

ori bunlara karşı savlar öne sürer. Daha önce açıkladığım anlamda, kuantum mekaniğinin "holistik" özelliği göstermektedir ki, herhangi bir hesaptan elde edilen sonuç, daima bir şans ya da olasılıktır. Bir deney birçok kez tekrarlanırsa sonuçların belli bir yüzdesi bir sonuç, başka bir yüzdesi de başka bir sonuç olacaktır. Deney ne kadar çok tekrarlanırsa, bu yüzdeler kuantum mekaniği yasaları kullanılarak yapılan hesaplarla daha iyi uyuşacaktır. "Hayatın başlaması", "özgür irade dışında karar verme" ya da bazı "doğaüstü deneyim" gibi "deneyler" birçok kez tekrarlanabilir olsaydı, o zaman kuantum mekaniği bunlar için de geçerli olurdu. Elbette hiçbir insanoğlu bu tür olayları temel parçacık yapıtaşlarından hareket ederek "hesaplayamaz", eğer hesaplayabilirse, bu olaylar da "deneysel gözlemler" olarak kabul edilecek demektir.

Büyük ölçekli fiziksel olayları, bunları meydana getiren kuantum mekaniksel kısımlarından hareket ederek tam olarak hesaplama girişimini engelleyen şey, hafife alınamayacak kadar fazla miktarda parçacığın bulunmasıdır. Burada şunu vurgulamak gerekir ki, kuantum mekaniğinin belirsizlik bağıntılarını saf dışı bırakacak ne bir beyin hücresi ne de kimyasal bir tepkime mevcuttur. Bir beyin hücresi "doğaüstü" bir hesap yapmaya çalışırsa, şüphe yok ki bir yığın hata yapacaktır. Yapılan hesapların sonunun kuantum belirsizlik bağıntılarıyla tam olarak uyumlu olması gerekir. Hatta aynı şey hayatın

başlangıcı için de geçerlidir. Dünya üzerindeki hayat, belki de, son derece olanaksız bir rastlantı sonucunda oluşmuştur. Ama bunun kuantum mekaniği ile hiçbir ilişkisi yok. Birçok kimse, bilinmeyene ve mistisizime duyulan bazı derin arzuları unutmama eğiliminde ve buradaki boşluğu kuantum mekaniğinin doldurduğunu sanıyor. Benim için böyle değil. Kuantum mekaniği, atomik kuvvetler ve hareketler için mantıksal olarak uyumlu bir teoridir. Fizikçiler, cehaletle savaşmayı bir görev bilmeliler. Ama bazılarımız belki de bunun farkında değil. Örneğin, Niels Bohr, ünlü Yin-Yang sembolünü kuantum mekaniğinin bütünlük ilkesini anlatmak için kullandı. Bu sembolü kullanmaktaki amacı, parçacığın bazen dalga, bazen de gerçek bir parçacık gibi davrandığını göstermekti. Bazılarının inanmamızı istediği gibi Niels Bohr, meditasyonun ve birilerinin göbeğini seyretmenin kuantum mekaniğinin derinliğine anlaşılmasına yardımcı olduğunu söylemek istememişti.

Sanırım kuantum mekaniğinin özü şöyle özetlenebilir: İlke olarak, Doğa yasaları hakkındaki güncel anlayışımızdan hareketle, herhangi bir deneyin sonucunun iki etkene dayandığını söyleyebiliriz. Birinci etken, kuvvetlerin ve yapıların çok iyi bilinen hesaplarıdır ki, bunlar, Güneş sistemindeki gezegenlerin hareketlerini betimleyen Isaac Newton yasalarının sonuçları kadar kesindir. İkinci etken tamamen matematiksel olarak tanımlanmış, kont-

rol edilemez istatistiksel keyfilikleri kapsar. Parçacıklar, önce verilen bir olasılık dağılımını, daha sonra başka bir dağılımı izler. Olasılıklar da hesaplanabilir, tek bir deneyin hesaplanan olasılıklardan sapma ihtimali ve buna benzer şeyler de hesaplanabilir.

Olasılıklar ve istatistik, fizikçiler tarafından bile oldukça yanlış anlaşılmaktadır. Örneğin bazıları, olasılık hesapları verildiğinde bazı olayların tüm olasılıklarının "paralel dünyalar" şeklinde ortaya çıkacağı teorisini ileri sürmüştür. Bu teoriye kuantum mekaniğinin "birçok dünya" yorumu adı verilmektedir. Bunun ne kadar çılgınca bir şey olduğunu "evreni kuantize" etmeye çalıştığımız zaman anlarız. Bana göre bunların hepsi anlamsız. Tüm kuvvetlerin tam teorisi denen HEŞET'i tam olarak anladığımızda, öngörülerimizdeki istatistiksel öğenin zamanla tümden kaybolacağı şüphesi bence en makul olanıdır. Bu şunu göstermektedir: şimdiki teorilerimiz (henüz) bilmediğimiz ve anlamadığımız değişken özellikleri ve kuvvetleri içermektedir. Böyle bir yoruma "gizli değişkenler hipotezi" denilmektedir.

Bu görüşü birtakım matematiksel modellerle açıklamak için çok sayıda deneme yapılmıştır. Ancak bu denemelerden başarılı bir sonuç alınamayınca, fizikçiler böyle bir durumda her zaman yaptıkları şeyleri yaptılar: Böyle bir teorinin mümkün olmadığını kanıtladılar. Albert Einstein, Nathan

Rosen ve Boris Podolsky, kâğıt üzerinde düşünülen bir "hayali deney" (Gedankenexperiment) tasarladılar; kuantum mekaniğinin bu hayali deney için öngörüsünün, herhangi bir makul gizli değişken teorisi ile elde edilemeyeceğini savundular. Daha sonra, İrlandalı fizikçi John Stewart Bell, bu sonucu matematiksel bir teorem şeklinde vermeyi başardı. Bell'e göre devre anahtarları ve dişlilerle, ya da buna benzer şeylerle yola çıkarsanız içinde kuantum mekaniksel olayları göreceğiniz bir evreni hiçbir zaman oluşturamazsınız. Böyle bir şeye "karşıt teorem" diyoruz.

Gizli değişkenler hipotezine hâlâ inandığımı sezinlemiş olabilirsiniz. Kuşkusuz, Evren'imiz dâhiyane bir şekilde inşa edilmiştir ve Einstein, Bell ve diğerlerinin akla yakın buldukları bazı varsayımların yanlış olduğu bir gün ortaya çıkacak. Bu nasıl olacak bilmiyorum. Ne olursa olsun, benim için gizli değişkenler hipotezi kuantum mekaniği bilincimi rahatlatmak için halen en iyi yoldur. "Karşıt teoremleri" soruyorsanız onların birçoklarıyla karşılaşacağız ve akıbetlerini tartışacağız.

IV. Bölüm

Aşırı Hızlar

Bir atomdan yaklaşık 100.000 kez daha küçük olan ve atomun merkezinde bulunan zerreye atom çekirdeği denir. Çekirdek, kütlesiyle, hatta ondan daha önemlisi elektrik yükü ile, meydana getirdiği atomun bütün özelliklerini belirler. Günlük yaşamımızı biçimlendiren atomlar birbirleriyle etkileşerek kimyasal maddeleri meydana getiriyor olsalar da, çekirdeğin çok sağlam olması nedeniyle atomlar değiştirilemezlermiş gibi görünürler. Bir çekirdek çok sağlam olmasına karşın yine de parçalanabilir. Atomlar yüksek hızlarda birbirleriyle çarpıştırıldıkları zaman, iki çe-

kirdek birbirine çarpabilir, daha sonra ya parçalara ayrılabilir ya da birleşip yeni bir çekirdek meydana getirebilirler. Aynı zamanda çekirdek-altı parçacıklar ortaya çıkar. Yirminci yüzyılın birinci yarısının yeni fiziği bu parçacıkların sırlarıyla dolu.

Diyeceksiniz ki elimizde kuantum mekaniği var, bunu her yere uygulayamaz mıyız? Sorun nedir? Gerçekte, kuantum mekaniği atomaltı parçacıklara uygulanabilir, ancak bu uygulamanın ötesinde başka şeyler de var. Bu parçacıkların birbirlerine uyguladığı ve atom çekirdeğini bir arada tutan kuvvetler öylesine güçlü ki, bu parçacıkların çekirdek içindeki ve dışındaki hızları yaklaşık 300.000 kilometre/saniye olan ışık hızına yaklaşır. Bu hızlar hesaba katıldığında, on dokuzuncu yüzyıl fizik yasalarının ikinci kez değiştirilmesi yani Einstein'ın özel görelilik teorisinin dikkate alınması gerekir.

Bu teori de Einstein'ın 1905'de yayımladığı bir çalışmanın sonucuydu. Einstein'ın başlangıç noktası şuydu: Dış uzaydaki bir laboratuvarda yapılan bir deney, laboratuvarın ne kadar hızlı ve hangi yönde hareket ettiğine bağlı olmayan bir sonuç verir. Bu laboratuvarda ışık hızını ölçmeye çalışırsanız, bu hızın laboratuvarın hızına ve hareket yönüne bağlı olmadığını görürsünüz. Acayip bir şey! Diyelim ki bir uzay gemisinin hızı 50.000 kilometre/saniye. Uzay gemisinde ışığın hızının bir yönde 350.000 kilometre/saniye'ye çıkacağını, öbür yönde ise 250.000 kilometre/saniye'ye düşeceğini bek-

leyebilirsiniz. Dik yönlerde ise normal 300.000 kilometre/saniyelik hızdan biraz daha farklı olabileceğini tahmin edebilirsiniz.

Böyle bir deneyin yapılabilmesi için hassas saatlere ve çubuk metrelere ihtiyaç vardır. Bunun da ötesinde, değişik saatlerin birbirlerine göre ayarlanması gerekir. Saatler ve çubuk metrelerin laboratuvarın hızından pekâlâ etkileneceği, Hollandalı Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) ile ondan bağımsız olarak ve hatta birkaç yıl daha önce (1889'da) İrlandalı George Francis Fitzgerald tarafından öne sürülmüştü. Hollanda'daki pek çok kimse Lorentz'i başka bir özelliğiyle tanır: Hollanda'da Zuyderzee'de, bir baraj inşaatını değerlendirmek amacıyla kurulmuş olan bir komiteye başkanlık ediyordu. Kuzey Denizi'ni Zuyderzee'den ayırmak için 32 kilometrelik bir önleme barajı yapılması gerekiyordu. Gelgit hareketlerinden dolayı su akımlarının hesaplanması zorunluluğu ortaya çıkmıştı. O zamanlar bilgisayarların olmadığı göz önünde tutulursa, Lorentz'in hesaplarının ne denli hassas olduğu anlaşılabilir.

Lorentz, hareketli saat ve çubuk metrelerin kendi hareketlerinden etkileneceklerini düşünmüştü. Bu etkilerin bir sonucu olarak, hareket ve hareketsizliğin göreli kavramlar olduğunu tam olarak anlayan kişi Einstein oldu. Işık hızının ölçülebildiği öyle mutlak durgun ya da mutlak gözlem çerçevesi diye bir şey yoktur.

Göreli olması gereken başka şeyler de ortaya çıktı. Bu teoride kütle* ve enerji de hıza bağlıdır. Aynı şey elektrik ve manyetik alan şiddetleri için de geçerlidir. Einstein bir parçacığın kütlesinin onun içerdiği enerjiyle orantılı olduğunu keşfetti. Bir parçacığın "durgun enerjisi" parçacığın durgun kütlesi ile orantılıdır:

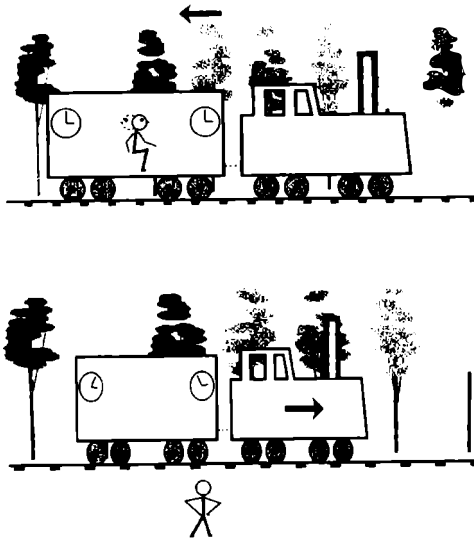
$$E = M \times c^2$$

Burada E parçacığın enerjisi, M kütlesi ve c evrensel bir sabit olan ışık hızıdır.

Bu denklem, ışığın hızının çok büyük olması nedeniyle her parçacığın çok fazla miktarda enerjisi olduğunu söylüyor. İşte bu yüzden görelilik teorisi fizik açısından (aslında herkes açısından!) çok önemli oldu. Görelilik teorisi "holistik" ise, yani her şey ve herkes için görelilik yasası geçerliyse, o zaman teori kendi içinde de uyumludur. Yüksek hızlarda giderken sadece saatler yavaşlamaz, aynı zamanda canlı ya da cansız tüm süreçler ışık hızına yaklaşıldığında teorinin öngördüğü şekilde davranır. İnsan kalbi biyolojik bir saattir; dolayısıyla ışık hızına yakın bir hızla hareket eden bir uzay gemisinde Dünya'dakine nazaran daha yavaş çalışacaktır. Bu garip durum Einstein tarafından ortaya koyulan ve "ikizler paradoksu" olarak bilinen olaya yol açar. Bu paradoksa göre tek yumurta ikizlerinden Dünya'da kalanı ile ışık hızına yakın bir hızda

* M kütlesi Newton'un $F = M \times a$ yasasında tarif edildiği gibidir. Çağdaş fizik hocaları kütleyi hızdan bağımsız olarak tanımlamayı yeğlerler.

seyahat edeni farklı şekilde yaşlanır.* Bununla birlikte ikizlerden hiçbiri içinde bulunduğu laboratuvarın mutlak hızını saptayamaz.



Şekil 5. Einstein'ın özel görelilik teorisine göre uzay ve zamanı algılama biçimimiz, nerede bulunduğumuza ve nasıl hareket ettiğimize bağlıdır. Hızlı bir trende bulunan bir kişi (a), saatlerini ayarlamış ve trenin uzunluğunu ölçmüş olabilir, ancak dışarıdaki bir gözlemci için (b), ağaçlar arasındaki uzaklıklar değişmediği halde, trenin uzunluğu biraz kısalmakta ve saatler aynı zamanı göstermemektedir.

* İkizlerden uzay aracında olanı, yani aracın motorunun ivmesini hissedeni, diğerinden daha genç kalır. Diğerinin Dünya'nın çekim alanını hissetmesi olayı genel görelilik teorisi çerçevesinde ele alınmalıdır.

Elektromanyetik kuvvet

Elektrik kuvveti, yüklü iki parçacığın birbirini ittiği (yükleri aynı işaretli ise) ya da birbirini çektiği (yükleri zıt işaretli ise) kuvvettir.

Manyetik kuvvet, elektrik yüklü bir parçacığın manyetik alandan geçerken üzerine etki eden kuvvettir. Bir manyetik alan, bir sarmalın sarımlarında dolaşan elektron örneğinde olduğu gibi, elektrik yüklü parçacıklar hareket ettiğinde ortaya çıkar.

Elektrik kuvveti ve manyetik kuvvet birbiriyle ilişkilidir. James Clerk Maxwell, 1873'de, elektrik ve manyetik kuvvet alanlarının uyduğu eksiksiz denklemleri bulmayı başardı ve böylece günümüzde elektromanyetizma denilen bir "birleşik teori"yi elde etmiş oldu.

Elektromanyetik kuvvetin temel parçacıklara etki ederken gösterdiği özellikler şu şekilde sıralanabilir.

- Kuvvet, elektrik yükü dediğimiz şey üzerine evrensel bir şekilde etki eder.
- Kuvvet çok büyük bir menzile sahiptir (manyetik alanların yıldızlararası etkisi vardır).
- Kuvvet oldukça zayıftır. Kuvvetin şiddeti, elektron yükünün karesinin $2hc$'ye (2 çarpı Planck sabiti çarpı ışık hızı) bölümüne eşittir. Bu oran yaklaşık olarak 1 : 137,036'ya eşittir.
- Bu kuvvetin "taşıyıcısı", durgun kütlesi sıfır, spini 1 olan ve foton denilen bir parçacıktır.* Fotonun kendisinin elektrik yükü yoktur.

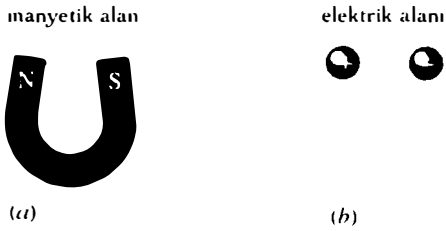
Spin kavramı bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

Kütleçekimi

Kütleçekimi, 1915'de Einstein tarafından ayrıntılı yapısı bulunan ve bu yapının uzay ve zaman dokusunun eğriliğine bağlı olduğu gösterilen çok temel bir kuvvettir. Bununla birlikte bugün bile kütleçekimi yasalarını kuantum mekaniği ile nasıl bağdaştıracağımızı bilmiyoruz (kütleçekimi kuvvetinin zayıf olduğu durumlar hariç).

- Kütleçekimi kuvveti doğrudan doğruya bir parçacığın kütlesine etki eder.
- Kuvvet son derece uzun bir menzile sahiptir (Evren'in bilinen en uzak bölgelerine kadar etkisi görülebilir).
- Kütleçekimi kuvveti öylesine zayıftır ki, iki temel parçacık arasındaki karşılıklı kütleçekimi kuvvetini deneysel olarak ölçmek belki de hiçbir zaman mümkün olmayacaktır. Bizim bu kuvveti hissetmemizin tek nedeni kuvvetin toplam oluşudur: (Dünya'daki) tüm parçacıklar (vücudumuzdaki) tüm parçacıkları aynı yönde çeker.
- Kuvvet taşıyıcısı "graviton"dur. Graviton her ne kadar deneysel olarak bulunmadıysa da, kuantum mekaniği önermelerinden hareket ederek kütlesinin sıfır ve spininin 2 olduğunu biliyoruz.

Kuvvetlerin genel bir kuralı vardır: Kuvvet taşıyıcısı çift spinli ise aynı işaretli yükler birbirlerini çeker ve zıt işaretli yükler birbirlerini iter. Spin (elektromanyetizmada olduğu gibi) tek ise, bunun tersi doğrudur.



Şekil 6. Maxwell denklemlerine göre çizilen manyetik alan çizgileri (a) elektrik alanı çizgileri (b) ile aynı desene sahiptir.

Einstein bu yüzden kütleçekimi yasalarının da görelilik ilkesine uydurulması gerektiğini çok hızlı bir şekilde algıladı. Hatırlayacaksınız, kütleçekiminin küçük cisimler üzerinde önemli bir rolü yoktur. Atomaltı parçacıklar söz konusu olduğunda kütleçekimi son derece zayıftır. Bu nedenle bizim hikâyemizde kütleçekiminin fazla bir yeri olmayacaktır (bu son derece temel olan ve merak uyandıran kuvvetten bu kitabın sonlarında tekrar bahsedeceğiz). Bununla birlikte, Einstein'ın karşılaştığı problem son derece küçük parçacıklar arasındaki diğer kuvvetleri anlamak bakımından da önem kazanacaktır. Bu yüzden şimdi onun on yıl uğraştıktan sonra bulduğu çözümü açıklayacağım.

Görelilik ilkesini kütleçekimi kuvvetine uygulamak için ilkenin şu şekilde genişletilmesi gerekirdi: Laboratuvarınızın mutlak hızının saptanmasının imkânsız olmasının yanı sıra, kütleçekimi kuvvetlerinin etkisi sonunda bu hızda meydana gelecek değişmeleri ayırt etmek de imkânsız olmalıdır.

Einstein, kütleçekiminin uzay ve zamana yaptığı etkinin, bir miktar ıslaklığın düz bir kâğıt parçası üzerindeki etkisi ile aynı olacağı sonucuna vardı: Kütleçekimi uzay zamanı eğer. Ortaya çıkan eğriler ve kıvrımlar düzleştirilemez. Eğri uzayların matematiği günümüzde biliniyor. Ancak, Einstein zamanında böylesine soyut ve hayali matematiksel kavramları fizik yasalarını formüle etmek için uygulamaya kalkmak tamamen yeni bir şeydi. O yüzden Einstein'ın bu konuları öğrenmesi yıllar aldı. Yetmiş beş yıl sonra, günümüzde fizikçiler ileri matematikle flört etmeye iyice alıştılar. Yalnız bugün bile problem sadece soyut matematikle uğraşmak değil; çoğu zaman en zor olanı, doğru matematiksel denklemleri ve formülleri bulmaktır. Bir kere denklemleri bulursak onun karışık kısımlarını ayıklar ve bilgisayar kullanarak problemi çözebiliriz. Ama denklemler nerede?

Einstein'ın kütleçekimi teorisine genel görelilik teorisi denir. Bu konuya daha sonra tekrar döneceğiz, çünkü teori diğer temel kuvvetler teorilerine bir örnek oluşturuyor ve atomaltı parçacıklardan çok daha küçük cisimler kütleçekimi kuvveti karşısında yeniden duyarlı hale geliyor. Parçacıkların ve kuvvetlerin son teorisini anlamak açısından kütleçekimi temel olacaktır. Ancak biz önce atomaltı parçacıkları ele alacağız. Onları anlamak için, içinde kütleçekimi kuvveti olmayan özel görelilik teorisi yeterli olacaktır.

V. Bölüm

1970 Öncesi Temel Parçacıklar Bahçesi

Çok küçükler âlemine yaptığımız seyahat bizi atomaltı parçacıklara getirdi. Atom çekirdeği ve içindeki parçacıkları kısaca tanıttıktan sonra, bunlara göre daha kolay parçalanabilir ve nispeten daha iri parçacıklarla ilgileneceğiz.

Çekirdek etrafında "büyük uzaklıklarda" dönen elektronlar da küçük ve son derece sağlam parçacıklardır. Şimdi sizi, 1970 öncesi bilim adamları gözüyle çekirdeğin içerisine bakmaya davet ediyorum. 1970'li yılları önemli bir dönem olarak görüyorum. Bununla birlikte, 1970 yılını seçmemin bir

nedeni de, o yıl Hollanda'da Utrecht Devlet Üniversitesi'nde genç bir doktora öğrencisi olarak temel parçacıklar fiziği ile tanışmamdır.

Buraya kadar söz ettiğim konular (ve bundan sonra sözünü edeceklerimin büyük bölümü), teorik fizik öğrencileri için temel konulardı. Atom çekirdeğinin yapısı hakkında da çok şey biliniyordu. Çekirdek, iki cins temel yapıtaşından oluşmuştur: protonlar ve nötronlar. Proton (Yunanca πρῶτος = ilk) ismini en basit atom çekirdeği olan hidrojen atomu çekirdeğinin yalnızca bir proton içermesi olgusundan alır. Proton bir birim pozitif elektrik yükü taşır. Nötron, protona ikiziymiş gibi benzer: Kütlesi protonun kütlesine hemen hemen eşit, spinleri aynıdır, ancak nötronun elektrik yükü yoktur yani yüksüzdür.

Bu parçacıkların kütleleri mega-elektron-volt ya da kısaca MeV birimi cinsinden ifade edilir. Bir MeV (10^6 eV), tek yüklü bir parçacığın (örneğin bir elektron ya da bir proton) 10^6 (bir milyon) voltluk bir elektrik potansiyel farkından geçerken kazandığı hareket enerjisi miktarıdır. Bu enerji kütleye de çevrildiği için bir temel parçacığın kütlesi belirtilirken MeV biriminden yararlanılır.

Çoğu atom çekirdeğinde protondan bir miktar daha fazla nötron bulunur. Çok küçük bir çekirdeğin içerisine tıkıştırılan protonlar benzer elektrik yükleri taşıdıkları için birbirlerini oldukça kuvvetli bir şekilde iterler. Ancak elektromanyetik kuv-

vetten çok daha güçlü bir kuvvet vardır ki protonları çekirdek içerisinde sıkıca birbirine bağlar: buna güçlü kuvvet (çekirdek kuvveti) denir.

Işık (bakınız III. Bölüm) elektromanyetik bir olaydır ve "foton" şeklinde kuantize olmuştur. Fotonlar tüm elektromanyetik etkileşmenin "taşıyıcısı" olarak davranırlar. Benzer şekilde güçlü kuvvetin de kendi kuantumları vardır. Güçlü kuvvetle ilgili olan kuantum parçacığının özelliklerini Japon fizikçi Hideki Yukawa (1907-1981) ortaya çıkardı; daha sonra bu parçacıklara pion denildi. Pionlarla fotonlar arasında çok önemli bir fark vardır. Pion belirli bir "kütleye" sahiptir. Durgun halde kütlesi daima yaklaşık 140 MeV'dir (bakınız Tablo 1). Çok hızlı hareket ederse kütlesi de artar.* Buna karşılık fotonun durgun kütlesinin sıfıra yaklaştığı söylenir. Bununla fotonun kütlesinin sıfır olduğunu söylemek istemiyoruz, sadece fotonun hiçbir zaman durgun olamayacağını belirtmek istiyoruz. Durgun kütlesi sıfıra yaklaşan tüm parçacıklar gibi foton da kendine özgü 300.000 kilometre/saniye'lik ışık hızıyla hareket eder; pion bu hıza hiçbir zaman ulaşamaz. Çünkü bunun için piona sonsuz kinetik enerji vermek gerekir. Foton açısından kütle kinetik enerji olarak değerlendirilebilir.

Pion, proton ve nötrondan hafif, elektrondan ağırdır (bakınız Tablo 1). Üç cins pion vardır: Biri artı, diğeri eksi elektrik yüklü, üçüncüsü ise yük-

* IV. Bölüm'deki ilk dipnota bakınız.

Tablo 1. *1970'e kadar bilinen ve ömürleri 10^{-20} saniyeden uzun olan temel parçacıklar.*[a]

Adı	Simgesi	Kütle (MeV)	Yük	Spin	Yaşam süreleri (saniye)	Asal bozunum kipleri	S,	I_3[b]
Foton	γ	0	0	1	∞	kararlı		
Leptonlar ($L = 1$, $B = 0$):								
Elektron	e^-	0,5109990	–	$\frac{1}{2}$	∞	kararlı		
Müon	μ^-	105,6584	–	$\frac{1}{2}$	$2{,}1970 \times 10^{-6}$	$e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$		
e-nötrinosu	ν_e	~ 0	0	$\frac{1}{2}$	$\sim \infty$	kararlı		
μ-nötrinosu	ν_μ	~ 0	0	$\frac{1}{2}$	$\sim \infty$	kararlı		
Mezonlar ($L = 0$, $B = 0$):								
Artı pion	π^+	139,570	+	0	$2{,}603 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$	0,	1
Eksi pion	π^-	139,570	–	0	$2{,}603 \times 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$	0,	−1
Nötr pion	π^0	134,976	0	0	$0{,}84 \times 10^{-16}$	2γ	0,	0
Artı kaon	K^+	493,68	+	0	$1{,}237 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$; $\pi^+ + \pi^0$; 3π	1,	$\frac{1}{2}$
Eksi kaon	K^-	493,68	–	0	$1{,}237 \times 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}_\mu$; $\pi^- + \pi^0$; 3π	−1,	$-\frac{1}{2}$
Uzun-K	K_{Uzun}	497,7	0	0	$5{,}17 \times 10^{-8}$	$3\pi^0$; $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$	± 1,	$\mp\frac{1}{2}$
Kısa-K	$K_{\text{Kısa}}$	497,7	0	0	$0{,}893 \times 10^{-10}$	$2\pi^0$; $\pi^+ + \pi^-$	± 1,	$\mp\frac{1}{2}$
Eta	η	547,5	0	0	$5{,}5 \times 10^{-19}$	3π; 2γ	0,	0

Baryonlar ($L = 0$, $B = 1$):

Proton	p	938,2723	+	$\frac{1}{2}$	∞	kararlı	0,	$\frac{1}{2}$
Nötron	n	939,5656	0	$\frac{1}{2}$	887	$p + e + \bar{\nu}_e$	0,	$-\frac{1}{2}$
Lambda	Λ	1115,68	0	$\frac{1}{2}$	$2{,}63 \times 10^{-10}$	$p + \pi^-$, $n + \pi^0$, $p + e^- + \bar{\nu}_e$	-1,	0
Sigma-artı	Σ^+	1189,4	+	$\frac{1}{2}$	$0{,}80 \times 10^{-10}$	$p + \pi^0$; $n + \pi^+$	-1,	1
Sigma-sıfır	Σ^0	1192,5	0	$\frac{1}{2}$	$7{,}4 \times 10^{-20}$	$\Lambda + \gamma$	-1,	0
Sigma-eksi	Σ^-	1197,4	–	$\frac{1}{2}$	$1{,}48 \times 10^{-10}$	$n + \pi^-$, $n + e^- + \bar{\nu}_e$	-1,	-1
Ksi-sıfır	Ξ^0	1314,9	0	$\frac{1}{2}$	$2{,}9 \times 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^0$	-2,	$\frac{1}{2}$
K-eksi	Ξ^-	1321,3	–	$\frac{1}{2}$	$1{,}64 \times 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^-$, $\Lambda + e^- + \bar{\nu}_e$	-2,	$-\frac{1}{2}$
Omega-eksi	Ω^-	1672,4	–	$1\frac{1}{2}$	$0{,}82 \times 10^{-10}$	$\Lambda + K^-$; $\Xi^0 + \pi^-$; $\Xi^0 + e^- + \bar{\nu}_e$	-3,	0

[a] Her bir *lepton* ve *baryon*un antiparçacıkları da vardır. Parçacık ve antiparçacıkların kütleleri aynı, ama elektrik yükleri ile B ve L kuantum sayıları (daha sonra açıklanacak) birbirinin zıddıdır. Yüksüz mezonların antiparçacıkları kendileridir, oysa π^+ ile π^- ve K^+ ile K^- birbirlerinin antiparçacığıdır. Bir antiparçacık, parçacık sembolü üzerine konan bir çizgi ile gösterilir. (Parçacıkların kütle ve ömürleri 1994 listesine göre düzeltilmiştir.)

[b] S (acayiplik) ve I_3 (izospin) simgeleri V. Bölüm'ün sonunda açıklanmıştır.

süzdür. Proton ve nötronlar yeterli enerjiyle birbirlerine çarptıklarında çoğu kez pionlar ortaya çıkar. Bu, şöyle bir olayla karşılaştırılabilir: Herhangi bir maddeyi ısıttığınızda atomlar birbirlerine sık sık çarpacak biçimde titreşir. Bu durumda atomlar ışık, yani foton yaymaya başlar. Atomların 10.000'de biri kadar olan atom çekirdekleri de aynı şeyi yapabilir. Sert bir şekilde sallandığında çekirdekten pionlar yayılır.

Pionun keşfi kolay olmadı. Pion fikri, bilim adamlarının bu tür parçacıkları yapay bir şekilde elde edemedikleri bir zamanda (1935) ortaya atıldı. Bununla birlikte, bilim adamları Evren'in uzak bölgelerinde Doğa'nın cömertçe sağladığı atomaltı parçacıkları inceleme olanağını buldular: "kozmik ışınlar". Kozmik ışınların "sis odası" denen bir aygıtta iz bıraktığı biliniyor ve bu izler incelenerek parçacıkların özellikleri belirlenebiliyordu. Gerçekten de Yukawa'nın öngördüğü parçacıkların kütlesi ile uyumlu olan bir parçacık bulundu. Kütlesi elektron ve proton arasında olduğu için buna (Yunanca μεσος = orta) mezon denildi. Yukawa da öngördüğü parçacığa "mezon" adını vermişti. Ancak arada önemli bir fark vardı: Deneysel olarak gözlenen parçacık güçlü etkileşime girmediğinden Yukawa'nın öngördüğü pion bu olmayabilirdi. Bugün bu parçacığa müon diyoruz ve μ harfi ile gösteriyoruz. Çünkü başka açılardan da bakıldığında uyuşmazlık can sıkıcı olmaya başlamıştı. Bugünler-

de ise "mezon" sözcüğünü yalnız pionlar ve ilgili parçacık türleri için kullanmaktayız.

Artık bugün uyuşmazlığın nedenini ve müonun kozmik ışınlarda niçin ilk parçacık olarak göründüğünü iyi biliyoruz. Atmosferin üst katmanlarındaki atomlar uzaydan gelen çok yüksek enerjili atomlarla çarpışır. Orada hemen çok sayıda pion ortaya çıkar ve bunlar Yukawa teorisine tamamen uygundur. Ancak Yukawa'nın tahmin edemediği şey pionların kararlı olmayışıdır: Yüksüz pionlar fotonlara bozunur. Elektrik yüklü her pion saniyenin on milyonda birinden daha az bir sürede bir müon ile bir *nötrino*ya (parçacık bahçesinin başka bir elemanı; bakınız Tablo 1) bozunur. Nötrino genellikle gözlenemeden kaçar. Ama müonlar atmosferin alt katmanlarına kadar ulaşabilir ve hatta yerin yüzlerce metre altında bile gözlenebilir. Müonlar güçlü etkileşim yapmadıkları için atmosferden geçebilir, bir kısmı da toprak içinde bir miktar ilerleyebilir.

Tüm bunlar açıklığa kavuştuğunda, Isidore I.Rabi* müonun keşfine bilim adamlarının gösterdiği tepkiyi şu soruyla veciz bir şekilde dile getirdi: "Bunu kim ısmarladı?" Bugünkü temel parçacık fiziği anlayışımıza dayanarak bile müonu "ısmarlamak" ya da öngörmek gerçekten mümkün olmazdı.

* Rabi, bir manyetik alandaki atom ve moleküllerin birçok özelliklerini incelemek için kullanılan manyetik rezonans yöntemini keşfedenlerden biridir. Rabi aynı zamanda Cenevre'deki Avrupa atomaltı araştırma laboratuvarının (CERN) kurucularındandır.

Durum ne olursa olsun, hiç kimse müonun kütlesinin nasıl hesaplanacağını söyleyen geçerli bir teoriyle karşımıza çıkmış değil (müonun kütlesi elektron kütlesinin yaklaşık 200 katıdır).

Öngörülmeyen başka parçacıklar da vardı. Atmosferin yüksek katmanlarında keşfedilenler yalnız pionlar değildi. Kaonlar pionlara göre ağır olmalarına karşın, bazı bakımlardan onlara benzer. Bunların diğer parçacıklarla birlikte nasıl ele alınacağı Amerikalı fizikçi Murray Gell-Mann ve Hollandalı Abraham Pais ve başkalarının öncü çalışmalarını gerektiriyordu. Akıl almaz bir şekilde, kütleleri 500 MeV civarında olan ve elektrik yükü olmayan değişik parçacık türleri ortaya çıktı. Bu parçacıklar birçok şekilde üretilebilir ve değişik yollarla bozunurlar. Bunlar K_{Uzun} ve $K_{Kısa}$ gibi iki farklı cins parçacık olarak ortaya çıktı ve başlangıçta böyle olacakları belli değildi. Gelecek bölümde, bu parçacıkların niçin bu denli özel olduklarını açıklayacağım.

Bu son derece küçük parçacıkların dikkate değer bir özelliği, bir eksen etrafında dönebilmeleridir. Tıpkı tenis ya da bilardo topları gibi kendi etraflarında döndükleri için spinleri olabilir. Ancak tenis ve bilardo topları ile parçacıklar arasında önemi bir fark vardır. Spin (ya da daha açık söylenirse, kabaca kütle, yarıçap ve hızın çarpımına eşit olan açısal momentum), Planck sabiti bölü 2 π'nin bazı katları olarak ölçülebilir. Kuantum mekaniği-

ne göre herhangi bir cismin spini, yukarıdaki birimin tam sayı ya da tam sayı artı yarım katı olması gerekir. Her bir parçacığın toplam spini sabittir, ancak spinin yönü sabit değildir.

Örneğin elektronun spini $\frac{1}{2}$'dir. Böyle olduğunu Hollandalı iki doktora öğrencisi Samuel Goudsmit (1902-1978) ve George Uhlenbeck (1900-1988) gösterdi ve 1927 yılında tezlerini bu konu üzerine hazırladılar. Elektron kadar küçük parçacıkların spinlerinin olduğunu söylemek cesurca bir fikirdi. Önceleri bu fikir şüphe ile karşılandı. Çünkü "elektronun yüzeyinin" ışık hızının 137 katı bir hızla hareket etmesi gerekiyordu. Bugünlerde böyle itirazlar tamamen unutulmuş durumda. Çünkü elektronun yüzeyi diye bir şey söz konusu değil.

Kütlesiz oldukları için fotonların ve nötrinoların dönme eksenleri hareketlerinin doğrultusuna paraleldir. Diğer parçacıklar herhangi bir yönde dönebilir. Aslında spini sıradan sözcüklerle anlatmak oldukça zor. Yukarıda sözünü ettiğim özel durum hariç, kuantum mekaniğine göre dönme ekseninin yönünü tam olarak belirlemek imkânsızdır. Çok büyük ve hızlı dönen cisimlerin dönme yönlerini daha kesin biçimde belirlemek mümkündür.

Spinleri tam sayılı olan parçacıklara "bozon", tam sayı artı yarım spinli parçacıklara ise "fermiyon" denir. Tablo 1'deki spin değerlerine bakarak "lepton" ve "baryon" dediğimiz parçacıkların fermiyon, foton ve mezonların da bozon olduğunu

görebilirsiniz. Fermiyonlar birçok bakımdan bozonlardan oldukça farklı davranır. Kendi küçük uzaylarında bulunmayı isterler. Aynı türden iki fermiyon aynı noktada bulunamaz; öyle hareket denklemleriyle belirlenirler ki daima birbirleriyle aynı noktaya gelmeyecek şekilde hareket ederler. İlginç olanı şu ki, böyle bir şey için herhangi bir kuvvet gerekmez. Fermiyonlar arasında itici ya da çekici kuvvetler olabilir. Fermiyonların her birinin değişik bir "durum"da bulunma özelliğine "Pauli dışarlama ilkesi" denir. Elektronlar fermiyondur (spini $\frac{1}{2}$). Her bir atom bir elektron bulutu tarafından çevrilmiştir. İki atom birbirlerine çok yaklaşırsa, elektronlar, iki bulut birbiri içine girmeyecek biçimde hareket eder. Sonuçta itici bir kuvvet doğar. İki elinizi birbirine vurduğunuzda ellerinizin birbirinin içinden geçmediğini görürsünüz. Bunun nedeni elinizdeki elektronların Pauli dışarlama ilkesine uymasıdır.

Fermiyonların aksine, bozonlar ortak hareket ederler ve aynı yerde bulunmayı severler. Örneğin bir lazer aynı dalga boyuna sahip ve aynı doğrultuda hareket eden fotonlardan meydana gelmiş bir ışık demetidir. Çünkü fotonlar bozondur. Spinleri tam sayı olan parçacıkların ortak özelliklerine daha sonra tekrar döneceğiz.

Temel parçacıklar ailesinin uymak zorunda olduğu oyunun başka bir kuralı şudur: Her parçacığın antiparçacığı (zıt ya da karşıt parçacık) vardır.

Parçacıkların spini ve kütlesi antiparçacıklarıyla tıpatıp aynı, ancak elektrik yükleri ile Tablo 1'de S, I_3, L ve B gibi harflerle gösterilen sayıları zıt işaretlidir. Bunları kısaca açıklayacağım. Örneğin π^+ ile π^- zıt parçacıklardır. Tıpkı K^+ ile K^- gibi. Öte yandan Σ^+ ile Σ^- birbirinin karşıtı değildir (her ikisi de $B = 1$ değerine sahip, kütleleri de tam olarak birbirine eşit değil). Bu son parçacıkların antiparçacıklarından açık bir şekilde bahsetmedik (tablodaki dipnota bakınız). π^0, η parçacıkları ve γ fotonu antiparçacıklarıyla aynı oldukları için bu kuralın dışında kalırlar.

Tıpkı bitkiler ve hayvanlar gibi, gözlenen parçacıklar da cinslere ve ailelere ayrılır. Fotondan başka leptonlar ve hadronlar da var. Hadronlar ayrıca mezonlar ve baryonlar olarak ikiye ayrılır. Bu sınıflandırma parçacıklar arasındaki çeşitli kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Karşılaşacağımız üç çeşit "kuvvet" sıra ile "güçlü kuvvet", "elektromanyetik kuvvet" ve "zayıf kuvvet"tir. Şunu da eklemiş olayım ki, "kuvvet" dediğimiz zaman bunun parçacıkların hareketlerine etki eden bir şey olması gerektiğini kastetmiyoruz. Birbirlerinin kimliklerini değiştirmek de dahil, ne şekilde olursa olsun parçacıklar birbirlerini etkilediklerinde bir "kuvvet" söz konusudur. Parçacıklar birbirlerini uzaktan etkileyebilirler; bir ara-parçacık değiş tokuşuyla bu olay meydana gelir. Bu ara-parçacıklara kuvvetin "taşıyıcısı" denir. Bu noktada söyle-

diklerimin biraz garip gelebileceğini itiraf etmeliyim. Bu konu matematiksel bir dille çok daha iyi ifade edilebilirdi. Sık sık yakınmamı hoşgörün. Şu anda anlattığım şeyler matematiksel denklemlerin sonuçlarıdır. Birlikte ele alındığında denklemler gerçekte benim anlatımımdan çok daha fazla anlam ifade eder.

Şimdi tekrar parçacık tablosuna dönelim. Leptonlar (Yunanca λεπτος = hafif, zayıf, çelimsiz) güçlü kuvvetten etkilenmeyen parçacıklardır. Zayıf kuvveti hissederler ve elektrik yüklü olanlar aynı zamanda elektromanyetik kuvvetin etkisi altında kalırlar. Birçok diğer parçacıktan daha hafiftirler (ancak daha sonra bu ailenin ağır bir üyesi bulunmuştur). Bildiğimiz kadarıyla leptonların spinleri $\frac{1}{2}$'dir. Bu şu demektir: Leptonlar bir eksen etrafında çok yavaş hızlarla döner. En iyi bildiğimiz lepton elektrondur. Bunlar en hafif elektrik yüklü parçacıklar oldukları için, tüm ağır ve pozitif elektrik yüklü atom çekirdekleri yeteri sayıda elektronu, neredeyse otomatik olarak toplarlar ve kendi elektrik yüklerini nötrleştirirler. Bu yüzden normal maddede çok sayıda elektron vardır. Örneğin bir metal, elektrik akımını iletme özelliğini çok sayıdaki elektronlarının serbestçe dolaşma özelliğine borçludur.

Nötrinolar da leptondur. Diğer parçacıklarla sadece zayıf kuvvet aracılığıyla etkileştikleri için onları yakalamak oldukça zordur. Bir nötrino binler-

ce yıldız ve gezegen içerisinden hiç yavaşlamadan ve yönünü değiştirmeden geçip gidebilir.

Hadronlar (Yunanca αδρος = güçlü, kuvvetli) güçlü kuvveti hissederler. Bu yüzden yakınlarındaki bir hadrona karşı çok duyarlıdırlar. Denebilir ki hadronlar leptonlardan çok "büyüktür". Aralarındaki uzaklık yaklaşık bir fermiden (10^{-13} cm) daha küçük olan iki hadron birbirlerinin hareketini etkiler. Bir başka deyişle etkileşirler. Bu söylenenler leptonlar için hiç de doğru değil. 1970'e gelindiğinde hadronların iç yapılarının oldukça karmaşık olduğu yeterince açıktı. Oysa leptonlar "noktasal parçacık" olarak algılanıyordu. Bir hadron bir bakıma bazı gizemli maddelerden yapılmış bir top gibidir.

Hadronların mezonlar ve baryonlar (Yunanca βαρυς = ağır) olarak alt kısımlara ayrılması başlangıçta bunlar arasındaki kütle farklarına dayanıyordu: Mezonların kütleleri genellikle leptonlarla baryonların kütleleri arasında bulunmaktadır. Kütle tek başına bu parçacıkların doğası hakkındaki her şeyi belirtmez; spine de bakmak gerekir. Spin tam sayı ise parçacık bir mezondur; spin tam sayı artı yarım ise bu takdirde bir baryonumuz (ya da bir antibaryon) var demektir. Bununla birlikte, daha da önemlisi, temel parçacıklar arasındaki tüm olaylarda baryon sayısı eksi antibaryon sayısı daima sabit kalır. Bu şekilde "baryon sayısının" korunmuş olduğunu söyleriz; Tablo 1'de "*B*" diye belirtilen

baryon sayısı baryonlar için 1, antibaryonlar için B = –1 ve mezonlar için B = 0'dır.

Hadronlar birbirleriyle çarpıştıkları zaman başka cins "yüklerin" de sabit kalacağı düşünülebilir. Bu durumda bir "korunum yasasından" söz ederiz. Bu tür yüklerden birisi, Tablo 1'de S harfi ile gösterilen "acayiplik" yüküdür. Çoğu parçacığın sabit bir S değeri vardır. A ve B parçacıkları çarpıştıktan sonra ortaya C ve D parçacıkları çıkmışsa, böyle bir çarpışma olayı yalnızca, A ve B'nin S değerlerinin toplamının, C ve D'nin S değerlerinin toplamına eşit olduğu zaman gözlenir. Aynı şekilde, A ve B'nin toplam enerjisi C ve D'nin toplam enerjisine eşittir ve her parçacığın kütle x hız biçiminde tanımlanan "momentumu" da birbirine eşittir. Enerjinin korunumu, momentumun korunumu ve acayipliğin korunumu gibi korunum yasaları parçacık fiziğinde hayati bir rol oynar.

"Acayiplik" terimi tam yerinde bir sözcük: proton, nötron ve pion gibi "sıradan" parçacıkların acayiplikleri sıfırdır. Kaon ve lambda gibi parçacıklara birer sayı verilebileceğini ve bunların toplamının parçacıklar çarpıştıklarında korunacağını keşfeden kişi Gell-Mann oldu ve o bu sayılar için "acayiplik" sözcüğünü önerdi. I_3 sembolü ile gösterdiğimiz "izospin" denilen bir büyüklük daha var. "İzospin" terimi garip gelebilir; aslında bu terim dönme hareketinin ya da "spinin" korunumunu hatırlatan korunum yasasının matematiksel yapısın-

dan kaynaklanmaktadır. İzospine göre proton ve nötron "nükleon" adı verilen tek bir parçacık gibi ele alınır. Ancak proton ve nötron "izospin uzayı" denilen bir "iç" uzayda zıt yönlerde dönmektedir. Size bunlar gizemli gelebilir, ancak bu benzetme bir matematikçiye bu parçacıkların simetrileri hakkında yeni anlayışlar kazandırır. Nükleonu izospin uzayında değişik eksenler etrafında döndürebilir ve buradan başka iki korunum yasası, yani I_1 ve I_2'nin korunum yasalarını elde edebilirsiniz. Ancak bunları daha fazla açıklamak için bir girişimde bulunmayacağım.

Tablo 1'de acayiplik (S) ve izospin (I_3) sayıları da gösterilmiştir. Dikkat ederseniz bir parçacık bozunduğunda bu sayılar her zaman aynı kalmaz. Çünkü çoğu bozunma olayından zayıf kuvvet sorumludur ve zayıf kuvvet bu korunum yasalarına uymaz. Elektromanyetik kuvvet de izospini korumaz.

Zayıf kuvvet

Pek çok parçacığın ve hatta pek çok tuhaf atom çekirdeğinin kararsız olmasından zayıf kuvvet sorumludur. Zayıf kuvvet, bir parçacığın kendisiyle akraba başka bir parçacığa dönüşmesine ve bu arada bir elektron ile bir nötrino çıkmasına neden olur. Zayıf kuvvetin genel bir formülü 1934'de Enrico Fermi tarafından bulundu. Daha sonra George Sudarshan, Robert Marshak, Murray Gell-Mann ve Richard Feynman tarafından geliştirildi. Geliştirilmiş formül çok iyi iş görüyordu, ancak her koşulda doğru sonuç vermediği açıktı.

1970'e gelindiğinde zayıf kuvvetin aşağıdaki özelliklerinden yalnızca ilk üçü biliniyordu:

- Kuvvet değişik türdeki parçacıklara evrensel bir şekilde etki eder ve (etkileri değişik durumlarda çok farklı olsa da) şiddeti her parçacık için yaklaşık olarak aynıdır. Nötrinolar zayıf kuvvete özellikle duyarlıdır.
- Diğer kuvvetlerle kıyaslandığında zayıf kuvvetin menzili çok kısadır.
- Kuvvet çok zayıftır. Bu nedenle içinde nötrino bulunan parçacık çarpışmaları öylesine az sayıdadır ki, bu olayları incelemek için çok sayıda nötrino içeren hüzmeye ihtiyaç duyulur.
- Zayıf kuvvet "taşıyıcılarına" W^+, W^- adı verilir. Bu taşıyıcılar 1980'lere kadar bulunamadı. Tıpkı foton gibi bunların da spinleri 1'dir, ancak elektrik yükleri vardır ve çok ağırdırlar (işte bu yüzden kuvvetin menzili kısadır). Üçüncü taşıyıcı Z^0, parçacık bozunmalarıyla hiçbir ilişkisi olmayan bir başka tür zayıf kuvvetten sorumludur: "yüksüz akım". Bu akım, diğer parçacıkların kimliklerini değiştirmeden nötrinolarla etkileşmesine izin verir.

1970'den sonra elektromanyetizma ile zayıf kuvvet arasındaki ilişki açıklık kazandı.

Güçlü kuvvet

Güçlü kuvvet hadron adı verilen parçacıklar arasında etkilidir. Bu kuvvet hadronlara karmaşık bir iç yapı kazandırır. 1972 yılına kadar güçlü kuvvetin sadece simetri kuralları biliniyordu ve kuvvet yasalarını tam olarak formüle edemiyorduk.

- Bu kuvvetin menzili hafif bir atom çekirdeğinin yarıçapından daha büyük değildir (yaklaşık 10^{-13} cm).
- Kuvvet güçlüdür. Parçacıklar güçlü kuvvetin etkisiyle çok çabuk bozunur. Bu parçacıklara "rezonans" denir. Ortalama ömrü $0{,}6 \times 10^{-23}$ saniye olan Δ-rezonansını buna örnek olarak verebiliriz. İki hadron birbirine 10^{-13} cm kadar yaklaşırsa çarpışma olasılığı son derece yüksektir.

1972'ye kadar spinleri sıfır, kütleleri 135 ile 140 MeV arasında değişen pionların güçlü kuvvetin taşıyıcısı oldukları sanılıyordu. Örneğin iki proton arasındaki çekici güçlü kuvvet, esas olarak pion değiş tokuşundan meydana geliyordu. Günümüzde bunun nedeni pionların en hafif hadron olmalarına bağlanıyor. Ne var ki pionlar da diğer hadronlar gibi "kuark"lardan meydana gelmiştir. Güçlü kuvvet artık kuarklar arasındaki daha da güçlü bir kuvvetin yan etkisi olarak görülüyor. XIII. Bölüm'de ele alacağımız gibi güçlü kuvvetin taşıyıcıları "gluonlar"dır.

VI. Bölüm

Yaşam ve Ölüm

Bir parçacığın ömründen bahsederken daima onun ortalama ömrünü kastederiz. Tamamen kararlı olmayan bir parçacık, ömrünün her anında aynı bozunma olasılığına sahiptir. Bazı parçacıklar diğerlerinden daha uzun yaşar ama ortalama ömür her cins parçacık için belli bir değere sahiptir.

Kullanılan kavramlardan biri de "yarı-ömür"dür. Elimizde çok sayıda özdeş parçacık varsa, yarı-ömür, bu parçacıkların yarısının bozunması için geçen zamandır. Yarı-ömür ortalama ömrün 0,693 katıdır.

Tablo 1'e bakılacak olursa, bazı parçacıkların diğerlerinden çok daha uzun bir ortalama ömüre sahip olduğu görülür. Parçacıkların ömürleri birbirlerinden oldukça farklıdır. Örneğin bir nötron sigma-artı'dan 10^{15} defa, sigma-artı da sigma-sıfır'dan 10^{9} defa daha uzun ömre sahiptir. Bir temel parçacık için "doğal" zaman ölçeğinin (kuantum mekaniksel bir durumun gelişmesi ya da dalga fonksiyonunun salınım yapması için geçen zaman) 10^{-24} saniye civarında bir değere sahip olduğunu gözlerseniz, tüm bu parçacıkların oldukça kararlı olduğunu güvenle söyleyebilirsiniz. Meslek argosunda bunlara "kararlı parçacıklar" denir.

Bir parçacığın ömrü nasıl belirleniyor? Nötron ve müon gibi uzun ömre sahip parçacıklar tercihen çok sayıda yakalanmalı ve bozunmaları elektronik olarak kaydedilmelidir. Ömürleri 10^{-10} ile 10^{-8} saniye arasında değişen parçacıklar daha önceleri bir kabarcık odasında kaydediliyordu. Günümüzde ise bu kayıtlar daha çok bir kıvılcım odasında yapılmaktadır. Kabarcık odasından geçen bir parçacık küçük kabarcıklardan meydana gelen bir iz bırakır ve bu izler fotoğraflarla saptanır. Bir kıvılcım odası, birbirlerinin içinden geçen ve uçlarına elektrik potansiyeli uygulanan çok sayıda ince telden oluşur. Yüklü bir parçacık bu tellere yaklaştığında, tellerde bir dizi boşalmaya (kıvılcım) neden olur ve bunlar elektronik olarak kaydedilir. Kabarcık odasıyla karşılaştırıldığında bu tekniğin üstünlüğü sin-

yallerin doğrudan doğruya bir bilgisayara gönderilmesidir.

Elektrik yükü olmayan bir parçacık hiçbir zaman doğrudan bir iz bırakmaz. Ancak yüklü parçacıklarla herhangi bir şekilde bir etkileşmeye girerse (ya dedektördeki atomlara çarpar ya da başka parçacıklara bozunursa), şüphesiz bunlar da kaydedilir. Genellikle aygıtın tamamı güçlü bir mıknatısın kutupları arasına yerleştirilir. Mıknatıs parçacık yörüngelerini eğriltir ve bu eğrilikten de parçacığın ne kadar hızlı gittiğini bulabiliriz. Bununla birlikte yörüngenin eğriliği parçacığın kütlesine de bağlı olduğundan, hızı bazen başka bir yöntemle de ölçmek yararlı olur.

Bir yüksek enerji deneyinde çoğu parçacık ışık hızına yakın hızlarla hareket eder. Kısa ömürleri içerisinde birkaç santimetre yol alabilirler. Bu izlerin ortalama uzunluğundan parçacıkların ömürleri hesaplanabilir. 10^{-13} ile 10^{-20} saniye arasında olan parçacık ömürlerini doğrudan ölçmek son derece zordur. Ancak bu parçacıkların ömürlerini dolaylı bir şekilde, parçacıkları birbirine dönüştüren kuvvetleri ölçmek suretiyle bulmak mümkündür. Parçacıkların bozunmasından bu kuvvetler sorumludur. Dolayısıyla bu kuvvetleri bilirsek ömürlerini de hesaplayabiliriz. Parçacıkların özellikleri hakkında mümkün olan bütün bilgileri edinebilmek için, bilim adamları tüm hünerlerini göstererek akla gelebilecek her tekniği geliştirdiler. Bu süreçlerden

bazılarında yüksek hassasiyete ulaşmak son derece zordu. Tablo 1'deki sayılar birçok insanın yıllarca çalışarak elde ettiği hassas ölçümlerin bir sonucudur ve en son yayımlanmış verileri göstermektedir.

Çoğu parçacığın ortalama ömrü 10^{-8} saniye civarındadır, bu da son derece kararlı oldukları anlamına gelir! Bu parçacıkların iç dalga fonksiyonları bir saniyede 10^{22}'den daha fazla salınım yapar. Bu onların "doğal kalp atışları"dır ve ömürleriyle karşılaştırılabilir. Bu kuantum dalgaları şu ya da bu şekilde bozunmadan önce $10^{-8} \times 10^{22} = 10^{14}$, yani 100.000.000.000.000 kere salınım yapar. Güvenle söyleyebiliriz ki bu bozunmaya neden olan kuvvet son derece zayıftır. Çok küçük bir sürtünme nedeniyle 100.000.000.000.000 salınımdan sonra titreşimi sönecek bir ses çatalını düşünün. Sürtünmenin fazla olması nedeniyle gerçek ses çatalları çok daha çabuk söner. Bazı kararsız parçacıkların ömürlerini sona erdiren "sürtünme kuvveti", "zayıf kuvvet" olarak bilinir.

Nötronun ömrü daha uzun olmasına rağmen (ortalama on beş dakika) bozunması yine zayıf kuvvet aracılığıyla olur. Aklıma gelmişken şunu da belirteyim ki, zayıf kuvvet aracılığı ile bozunan bazı radyoaktif atom çekirdeklerinin ömrü milyon hatta milyarlarca yıldır. Bu denli uzun ömürler bozunma sırasında ortaya çıkan enerji miktarı ile açıklanabilir. Bir parçacığın kütlesinde depolanmış enerji Einstein'ın ünlü formülüne göre $E = Mc^2$'dir.

Bir bozunmanın olabilmesi için, bozunma sonucunda oluşan parçacıkların toplam kütlesinin, bozunan parçacığın kütlesinden daha az olması gerekir. Aradaki fark hareket enerjisine dönüşür. Fark büyükse olay çok hızlı meydana gelir. Ne var ki çoğu hallerde fark çok küçüktür, bu yüzden bozunma dakikalarca, hatta milyonlarca yıl sürer.* Görüldüğü üzere, sadece bir kuvvetin şiddeti değil, aynı zamanda kullanılabilir enerji miktarı da parçacığın bozunma hızını belirler.

Zayıf kuvvet olmasaydı Tablo 1'deki çoğu parçacık tamamen kararlı olabilirdi. π^0, η ve Σ^0 parçacıklarının bozunmasından elektromanyetik kuvvet sorumludur. Bu parçacıkların daha kısa ömüre sahip olduklarını görebilirsiniz. Anlaşılıyor ki, elektromanyetik kuvvet zayıf kuvvete göre bir miktar daha güçlüdür.

Atomaltı parçacıkların bu karmakarışık durumu 1950'lerde ve 1960'larda ortaya çıktı. Ünlü İtalyan fizikçi Enrico Fermi, bu durum karşısındaki tepkisini şu şekilde dile getirmişti: "Bunu önceden biliyor olsaydım botanik okurdum".

İş daha da karmaşıklaşacaktı. 1970'e kadar çok büyük spinli bir dizi hadron bulunmuştu. Bunlar güçlü kuvvet aracılığıyla bozunur. Bu yüzden ömürleri çok kısadır (çoğunun 10^{-23} saniye civarın-

* Bozunan bir nötrondaki 0,7 MeV'luk fazla kütle-enerjisi, ortaya çıkan proton, elektron ve nötrinoyu harekete geçirmek için kullanılır. Radyoaktif bir çekirdekte genellikle çok daha az miktarda enerji fazlalığı vardır.

dadır). Belirli bir hadronun güçlü kuvvet aracılığıyla bozunup bozunmadığını ortaya çıkarmak genellikle çok kolaydır. Bozunma ürünü olan parçacıkların bir listesi çıkarılır; bu listedeki parçacıkların yüklerinin (S ve I_3 dahil) toplamı orijinal parçacığın yüküyle aynı, ancak toplam kütlenin orijinal parçacığın kütlesinden daha az olması gerekir. Bu durumda bu parçacıklara güçlü bozunmanın dışında bir seçenek kalmayacaktır. Fazla kütle hareket enerjisine dönüşür.

S ve I_3 dışındaki tüm koşullar sağlandığında bozunma yine de mümkündür. Ancak bu, söz konusu kuantum sayılarını korumayan zayıf kuvvet aracılığıyla meydana gelir. Zayıf bozunmalar daha çok zaman alır.

Bir parçacığın ömrü 10^{-23} saniye ise, bozunma sürecinin kendisi parçacığın yaratılması için gereken enerjiye etki yapar. Bunu açıklamak için parçacığı tekrar titreşen bir ses çatalıyla karşılaştıralım. Bu titreşimi söndürecek "sürtünme kuvveti" güçlü ise, bu kuvvet çatalın titreşimini etkiler. Salınım frekansı çok iyi tanımlanmamıştır. Bir temel parçacık için bu frekans onun enerjisine karşılık gelmektedir. Ses çatalı daha az hassas bir şekilde rezonansa gelecektir; yani rezonans eğrisinin en yüksek noktası daha az belirgindir. Bu son derece kararsız parçacıklar için ölçülen benzer eğrilere genellikle rezonans eğrileri denir. Bu parçacıkların ömürleri doğrudan doğruya rezonans eğrilerinden elde edilebilir.

Rezonanslara tipik bir örnek delta'dır (Δ). Bunların dört cinsi vardır: Δ^-, Δ^0, Δ^+ ve Δ^{++} (sonuncusunun elektrik yükü iki birim). Deltaların kütleleri yaklaşık olarak birbirine eşittir ve 1230 MeV civarındadır. S acayiplikleri sıfırdır ve $\frac{1}{2}$ I_3, $-1\frac{1}{2}$ ile $+1\frac{1}{2}$ arasında değişir; baryon sayısı B =1'dir. Tüm bunlar deltaların bir proton ya da bir nötron ile bir piona güçlü bir şekilde bozunacağını gösterir. Örneğin:

$$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+ \; ; \; \Delta^0 \rightarrow p + \pi^- \; ; \text{ ya da } n + \pi^0 \, .$$

Kütleleri eklersek 150 MeV civarında bir fazlalık olduğunu görürüz. Bu fazlalık hareket enerjisine dönüşür.

Hem baryonik hem de bozonik rezonanslar vardır. Delta rezonansları baryoniktir (ileride ρ mezonik rezonansıyla karşılaşacağız). 1970'li yıllarda düzinelerle rezonans biliniyordu ve bütün kanıtlar bunlardan sonsuz sayıda olabileceğini gösteriyordu; dizide bir sonra gelenin kütlesi bir öncekine göre biraz daha fazla olduğu halde, ömrü daha kısadır. Öyle ki bunların bir anlık varlığını gözlemek giderek güçleşir.

Rezonanslar kararlı hadronların bir cins uyarılmış hallerine karşılık gelmektedir. Normal hadronlara göre ya hızlı dönen ya da hızlı titreşen kopyalardır. Bu bir gonga vurulduğunda ortaya çıkan sese benzer. Gong ses çıkarır, bu sesi çıkarırken enerji kaybeder ve sonunda titreşimi durur. Benzer şekilde bir rezonans, pion çıkararak kendi varlığına son verir ve böylece daha kararlı bir madde haline dönüşür.

VII. Bölüm

Çılgın Kaonlar

Sevgili okur, her parçacık türünü ayrı ayrı ve uzun uzun ele alarak canını sıkmak istemiyorum. Ancak, kaonlar bir istisna teşkil ettikleri için anlatmadan geçemeyeceğim. Onlarca yıl önce, her oyuncak dükkânında "aptal macun" denilen bir madde bulunurdu. Bu mucizevi bir şeydi. Kil gibi yumuşak olduğu için şekil verebilir ve top gibi yuvarlayabilirdiniz. Bununla birlikte, bir yere atıldığı zaman esnek bir şekilde zıplayarak bir kil topundan beklenmeyen bir tepki gösterirdi. Topu bir süre kendi haline bıraktığınızda şeklini yavaş yavaş değiştirirdi; bırakın zıplayan topu bir kena-

ra, geride kilden çok çamurlu suya benzeyen bir şey kalırdı. Yine de bu madde hâlâ kil duygusu veriyordu ve biçimlendirilebiliyordu. Bir fizikçi için böyle maddeler çok ilginç. Bu maddenin kendini yadsıyan şekil değiştirmelerinin fiziksel bir açıklaması özel molekül yapısında aranmalıdır. Sanıyorum bunların tümü, belli uzunluklardaki küçük ipliklere benzerler, öyle ki birbirlerine sarılarak yapışırlar ve zamanla açılırlar.

Yüksüz kaonlar aptal macunlardan bile daha çılgındır. Kaonların K_{Uzun} ve $K_{Kısa}$ adı verilen iki biçimi vardır. Bunlara K^0 ("K-sıfır") ve $\overline{K^0}$ ("zıt K-sıfır") da denir. Eğer K^0 diye bir parçacığınız varsa, bu % 50 olasılıkla K_{Uzun}, % 50 olasılıkla $K_{Kısa}$ demektir. Aynı şey $\overline{K^0}$ için de geçerlidir. Öte yandan, elinizde K_{Uzun} diye bir parçacık olduğunu "biliyorsanız", bu % 50 olasılıkla K^0, % 50 olasılıkla da $\overline{K^0}$ gibi davranıyor demektir. Benzer şekilde $K_{Kısa}$ da % 50 olasılıkla K^0 ve % 50 olasılıkla da $\overline{K^0}$ gibi hareket eder. Bununla birlikte, K_{Uzun} asla $K_{Kısa}$ gibi, K^0 da asla $\overline{K^0}$ gibi davranmaz!

Kuantum mekaniği ile fazla ilişkisi olmayan bir okuyucu, yukarıda söylediğim şeylerden tek bir kelime bile anlamayabilir. Bunun içindir ki kaonlara temel parçacıkların aptal macunu diyorum. Lütfen bana yukarıda bahsettiğim mucizevi ifadeyi biraz daha açmama izin verin.

Tablo 1'de görüldüğü gibi, $K_{Kısa}$ 10^{-10} saniyeden daha az bir ortalama ömre sahiptir. Bunlardan bir

kısmı daha az yaşarken, bir kısmı da biraz daha fazla yaşayacak, fakat örneğin, 5×10^{-10} saniyeden sonra hemen hemen tüm $K_{Kısa}$ parçacıkları bozunacaktır. K_{Uzun}'nun ortalama ömrü öylesine uzundur ki aralarından bir tanesinin 5×10^{-10} saniye içinde bozunma olasılığı son derece küçüktür. Bu nedenle, eğer 5×10^{-10} saniye içinde bozunmuş olan yüksüz bir K mezonunuz varsa, bunun bir $K_{Kısa}$ olduğundan emin olabilirsiniz. Ancak hâlâ yaşıyorsa o zaman bunun bir K_{Uzun} olduğunu güvenle kabul edebilir ve 5×10^{-8} saniyeden sonra bozunacağını bekleyebilirsiniz.

S ile I_3 kuantum sayıları K_{Uzun} ve $K_{Kısa}$'ya uygulanamaz. Ancak

$$p + p \rightarrow \Sigma^+ + p + K^0$$

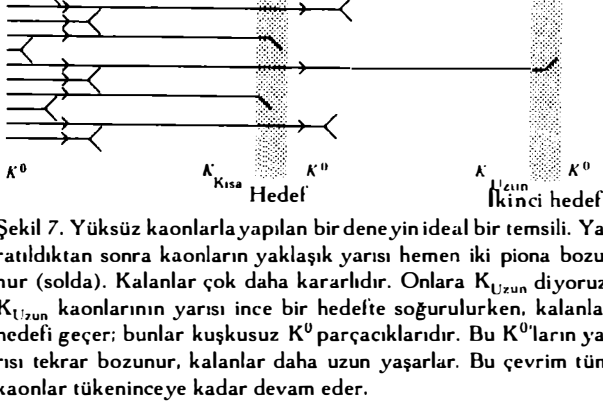
tepkimesinde bir kaon üretirseniz *S* acayiplik sayısının +1 olduğundan emin olabilirsiniz. Çünkü Σ^+ için bu sayı $S = -1$'dir. K^0 için $S = 1$ ve $\overline{K^0}$ için $S = -1$ olduğundan bu tepkime kesinlikle bir $\overline{K^0}$ değil bir K^0 üretir. Bir yüksüz kaonlar demeti ince bir levhadan ("hedeften") geçirilirse, kaonlar bu hedefle her türlü etkileşmeye girer. $\overline{K^0}$'lar K^0'lardan kolaylıkla ayırt edilir. Çünkü, nükleonla şöyle bir tepkimeye girebilir:

$$\overline{K^0} + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$$

Halbuki K^0 protonla böyle bir tepkimeye giremez, çünkü tüm acayip baryonların acayiplik ku-

antum sayıları eksi işaretlidir. Bu yüzden K^0 sıradan ince bir levhayı antiparçacığı $\bar{K}^0$'ye göre çok daha kolaylıkla geçebilir.

Şekil 7'de, 10^{-8} saniye kadar kendi haline bırakılmış olan ve ondan sonra ince bir hedeften geçmesi beklenen bir kaon demetinin başına neler geleceği gösterilmektedir. Yaratılan parçacıklar ve hedeften geçtikten sonra geriye kalan parçacıklar (çoğunlukla) K^0'lardır. 10^{-8} saniyeden sonra bozunmamış olan parçacıklar kuşkusuz $K_{Kısa}$ değil, K_{Uzun}'dur. Parçacık demetinin önüne istediğiniz sayıda hedef koyabilirsiniz. Hedef her seferinde parçacıkların % 50'sini soğurur, % 50'si ise hemen hedeften sonra bozunur. Şüphesiz bu anlatım ideal bir durumu yansıtır. Gerçek bir deneyde kaonlar bütün yönlerde hareket eder.



Şekil 7. Yüksüz kaonlarla yapılan bir deneyin ideal bir temsili. Yaratıldıktan sonra kaonların yaklaşık yarısı hemen iki piona bozunur (solda). Kalanlar çok daha kararlıdır. Onlara K_{Uzun} diyoruz. K_{Uzun} kaonlarının yarısı ince bir hedefte soğurulurken, kalanlar hedefi geçer; bunlar kuşkusuz K^0 parçacıklarıdır. Bu K^0'ların yarısı tekrar bozunur, kalanlar daha uzun yaşarlar. Bu çevrim tüm kaonlar tükeninceye kadar devam eder.

Tahmin edebileceğiniz gibi, bu parçacıklar ilk kez keşfedildiklerinde bu acayip davranış karışıklıklara neden oldu; önce, çok sayıda değişik tür parçacık olduğu sanıldı. Aslında biz burada tipik bir kuantum mekaniksel olayla karşı karşıyayız. Güçlü kuvvet acayipliği koruduğu için, bir parçacık yaratıldığında bunun K^0 mı yoksa $\overline{K^0}$ mı olacağı daima bellidir. Fakat 10^{-10} saniye sonra (bu süre parçacığın yaratılma süresi olan 10^{-24} saniyeden çok daha uzun) zayıf kuvvet hissedilir. Zayıf kuvvet S ve I_3'ü tamamen yok sayar. Aşağıdaki gibi geçişler meydana gelir:

$$K^0 \leftrightarrow \overline{K^0}$$

Bu gelgit sistemi, K_{Uzun} ve $K_{Kısa}$ "kuantum durumları" nı oluşturur.

Hem K^0 hem de $\overline{K^0}$ iki piona bozunabilir ama aralarında "girişim" meydana gelir. Parçacık demetleri uygun adımla ilerlerse, o zaman yapıcı girişim var demektir. Pion dalgaları birbirlerini güçlendirir ve parçacık hızla bozunur. Girişim yıkıcı ise parçacık iki piona bozunamaz. O zaman bu parçacığı K_{Uzun} olarak tanımlarız. Olasılık her zaman 50 : 50'dir. K_{Uzun} üç piona bozunabilir, ancak bu çok daha fazla zaman alır. Böylece açıklamalarımı bitirmiş oluyorum.

Ne yazık ki kuantum mekaniği çok zor bir konu ve "açıklamalarımın" çok tatminkâr olduğunu sanmıyorum. Aldırmayın, nasıl işlediğini anlamadan

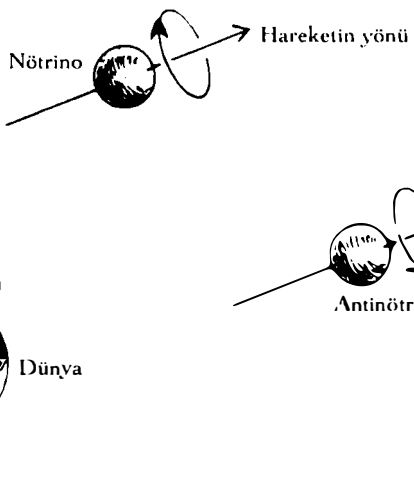
da aptal macunla oynamaktan zevk alabilirsiniz. Niyetim, kendimi çok bilmiş biri gibi gösterip okuyucuyu bu işlerden anlamaz bir duruma sokmak değil. Kuantum mekaniği sadece çok yoğun çalışma gerektiren özel bir konu olmakla kalmaz, aynı zamanda ona "alışmış olmak" da gerekir. Önsözümde sizi bu konuda uyarmıştım.

Yüksüz kaonların başka eğlenceli yanları da var. Bunu açıklamak için zayıf kuvvet hakkında biraz daha bir şeyler söylemem gerekir. Daha önce belirtildiği üzere, bu kuvvet acayiplik ve izospin gibi korunum yasalarına uymaz. Ancak uyduğu başka korunum yasaları vardır.

Sıklıkla simetrinin korunumundan söz edeceğiz. Çok basit ama çok önemli bir simetri, fizikçilerin "parite" adını verdiği "ayna simetrisi"dir. Bunu anlamak için parçacıkları aynadaki görüntüleriyle karşılaştırırız. 1956'ya kadar Doğa yasalarına uyan herhangi bir fiziksel olayın ayna simetrisinin de olduğu varsayılıyordu. Sonuç olarak, parçacıklar ya da parçacık demetleri, ayna simetrisine uygun bir şekilde birbirlerine çarptıklarında, ayna simetrisinin korunmuş olacağı düşünülüyordu.

Birçok parçacığın ayna görüntüsündeki gibi olmadığını gösteren keşif, Tsung Dao Lee ile Chen Ning Yang adlı iki Çinli fizikçi tarafından, Amerika Birleşik Devletleri'ne göçmen olarak gitmelerinden hemen sonra yapıldı. Sonuçta zayıf kuvvetin sağ ve sol ayrımı yaptığı ortaya çıktı. Nötrino

için bu durum çok belirgindir. ν_e ile ν_μ nötrinoların da tıpkı foton gibi durgun kütleleri yoktur daima ışık hızıyla hareket ederler. Nötrinolar eksenleri etrafında dönerler de: spinleri $\frac{1}{2}$'dir. Şekil 8'de dönen Dünya'nın "kuzey kutbu" ile "güney kutbu" gösterilmektedir. Nötrinoların bir özelliği var; güney kutupları daima önlerinde, kuzey kutupları ise daima arkalarındadır. Buna uymayan nötrinolar hiçbir zaman gözlenmemiştir.



Şekil 8. Hareketin yönü

İsveçli fizikçi Cecilia Jarlskog, nötrinoları vampirlere benzetir: Ayna görüntüleri yoktur. Ayna görüntüleri fiziksel olarak imkânsızdır. Vampirler hakkındaki bilgim sınırlı olduğundan bu noktada sizden özür diliyorum. Belki bir vampir bile, ayna görüntüsü denen şeyi az çok anlayabilirdi. Nötri-

nolar için de durum buna çok benzeyebilir; belki onların da ayna görüntüleri var ama biz bugüne kadar göremedik. Ters yönde dönen nötrinolara XIX. Bölüm'de tekrar döneceğim. Antinötrinolar hakkında kesinlikle bildiğimiz şey, kuzey kutuplarının önlerinde, güney kutuplarının arkalarında olduğudur. Bu parçacıklar $\bar{\nu}_e$ veya $\bar{\nu}_\mu$ ile gösterilir. Bütün parçacıklar bir bakıma antiparçacıklarının ayna görüntüsüne benzer.

$K_{Kısa}$'nın iki piona bozunması, ayna simetrisine tamamen uyar. Ayna simetrisini bozan bir kuvvet olmadığı sürece, bu olguyu kaon yaratma süreciyle bağdaştırmak zordur. Burada da yine sorun, açıklaması bir bakıma zor olan kuantum mekaniksel hikâyedir. K^0 ya da $\bar{K}^0$'nin iki piona bozunmasının ayna görüntüsü hesaplanmak istenirse ve ayna görüntüsü kendisinden farklı değilse, o zaman yıkıcı girişim yüzünden iki piona bozunmanın tamamen söndürülmüş olduğu görülür. Kısaca, kaonların iki piona bozunma olgusu, zayıf kuvvetin bir şişe açacağına benzeyen bir yanı olduğunu gösterir; yani, kendisi ayna görüntüsünden farklıdır. K^0'dan pion salınmasının girişim yüzünden zayıflatıldığını gördük. Aynı şey $\bar{K}^0$ için de geçerlidir. Bu nedenle, bu parçacığın kendi antiparçacığının ayna görüntüsüne benzediği sonucuna varılır. Buna "PC" simetrisi denir. Burada *P* parite, *C* ise herhangi bir parçacığın yerine antiparçacığının konulması anlamına gelmektedir (eşleniklik). *PC* çarpımı zayıf kuvve-

tin bir simetrisidir; tek başına ne P ne de C bu özelliğe sahiptir.

Ancak yanlış bir şey var gibi görünüyor. K_{Uzun}'un iki piona dönüşmesini engelleyen yıkıcı girişimin nedeninin PC simetrisi olduğunu az önce vurgulamıştık. James Christenson, James Cronin, Val Fitch ve René Turlay bir deneyle bunun doğru olup olmadığını kontrol etmek istediler. O zamana kadar, arada sırada ortaya çıkan K parçacıkları atmosferin üst katmanlarında yapılan balon deneyleriyle incelenmişti. Ancak hassas ölçümler için bu tür deneyler uygun değildi. Kaonların parçacık hızlandırıcılarında hızlandırılarak, koşulların daha hassas bir şekilde kontrolü gerekiyordu. (Val Fitch sonraları böyle bir deneye başladığına pişman olduğunu söyleyecek ve "yerin altında çalışacağıma keşke dağlarda çalışsaydım" diyecektir).

Deneyciler çok karmaşık ölçümler ve yoğun kontrollerden sonra 1000 K_{Uzun} parçacığından üçünün gerçekten de iki piona bozunduğunu kanıtladılar! Bu deneyin inceliği şuydu: Parçacıklar arasında $K_{Kısa}$'nın ve bunun da ötesinde ölçümlerden kaçan üçüncü bir parçacığın olmadığından emin olmak. Bilim adamları kendi kendilerini ikna edinceye kadar bir yığın analiz yapıp, altı aylarını bu işe harcadılar. Daha önce sözünü ettiğim girişim olayı yüzde yüz su geçirmez değil elbet. Bir miktar sızıntı var!

Bundan çıkarılacak sonuç şu: PC korunum yasası da zayıf etkileşimler tarafından biraz miktar bozulmaktadır. Bununla birlikte "süper zayıf" diye bir başka kuvvetten bahsedebilir ve tek amacının *PC* simetri korunumunu sabote etmek olduğunu söyleyebilirsiniz. Daha sonra göreceğimiz gibi, böyle bir kuvvet Doğa'yı tanımlamamızla uyumlu olabilir. Ancak bu kuvvetin varlığının derin nedeni şimdilik bir sır olarak durmaktadır. Biraz önce bahsettiğim deneyin liderleri Cronin ve Fitch, 1980'de bu buluşlarından dolayı Nobel Ödülü aldılar.

P ve *C* ile ilgili başka bir simetri daha var: zaman yansıması, T. Bir filmi ters yönde oynatmaya benzer şekilde, herhangi bir doğal olay zamanda geriye doğru izlenebilir. Güneş sistemindeki gezegenler için bunu yapabilseydik, bu olayın Newton'un kütleçekimi yasasına hâlâ uyduğunu görürdük. Temel tanecikler teorisinde yalnız ayna görüntüsünü (*P*) almakla kalmadığımızı, parçacıkları antiparçacıklarıyla değiştirdiğimizi (*C*) ve bir de zamanda geriye doğru gittiğimizi (*T*) düşünelim. Buna biz *PCT* dönüşümü diyoruz. Bu dönüşümden sonra mikroskobik fiziğin hiçbir yasasının değişmemesi gerekir. Bu sonuca teorimizdeki hassas kanıtlarla varıyoruz. *PCT* simetrisini bozan herhangi bir kuvveti tanımlamakta güçlük çekiyoruz. Örneğin, bunun deneysel olarak incelenmesine karar verilirse, o zaman, parçacıklarla antiparçacıklarının tamamen aynı kütleye sahip

olup olmadıklarına bakmak gerekir. Teorisyenleri şaşırtmayı çok seven deneycilerin yoğun araştırmalarına rağmen bu simetriye uymayan herhangi bir şey görülmedi.

PC bozulmasının keşfinin "evrenbilimi" adı verilen kozmolojideki bir problemle yakından ilişkisi vardır. Evrenimizde görünen çok sayıdaki gökcisminin hepsi proton, nötron ve elektronlardan meydana gelmiştir. Astronomlar, antimaddeden (antiproton, antinötron ve pozitron) oluşmuş bir galaksinin ya da tek bir yıldızın olmadığından çok emin görünüyorlar. Bu bir simetri eksikliği değil mi? Evrenin başlangıcında belki de madde ile antimadde miktarları arasında hiçbir fark yoktu. Var olan şey, son derece hızlı hareket eden parçacıkların bir sıcak "çorbasıydı". Bundan sonra, Doğa kuvvetleri bu ilk parçacıklar üzerine etki ederek onları bizi meydana getiren parçacıklara dönüştürdü. Ancak, her nasılsa, antimadde yerine maddeyi yeğleyen bir gelişme olmuş olmalı. Bu kuvvetlerin baryon sayısını koruyan yasayı bozmuş olmaları gerekir, ancak bu bir sorun değil. Böyle kuvvetleri daha sonra ele alacağız. Bununla birlikte, başlangıçta Evren'in yaklaşık olarak ayna simetrisine uyduğu varsayılırsa, bu olaylar *PC* simetrisini bozmadan asla meydana gelmez.

Şimdi *PC* simetrisini bozan kuvvetlerin bulunduğunu bildiğimize göre, başlangıçta çok küçük olan ve eşit miktarda madde ve antimadde içeren

bir Evren hayal edebiliriz. İşte bu Evren, içinde yaşadığımız dünyayı meydana getirecek şekilde gelişti. *PC* bozulmasının Evren hızla gelişirken meydana gelmiş olması gerekir; aksi halde zaman yansıması simetrisi kullanılarak baryon sayısının antibaryon sayısına denk olacağı gösterilebilir. Bununla birlikte, böyle bir mekanizmanın tüm ayrıntılarının doğru işlediği modeller kurma uğraşı, bilimden çok bilimkurguya yakın gibi geliyor bana.

VIII. Bölüm

Görünmez Kuarklar

Çeşitli parçacık türleri arasındaki düzenlilik açıklığa kavuşunca belirli bir gruplandırma ortaya çıktı. Dimitriy İvanoviç Mendeleyev'in 1869'da keşfettiği kimyasal elementlerin peryodik tablosuna benzeyen bir sistem parçacıklar için de kullanılmaya başlandı. Böyle bir sistem birbirinden bağımsız olarak, Amerikalı Murray Gell-Mann ve İsrailli Yuval Ne'eman tarafından bulundu. Aynı spinli sekiz mezon ya da aynı spinli sekiz baryon çok güzel bir şekilde, çoklu (multiplet) adı verilen demetler halinde sınıflandırıldı. Buna karşılık gelen matematiksel yapıya $SU(3)$ denir.

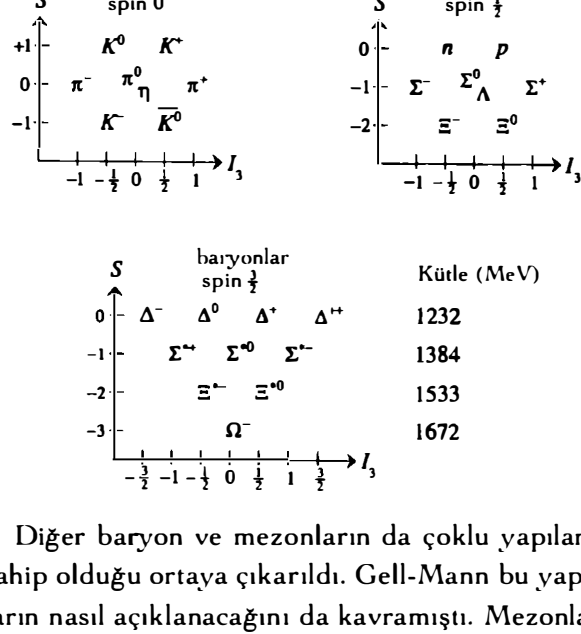
Sekiz parçacık bir "temel" sekizli meydana getirir. Bu yüzden, Gell-Mann, teorisine "Sekiz Katlı Yol" adını verdi; bu sözcüğü kullanırken Budizim'de Nirvana'ya giden yolun sekiz katlı olmasından esinlenmişti.

Ancak $SU(3)$ matematiğinde on elemanlı çoklu da bulunur. Bu sınıflandırma önerildiğinde spini $\frac{3}{2}$ olan dokuz baryon olduğu biliniyordu. (Bunlar rezonans oldukları için Tablo 1'de yer almazlar. Bunlardan dört tanesi daha önce sözünü ettiğimiz Δ rezonanslarıdır ve pionlara ve kararlı nükleonlara bozunurlar.) Parçacıkların temel özelliklerini gösteren acayiplik S'nin, izospin I_3'e göre grafiği çizilirse $SU(3)$ çokluları elde edilir. Tablo 2'de bunlardan birkaç tanesi görülmektedir.

Gell-Mann böylece onuncu baryon olan Omega-eksi Ω^-'nin varlığını önceden söylemiş oluyordu. Grafikteki dokuz baryonun kütlesi düzenli bir şekilde değiştiği için (kütle değişimleri basit bir kuvvetin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır), Gell-Mann Ω^-'nin kütlesini oldukça hassas bir şekilde bulabilirdi. Bununla birlikte, şimdi daha iyi anlaşılıyor ki, S acayiplik değeri en düşük -3 olduğundan, güçlü kuvvet korunum yasaları engellemese de Ω^-'nin bozunacağı herhangi bir parçacık yoktur. Bu yüzden Ω^- zayıf bir şekilde bozunur ve ömrü çoklunun diğer üyeleri gibi 10^{-23} saniye gibi kısa bir süre değil, tersine 10^{-10} saniye gibi uzun bir süre olmalıdır. Sonuç olarak, bu parçacık bozun-

madan önce birkaç santimetre yol aldığından kolaylıkla gözlenebilir. Gell-Mann'ın öngördüğü özellikleri taşıyan Ω^- 1964'de bulundu.

Tablo 2. *İki sekizli ve bir onlu*

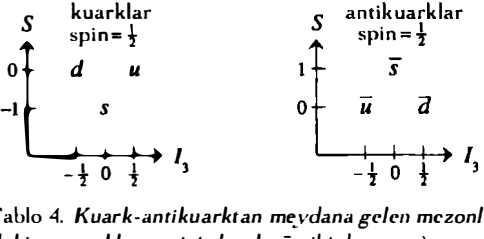


Diğer baryon ve mezonların da çoklu yapılara sahip olduğu ortaya çıkarıldı. Gell-Mann bu yapıların nasıl açıklanacağını da kavramıştı. Mezonların da baryonlar gibi "daha da temel" yapıtaşlarından meydana gelmiş olabileceğini ileri sürdü. Pasadena'da Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde çalışmakta olan Gell-Mann, aynı enstitüdeki Richard Feynman ile sık sık konuşma imkânına sahipti. Gell-Mann ve Feynman kişilikleri birbirlerinden oldukça farklı iki ünlü fizikçidir. Örneğin, Gell-Mann, kuş türleriyle yakından ilgilenen, sa-

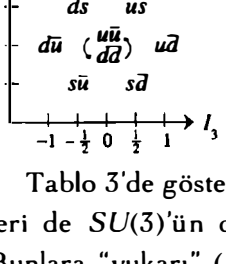
nat ve edebiyat hakkında çok rahat konuşabilen ve bildiği yabancı dillerden dolayı gurur duyan bir kimse olarak tanınır. Feynman ise kendi kendini yetiştirmiş, lafını sakınmayan ve yerleşik otoriteye benzeyen her şeyle alay etmeyi seven biridir. Doğru olmayabilir, fakat bana çok hoş gelen bir olay var: Gell-Mann, Feynman'a bir probleminin olduğunu söyler. Maddeyi meydana getiren yeni bir tür yapıtaşının varlığını ortaya attığını ve buna ne isim vermesi gerektiğini bilmediğini söyler. Kuşkusuz, bilimsel terminolojide adet olduğu üzere Latince ya da Yunanca sözcüklerden birini kullanmayı düşünmüş olmalıdır. Feynman cevap olarak "Saçma" der, "Sen burada daha önce hiç düşünülmemiş bir şeylerden bahsediyorsun. Güzel fakat modası geçmiş sözcükler uygun olmaz. Niçin onlara "vak vak" ya da buna benzer bir şey demiyorsun?"

Gell-Mann'a sorduğumda, Feynman ile arasında hiçbir zaman böyle bir konuşmanın geçmediğini söyledi. Her neyse, onlara kuark ismini verdi. Gell-Mann'ın açıklamasına göre kuark sözcüğü, James Joyce'un *Finnegan's Wake* adlı kitabındaki bir ifadeden alınmıştır: "Muster Mark'a üç kuark!" İşte bu. Bu parçacıklar üçer üçer bir araya gelmeyi sever. Tüm baryonlar üçer kuarktan meydana geldiği halde, mezonlar bir kuark ve antikuark çiftinden oluşmuştur.

Tablo 3. *Kuark ve antikuark üçlüleri*



Tablo 4. *Kuark-antikuarktan meydana gelen mezonlar (merkezdeki parçacıklar geçici olarak $s\bar{s}$ gibi davranır)*

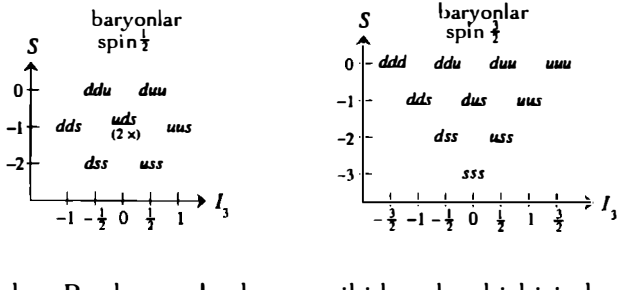


Tablo 3'de gösterildiği üzere, kuarkların kendileri de $SU(3)$'ün daha basit bir modeline uyar. Bunlara "yukarı" (u), "aşağı" (d) ve "acayip" (s) adlarını vereceğiz. "Sıradan parçacıklar" sadece yukarı ve/veya aşağı kuarklardan meydana gelmişlerdir. "Acayip" hadronlar bir ya da daha fazla s kuarkı (ya da $\bar{s}$ antikuarkı) içerir. Tablo 4, mezon sekizlisinin kuark ve antikuarklardan nasıl meydana geldiğini göstermektedir.*

$\frac{3}{2}$ spinli baryonların kuark yapıları Tablo 5'de gösterilmiştir. $\frac{1}{2}$ spinli baryonların niçin sadece sekizli model oluşturduklarını açıklamak daha zor-

* Üç kuark ve üç antikuarktan kuşkusuz dokuz mezon oluşturulması mümkündür. Fakat dokuzuncu mezon $u\bar{u}$'dan $d\bar{d}$ ve $s\bar{s}$'ye sürekli değişerek ayrıcalıklı bir davranış gösterir. η' denen bu mezon diğerlerinden epeyce ağırdır.

Tablo 5. *Baryonların kuark yapısı*



dur. Bu, baryonlarda en az iki kuarkın birbirinden farklı olması gerektiği olgusuyla ilgilidir.*

Aslında, hadronların basit temel yapıtaşlarından meydana geldiği fikri başkaları tarafından da düşünülmüştü. CalTech Pasedena'dan George Zweig da benzer bir fikre sahipti. O kendi yapıtaşlarına "aslar" adını verdi. Fakat "kuark" sözcüğü tuttu. Niçin bazı bilimsel isimlerin diğerlerine göre daha çok tutulduğunu açıklamak bazen zordur.

Ancak bu teorinin bazı acayip özellikleri vardı. Görünen o ki, kuarklar (ya da aslar) daima çiftli ya da üçlü bileşimler halinde bulunuyorlar ve tek başlarına hiçbir zaman gözlenmiyorlar. Deneyciler tek kuarkları özel olarak hazırlanmış dedektörlerde

* Bunu daha iyi anlayabiliriz. Her biri "spin yukarı" ya da "spin aşağı" durumunda bulunan üç cins kuarkımız varsa, o zaman toplam altı durum var demektir. Üç kuarkın bu şekildeki durumlarından meydana gelen toplam baryon sayısı elli altıdır. Onlunun her bir elemanının spini $\frac{1}{2}$ olduğundan, bu elemanlar spin ekseni etrafında dört değişik şekilde dönebilir (bu kuantum mekaniğinin daha fazla üzerinde durmayacağım ilginç özelliklerinden biridir). Sekizlinin üyelerinin spinleri $\frac{1}{2}$ olduğundan sadece iki değişik şekilde dönebilirler. Buradan şu sonuca ulaşırız: 56 = (4 x 10) + (2 x 8).

yakalamak için çok sayıda deney yaptılar, ama hiçbiri başarılı olamadı.

Eğer bir kuark tek başına diğerlerinden ayrılabilseydi, o zaman daha garip özellikler gösterebilirdi. Örneğin, elektrik yükleri ne olacaktı? Tüm *u* kuarklarının aynı elektrik yükü taşıdıklarını ve tüm *d* ile *s* kuarklarının da daima aynı elektrik yüküne sahip olduklarını varsaymak makul bir yaklaşımdır. Şimdi Tablo 5 ile Tablo 2'yi karşılaştırın. *d* ile *s* kuarklarının elektrik yüklerinin $-\frac{1}{3}$, *u* kuarkının elektrik yükünün ise $+\frac{2}{3}$ olduğunu göreceksiniz. Oysa biliyoruz ki, elektronun ya da protonun elektrik yüklerinin tam katına sahip olmayan parçacıklar hiçbir zaman gözlenmemiştir. Böyle parçacıklar var olsaydı, onları deneysel olarak gözlemek mümkün olurdu. Kuarkların deneysel olarak gözlenmemesinin nedeni, hadronlar içerisinde kuarkları birbirine bağlayan kuvvetlerin şaşırtıcı derecede etkili olmasıdır.

Kuarkların da dahil edilmesiyle atomaltı parçacıkların flora ve faunası daha anlaşılır hale geldi. Her ne kadar proton, nötron, elektron ve foton gibi parçacıklar Evren'de büyük miktarlarda bulunsa da, çoğu atomaltı parçacık Evren'de doğal olarak görülmez. Sybren S. de Groot, nötrinolar üzerine çalışırken onlara aşık olduğunu söylemişti. Ben ve öğrenci arkadaşlarım da bu parçacıkları sevdik. Davranışları çok gizemliydi. Leptonlar nokta parçacıklar olduğundan en basitleridir; an-

cak spinlerinden dolayı zayıf etkileşimler onlar üzerine çok karışık bir şekilde etki eder. Bununla birlikte, zayıf kuvvet leptonlar sayesinde çok iyi bir şekilde anlaşılmıştır.

Hadronlar daha da gizemliydi. Onlar arasındaki çarpışma süreçleri herhangi bir hatırı sayılır teoride bile çok karışıktı. Hadronları bir cins maddeden meydana gelmiş küçük küreler olarak düşünürsek, kuarkları nasıl anlayacağımız ve kuarkları niçin hadronların dışına çıkartamadığımız bir problem olarak ortada kalır.

IX. Bölüm

Alanlar mı Potin Bağları mı?

Zayıf kuvvetin 1958'den beri fenomenolojik bir teorisi vardı. Yani, zayıf kuvvetin bütün parçacıklar üzerine etkisini tüm koşullarda doğru olarak tanımlayan formüller bulunuyordu. Bu formüllerin sonuçları çok az bir yüzde hatayla o zamanki deneylerle uyumlu gözüküyordu. Bu teori hiçbir zaman temel bir teori olamazdı, çünkü yüksek enerjili sert çarpışma deneylerinde teorinin çalışmayacağı anlaşılmıştı. Öte yandan deneycilerin laboratuvarda böylesine yüksek enerjilere ulaşması için onlarca yıl geçmesi gerektiği de biliniyordu. Bu nedenle o zaman için bu "geçici" teori yeterli sayılabilirdi.

Güçlü kuvveti anlatan karmaşık fenomenolojik teoriler vardı. Bunların hiçbiri kusursuz olmadığından durum pek de iyi gözükmüyordu. Güçlü etkileşimlerin en anlaşılan tarafı, korunum yasalarından çıkan çeşitli simetri özellikleriydi. Acayiplik, izospin ve daha birkaç nicelik bu kuvvet altında tam olarak korunuyordu.

Elektromanyetik kuvvette ise durum belirgin bir şekilde diğerlerinden farklıydı. Elektromanyetik kuvvet uzak mesafeler boyunca yayılma özelliğine sahip olduğu için günlük olaylarda da algılanabilir. İngiliz fizikçi James Clerk Maxwell, elektrodinamiğin matematiksel formülünü daha 1873'de bulmuştu (bakınız Şekil 6).

Elektromanyetik kuvvetlerin etkilerini incelemek için en uygun parçacık elektrondur. Elektron güçlü kuvveti algılamayan bir leptondur. Kütlesi diğer pek çok parçacığın kütlesinden çok daha küçüktür; diğer parçacıkların elektron üzerindeki her türlü dolaylı etkisinin ihmal edilebilmesinin nedeninin tam olarak bu olduğu sonradan anlaşıldı. Zayıf kuvvet, elektronu etkilemesine etkiler de, üzerindeki etkisi öylesine zayıftır ki, burada zayıf kuvveti güvenle hesap dışı tutabiliriz. Çekirdek etrafında dönen elektronlar minyatür bir gezegen sistemine benzer. Elektronların bu hareketine neden olan elektromanyetik kuvvetin ta kendisidir.

Neden ilk olarak elektronlarla fotonlar arasındaki etkileşmenin temel teorisinin tamamlandığı kolay-

lıkla anlaşılabilir. Bu teoriye "kuantum elektrodinamiği" ya da QED denildi. Teoriyi kullanarak elektronun bütün özelliklerini en hassas şekilde hesaplayabilmiş olmak oldukça etkileyiciydi. Bunun en çarpıcı örneği, elektronun, elektromanyetik çift-kutup momentinin hesabıydı. Elektron, kendi ekseni etrafında döndüğü ve aynı zamanda elektrik yüküne sahip olduğu için minyatür bir mıknatıs gibi davranır. Elektronun kuantum mekaniksel denklemini özel görelilik teorisiyle de bağdaşacak şekilde ilk yazan Paul A.M. Dirac oldu. Dirac, bu küçük mıknatısın şiddetinin Doğa'nın bilinen sabitleri cinsinden hesaplanabileceğini gösterdi. Bu sabitler Plank sabiti, ışık hızı ve elektronun kütlesi ve elektrik yüküdür.

$$\mu = \frac{eh}{4\pi m_e}$$

Dirac'ın denklemi elektronu saran fotonların bazı dolaylı etkilerini ihmal etmektedir; bu etkiler daha sonra Julian Schwinger ve başkaları tarafından gittikçe artan hassasiyetle hesaplandı. Elektronun manyetik çift-kutup momentinin deneysel olarak ölçülmüş bugünkü değeri

$$1{,}00115965219 \pm 0{,}00000000001$$

ile sabitlerin Dirac tarafından verilen birleşiminin çarpımıdır. Kuantum elektrodinamiği hesaplarından çıkan sayı ise şudur:

$$1{,}00115965217 \pm 0{,}00000000003$$

Görebileceğiniz gibi, mümkün olabilecek en hassas değeri elde etmek için teoriyle deney sanki birbirleriyle yarış halinde. Bu sayılar arasındaki uyum oldukça mükemmel.* Bir karşılaştırma yapmak gerekirse, Dünya'dan Ay'a olan uzaklık yukarıdaki hassasiyete uygun bir şekilde ölçüldüğünde bulunacak hata milimetre düzeyinde olmalıdır. Teori biraz geriden geliyor gibi gözüküyor: Hesaptaki hata payı biraz daha büyük ve santimetre düzeyinde ancak bu hata elektronun yükünün saptanmasındaki belirsizlikten ileri geliyor.

Bu parlak sonuca ulaşmadan önce bazı zorlukların giderilmesi gerekiyordu. Temel parçacıklar teorisinin belli başlı özelliklerinden biri de parçacıkların "yaratılması" ve "yok edilmesi"dir. Bunun bir sonucu olarak, bir elektronla herhangi bir etkileşmeye giren toplam parçacık sayısı sürekli değişmektedir. Bu teoriye iki şekilde bakmak mümkün: Bir taraftan tüm süreçleri değişik yer ve zamanlarda yaratılan ve yok edilen parçacıklar cinsinden tanımlamaya alışığız; öte yandan bu süreçleri bir okyanusta birbirlerini kesen ve birbirlerini etkileyen dalgalar olarak düşünebiliriz. Bu dalgalara "alan" dalgaları denir. Her parçacığın kendisine karşılık gelen bir alanı vardır. Foton, elektromanyetik alana aittir. Elektronun ise çok ilginç bir "elektron alanı" ("Dirac alanı") vardır. Bu alanlar dalgaya benzeyen salınımlarıyla birbirlerine tepki gösterir-

* Bunlar 1995'in değerleridir.

ler ve bu davranışların tümü "alan denklemleri" ile belirlenir. Kuantum elektrodinamiği bu denklemlerin bilindiği ilk sistemdi ve bu yüzden bir "kuantum alan teorisi"nin de ilk örneği oldu.

1930'a kadar, fizikçiler çözülmesi gereken problemleri zaten fark etmişlerdi. Dirac, elektronun antiparçacığı olan pozitronun* gerekli olduğunu anladı. Pozitron 1932'de deneysel olarak Carl D. Anderson tarafından bulundu. Kuantum elektrodinamiği zaman içerisinde Paul Dirac, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga, Richard Feynman, Freeman Dyson ve başka pek çok fizikçi tarafından geliştirildi.

İlk zorluk, teorinin matematiksel olarak mükemmel bir şekilde ifade edilememesinden kaynaklanmaktaydı; teori bir seri yaklaştırımla gelişti, öyle ki, her yeni yaklaştırım bir öncekinden daha hassas olmasına karşın bunların hiçbiri "tam olarak" doğru değildi. Tüm yapıyı tehlikeye sokacak gibi görünen en büyük zorluk şuydu: Elektronun manyetik çift-kutup momentinin kesin değerini hesaplamak için gerekli "minik düzeltmeler" devamlı "sonsuz" çıkıyordu.

Kuşkusuz bu anlamsız bir şey; 1970 yılına gelindiğinde bilim adamları bu problemi nasıl çözeceklerini kavramışlardı. Kuantum elektrodinamiği

* Bazı dilbilimciler doğru sözcüğün poziton olması gerektiğini iddia ediyorlar. Çünkü bu parçacık eksi yüklü elektronun aksine "pozitrif" değil, pozitif yüke sahiptir. Ancak sözcük **pozi**-tif elek-**tron**'dan türetilmiştir.

renormalize edilebilir bir teoridir. Kabaca şu anlama geliyor (bu konuya tekrar tekrar döneceğim): Etrafında hiç foton olmayan "çıplak bir elektron" ile işe başlayalım. Gerçekte bir elektron çevresindeki fotonlardan ayrılamaz. Fakat biz şimdilik bunu görmezlikten geleceğiz. Çıplak bir elektronun belirli bir "çıplak" elektrik yükü ile "çıplak" bir kütlesi vardır. Bu çıplak elektronun manyetik momentini hesaplamaya çalışırsak maalesef sonsuz bir değer elde ederiz. Bu saçma bir şey. Ancak elektronun yakınına fotonlar yaklaştığında, hesaplamalar bu fotonların yeni elektronlar ve pozitronlar yarattığını gösterir. Bu olay doğrudan fark edilemez. Buna rağmen bu fazla parçacıklar elektron üzerine her türlü etki yapar. Her şeyden önce fazla parçacıklar, elektron yükünü nötrleştiren bir zırh gibi davranır. Bu olaya vakum polarizasyonu denir ve elektronun yükünün değişinesine neden olur. Bu değişimi hesaplamaya çalışırsak, sonuç ne yazık ki yine sonsuz çıkar. İkinci olarak, ilave fotonlar, elektronlar ve pozitronlar, elektronun kütlesini de etkiler (çünkü onlar enerji taşırlar, dolayısıyla kütleleri de vardır). Bu kütle değişimi de sonsuz çıkar. Kısaca şunu söylemek mümkün: Gerçek bir "fiziksel" elektronun gerçek yükü ve gerçek kütlesi, çıplak elektronun yükü ve kütlesinden oldukça farklıdır.

Teoriyi mükemmel bir şekilde formüle etmek istiyorsak şunu bilmeliyiz ki bir deneyci hiçbir za-

man çıplak elektronu incelemez. Deneyci yalnız fiziksel elektronu gözler ve sadece toplam yükü ile toplam kütlesini ölçer. Elektronun manyetik momentini anlatmak için kullandığımız Doğa sabitlerini göz önüne aldığımızda, çıplak elektrondan elde edilen değerler yerine sadece gözlenmiş değerleri kullanmalıyız. Özetle, elektronun manyetik momentini fiziksel elektronun gerçekten gözlenmiş yük ve kütlesiyle doğrudan karşılaştırmamız gerekir. Elektronun "çıplak" yükü ile kütlesini, bunlara karşılık gelen fiziksel olarak gözlenmiş değerlerle değiştirme işlemine "renormalizasyon" denir. Bu kurallara yeterince dikkat edersek, sürpriz bir şekilde, can sıkan sonsuzlukların birbirlerini götürdüklerini görürüz. Geriye elektronun manyetik çift-kutup moment şiddeti için çok yararlı bir ifade kalır ve buradan daha önce bahsedilen sayı elde edilir. Bu nedenle, sonsuzluklar elektronun içinde ya da ona etki eden kuvvetlerde değil, fakat bizim kuramsal bir şekilde önerdiğimiz çıplak elektrondadır. Çıplak kütle ile çıplak yük sonsuzdur (başka bir deyişle iyi tanımlanmamıştır) ve zaten bunları hiçbir zaman gözleyemeyiz.

Böyle bir yaklaşımdan herkesin memnun olduğu söylenemezdi. Ancak teori öylesine güzel sonuç verdi ki, karşıt görüşlü olanların sesleri bir şekilde bastırıldı. Doğa'nın diğer kuvvetleri için bundan çok daha az başarılı bir teori bile geliştirilebilseydi şüphesiz daha mutlu olurduk. Kitabın geri kalan

bölümlerinde, birçok kimseye şaşırtıcı gelse de, gerçekleşecek olanın tam da bu olduğu anlatılacaktır.

Buna rağmen 1970'de durum hiç de böyle görünmüyordu. Kuantum elektrodinamiğin başarılarından dolayı duyulan sevinç gittikçe azalmaya başlamıştı. Elektronun manyetik momentinde bir sonraki ondalık sayının değerinin hesabı oldukça karışık bir hal alırken, ilgi de kısmen azalıyordu. Anlaşıldığı kadarıyla zayıf kuvvet kesinlikle renormalize edilemezdi. Zayıf kuvvetten ileri gelen vakum polarizasyon etkilerini hesaplamaya çalışmanın bile yersiz olduğunu anlamak için formüle bakmak yeterliydi. Çünkü büyük bir olasılıkla sonsuzluklar birbirini götürmeyecekti. Zayıf kuvvetin vakumu polarize ederek yaratacağı parçacıkların tümüyle ihmal edilmesi gerekiyordu. Sonuçlar tam olarak değilse de yaklaşık bir şekilde doğru çıkıyordu.

Güçlü kuvvete gelince; belki de renormalize bir teorisi yapılabilirdi, ancak birbirini izleyen tahminler farklı sonuçlar vermeye devam edeceğinden bunun hiçbir yararı olmayacaktı. Bunun nedeni şu: kuvvet öylesine güçlü ki, her "düzeltme" bir öncekinden daha küçük olacağı yerde daha büyük çıkıyor. Bu durum topa yavaş vurmasını beceremeyen bir golf oyuncusunun yaptığı şeye benzetilebilir. Her vuruş topu hedeften daha uzağa götürür.

Birçok kimse "bu işler başka şekilde yapılmalı" diye düşünmeye başlamıştı. Bu şekilde düşünmeleri için bir yığın neden vardı. Birbiri arkasına gelen

yaklaştırımlar üzerine kurulmuş bir renormalizasyon teorisinde, çıplak parçacıklar ilk yaklaştırımda doğru çizgiler üzerinde serbestçe hareket etmelidir. Ama çıplak parçacıklar kuark olunca ne olacak? Onlar hiçbir zaman serbest olarak hareket edemezler! Onları ayıramazsınız ya da en azından onları serbest olarak gözleyemezsiniz. Belki de kuarklar parçacık bile değil, tersine hayaletlere benzeyen şeylerdir. Genel kanı, "onlar gerçek parçacıklar değil, matematiksel nesnelerdir; böyle bir teoriyi çok farklı bir biçimde ele almak gerekir" şeklindeydi. Bu nedenle değişik teoriler yapıldı: Bu soruların nihai çözümünü bulmada bunlardan bir kısmı çok yararlı olurken, bir kısmının da çözümle uzaktan yakından bir ilişkisi olmadı.

Aslında, bilimsel teorilerin geliştirilmesinde böylesine durumlar daha önce de yaşanmıştı ve ileride tekrar karşımıza çıkacaktır. Problem, tek başına kesin matematiksel yöntemler ve analizler kullanılarak veya en azından o zamanki bilgilerle çözülemezdi. Gelişmeyi sağlamanın tek yolu her tür sezgisel fikri kullanmaktan ibaretti. Çok sayıda gözlenmiş parçacığın varlığı ve bunlar hakkındaki yetersiz deneysel veriler, insan hayaline ciddi bir sınır koyuyordu. Bu parçacıkları teorik olarak kapsamlı bir şekilde anlamak imkânı var mıydı? Hiç kimsenin buna cevap vermesi mümkün değildi. Bununla birlikte fikir kıtlığı da yoktu. Çok şükür ki dünyamızda yeterli sayıda parlak fizikçi var.

İlk başta, renormalize alan teorilerinden usanmış fizikçilerin geliştirdiği *formel matematiksel* bir yaklaşım vardı. Matematiksel geçerliliği şüphe götüren bu teoriler o güne kadar bilinen parçacıklar ve kuvvetlerin çoğuna uygulanamaz durumdaydı. Bu yaklaşıma göre yalnızca şu parçacık durumları kullanılabilir: Bir çarpışma süreci meydana gelmeden önceki parçacıkların kuantum durumları yani "giren-durum", çarpışmadan sonra gözlenen parçacık durumları yani "çıkan-durum". Her çıkan-durum, her giren-durumdan elde edilemez. Kuantum mekaniği yasaları çeşitli kısıtlamalar koyar. Bu kısıtlamalardan biri de, giren-durum gerçekleşmeden çıkan-durumun olmayacağıdır. Buna neden-sonuç ilişkisi anlamına gelen "nedensellik" denir. Bu yaklaşımın özündeki matematiksel kavram *S*-matrisi* olarak bilinir.

Sonsuz sayıda parçacık bulunabileceği sonradan anlaşıldı (sadece Tablo 1'de gösterilenler değil, aynı zamanda muhtemelen sonsuz sayıda rezonans, yani kısa ömürlü atomaltı parçacıklar vardır). Bu yaklaşımda bazı parçacıklara "temel" parçacık, bazılarına da "kompozit" (birleşik) parçacık demenin bir anlamı yoktu. Örneğin, delta rezonansı ("Δ") bir proton ile bir piona bozunur. Ya da bir proton başka bir parçacıkla çarpışır ve enerjisi artarsa, bir

* "S" parçacıklar arasındaki çarpışmadan ileri gelen saçılma (scattering) için kullanılan harf. Durumlar, matematiksel vektörler olarak ele alınır. Bir matris vektörleri birbirine dönüştüren sayılardan meydana gelmiş kare şeklinde tablodur.

delta ile birkaç piona bozunabilir. O zaman deltanın bir proton ile bir piondan meydana geldiği söylenebilir mi? Yoksa olaya tam tersinden bakıp, bir protonun bir delta ile bir piondan meydana geldiğini mi söylemek gerekir? Bütün ilginiz *S*-matrisinde toplanmışsa böyle bir sorunun anlamı yoktur.

Potin bağlarıyla kendi kendini yukarıya çekmeye çalışan mitolojik bir karaktere benzetilerek, bu teoriye "potin bağları" teorisi denildi. Bu teorinin öncülerinden biri, "holizmin" oldukça şüphe götürür bir çeşidini kullanarak teoriyi canlandırmaya çalıştı: Parçacık ailesi çok büyük bir sistem olduğundan, onu daha da temel alt birimlere ayırmaya çalışmak gereksizdir.

Doğru çizgide olsun ya da olmasın, bu tür araştırmalar *S*-matrisini anlamak için gerekli matematiksel yapı ve özelliklerin ortaya çıkmasına yol açtı. *S*-matris teorisinin öncülerinden biri de dayım Nico van Kampen'di. Van Kampen, Hans Kramers ve Ralph Kronig gibi Hollandalı iki fizikçinin fikirlerini geliştirerek 1950'lerin başında şöyle bir sonuca ulaştı: *S*-matrisi, özel görelilik yasalarına ve nedenselliğe uyuyorsa, buradan dispersiyon (dağılma) bağıntıları denen denklemler çıkar. Van Kampen, keskin zekâsı, geniş teorik fizik bilgisi ve azimli çalışmasıyla Hollanda'nın en çok saygı duyulan teorik fizikçilerinden biriydi ve benim de ilham kaynağımdı. Öğrenciyken, teorik fizikle ilgili olgunlaşmamış teorilerimle sık sık odasına dalar-

dım. Genel tepkisi, başlangıç noktası olarak kullandığım soruları yeniden formüle etmek olurdu ve çoğu kez benim o güzel fikirlerim derhal buhar olup uçar giderdi.

Van Kampen, dağılma denklemlerinin parçacık özelliklerini "ispat etmek" amacıyla kötüye kullanılmasına sinirlenirdi. Dayım daha sonra bu işi tamamen bıraktı ve sonuç olarak *S*-matris teorisi parçacık özelliklerini nicel olarak anlamaya yeterli olmadı. Zengin simetri yapıları *S*-matrisinden çıkarılamıyor ve kuarklar bir sır gibi ortada kalıyordu.

Temel parçacıkların yapısını gerçekten anlayabilmek için matematiksel teorilere yeni bir şeyler eklenmesi gerekiyordu: Bunlar, gözlenen simetri yapısı ile parçacıkların uyduğu ilgili korunum yasalarıydı. Kabaca, her korunum yasasının (enerji, acayiplik, baryon sayısı ve benzeri büyüklüklerin korunumu) parçacıklar sisteminde daima bir "simetri"ye karşılık geldiği söylenebilir. Bu kural 1918 yılında, tanınmış matematikçi Emmy Noether (1882-1935) tarafından alan denklemlerinin bir özelliği olarak ortaya çıkarıldı.

Korunan niceliklerden biri olan elektrik yükü, bir yerden başka bir yere hareket ederse elektrik akımı adı verilen bir şey meydana gelir. Acayiplik ve izospin gibi diğer tüm korunan büyüklüklerin de benzer "akımlar" meydana getirmesi gerekir ve bu akımlar hassas bir şekilde tanımlanabilir. Bunlar S-matris teorisiyle birleştirildiğinde "akım cebi-

ri" denen şey ortaya çıktı. Akım cebiri kısa sürede olaya yeni bir bakış açısı getirdi. Yüklü pionların bozunmasındaki giz buna örnek gösterilebilir. Bu parçacıklar hemen hemen her zaman müon ile antimüon nötrinosuna bozunurlar. Elektron (ya da pozitron) ile elektron nötrinosuna bozundukları çok nadirdir. Sebep ne? Üstelik elektron hafif olmasının dışında, müona ikiz kardeşi gibi benziyor.

Pion bozunmasında müonun yeğlenmesinin nedeni, pion içerisindeki bir cins akımdan ileri gelmektedir. Eksenel vektor akımı denen bu akım, pion içinde elektron, müon ve nötrino akımları yaratır. Matematiksel ifadeler bunların nasıl oluştuğunu tam olarak verir. Bir pion leptonlara bozunurken eksenel vektör akımı kapanır ve leptonik akım devreye girer. Bu olay lepton çiftleri duşu olarak yorumlanır. Belirli bir spin yönelimiyle bir lepton çiftinin meydana gelme olasılığı kesin bir şekilde hesaplanabilir; sonuçta, olasılığın yüklü leptonun kütlesinin karesi ile doğru orantılı olduğu ortaya çıkar. Müon elektrondan yaklaşık 200 kere daha ağırdır. Bu nedenle pionun müon ve onun antinötrinosuna bozunma etkinliği elektronun etkinliğinden 200 x 200 = 40.000 kat fazladır.

Buna benzer birçok bağıntı, akım cebirini kullanarak açıklanabilen parçacık özelliklerinde bulundu. Özellikle zayıf bozunmaların çoğu, bozunan parçacıkların içerisindeki akımların esasen aynı oldukları varsayımından hareket ederek çok hassas

bir şekilde hesaplanabiliyordu. Bununla birlikte, parçacıkların yaptığı her şey bu şekilde açıklanabilecek gibi görünmüyordu. Daha önce de söylendiği üzere, hadronlar birbirleriyle çarpışan bilardo topları gibi hareket ederler. Bu bilardo topları ne kadar büyük ve sert acaba? Birbirlerini ne şiddetle çeker ya da iterler? Bütün bu sorulara cevap vermek imkânsız gibi görünüyordu. Şimdi alanlar teorisine tekrar dönmeye ne dersiniz?

Elimizdeki zayıf kuvvet teorisi, ilk olarak 1934'de Enrico Fermi tarafından yazılmıştı. Fermi, zayıf etkileşim süreçlerinde görülen her tür geçişi veren en genel ifadeyi yazmıştı. Formül, deneyle kıyaslanarak tek tek ortadan kaldırılabilecek bir yığın farklı olasılıklara izin veriyordu. Sonunda (bazı yanlış anlama ve yanlış iddialardan sonra) bir tek matematiksel ifade kaldı. Bu son formül, George Sudarshan ve Robert Marshak ile bunlardan bağımsız olarak Richard Feynman ve Murray Gell-Mann tarafından bulundu. Bu formüle göre tüm parçacıklarda bulunabilecek belirli bir çeşit akım, aynı noktada başka bir akım meydana getirir. İşte bu akım, önceki parçacıkların bozunacağı parçacıkları yaratır. Maalesef, "akım-akım teorisi" denen bu teori, kesinlikle renormalize edilemezdi. Bir akım sadece aynı noktada başka bir akımın meydana gelmesine neden oluyorsa, elektromanyetizmada olduğu gibi bunun bir kuvvetten çıktığını düşünebilirsiniz. Ancak bu kuvvetin menzili son

derece kısa olmalıdır. Böyle bir teoride şüphe yok ki vakum polarizasyonu meydana gelir. Ancak bu polarizasyon çıplak parçacıklara, başlangıçtaki kuvvetlerden farklı ve sonsuz kuvvetler uygular. Burada sonsuzlukların birbirini götürmesi için çıplak parçacıkların özelliklerini yeniden nasıl tanımlayacağımızı bilmiyoruz. Aslında bu şu demek: Teorinin sonlu ve anlamlı sonuçlar vermesini ve gerekli düzeltmeleri hesaplamak istiyorsanız, o zaman mevcut kuvvetlere bilinmeyen yeni kuvvetler eklemeniz gerekir. Böylece bir hesaba bir yığın bilinmeyen özellikler sokar, sonunda tamamen anlamsız bir cevap bulursunuz: Bu düzeltme kuvvetlerinin ne kadar büyük olduğunu söyleyecek hiçbir yöntem yoktur.

O dönemde bazı araştırmacılar sonradan da tekrar edilen bir hata yaptılar (bugün bile bu hataya devam ediliyor!): Matematiksel yöntemlerin yetersiz olduğunu düşündüler. Denklemi bir başka şekilde yazarak, düzeltme terimlerini farklı bir sıraya koyarak ve benzeri yöntemlerle teoriyi bir şekilde geliştirerek anlamlı sonuçlar elde etmeyi beklediler. Matematiğin yanlış denklemleri doğru denklemlere dönüştürebileceğini düşünme hatasına düştüler; böyle bir şey olamazdı. Doğru denklemlerle başladığımızı varsaymak için hiçbir neden yoktu.

Sonunda tutunacak tek bir dal kaldı: Çok az sayıda "temel alan"la başlanan zayıf kuvvetin renor-

malize bir alan teorisini aramak. Bu temel alanların bazıları birleştirilerek diğer alanlar meydana getirilebilir. Şöyle de söylenebilir: Birkaç "temel" parçacık önerilir ve diğer parçacıklar bunlardan oluşturulur.

Çoğu parçacık fizikçisi bunu modası geçmiş bir fikir olarak gördü. Sadece bir avuç inatçı fizikçi bu fikirlerle vakit öldürüyordu. Çoğunluk, renormalizasyon yöntemini çirkin ve yapmacık buluyordu. Niçin bazı parçacıklar temel de, diğerleri değil? Üstelik, hesapların art arda yaklaştırımlarla yapıldığı ve sonsuz kuvvetlerin birbirlerini dengelediği bir teoriyi istemiyorlardı. İstenilen şey, birdenbire tam bir teorinin ortaya çıkmasıydı.

1960'larda yayımlanan makalelere dönüp baktığımızda, renormalizasyon hakkında her kim konuşma yapmış ya da makale yazmışsa, genellikle uzun bir özür diledikten sonra giriş yapmıştır. Renormalizasyonun büyük bir ihtimalle çıkmaz bir yol olduğu kuşkusuz biliniyordu, ama kim bilir belki de bu fikirler sonuçta bir işe yarayabilirdi.

Cenevre yakınında kurulmuş Avrupa (alt-) nükleer araştırma merkezi, CERN, içinde sadece maddenin yapıtaşlarını derinlemesine inceleyen fizikçilerin çalıştığı ve dev laboratuvarların bulunduğu bir yer değildir, aynı zamanda teori bölümü vardır. Orada deney ortamına çok yakın olmanın etkisiyle, sonsuz kuvvetlerin birbirini götüreceği gerçeğini kavramış teorisyenler vardı. Bunlar, deneyi an-

layabilmek için ayrıntılı hesapların rutin olarak yapılması gerektiğinin farkındaydılar.

1969'da CERN'de, Sheldon L. Glashow (onunla tekrar karşılaşacağız), John Iliopoulos ve Luciano Maiani, önemi anında fark edilmeyen fakat sonradan olacaklar üzerinde önemli rol oynayacak bir makale yazdılar. Bilinen yukarı, aşağı ve acayip kuarklara dördüncü bir kuark eklediklerinde, sonsuz kuvvetlerin birbirlerini eskisinden daha iyi götürdüğünü fark ettiler (buna rağmen teori halen renormalize değildi). Böyle bir dördüncü kuark, Glashow ve James D. Bjorken tarafından daha önce önerilmişti. Ortaya çıkan simetriyi öylesine tılsımlı buldular ki, önerdikleri yeni kuarka "tılsım" dediler. Iliopoulos ve Maiani, bu ismin kullanılmasından son derece mutluydu; "tılsımlı" aynı zamanda "büyüleyici" demekti. Sanki bir büyüyle sonsuz kuvvetler birbirlerini yok ediyorlardı.

Bununla birlikte GIM mekanizması adı verilen şey, zayıf etkileşimler için yeni bir renormalize teori anlamına gelmiyordu. Kendini bütünüyle, tamamen renormalize bir teoriyi inşa etmeye adamış tek bir insan vardı: O zamanlar Utrecht Üniversitesi'ne teorik fizik profesörü olarak yeni atanan olan Martinus Veltman. Veltman soyut matematik konusunda uyanık birisiydi. Temel parçacıklara gerçekte ne olduğunu anlamak için pragmatik bir yaklaşımın gerekliliğine inanıyordu. Utrecht'e gel-

meden önce, orada kaon'u bilen hiç kimsenin bulunmadığını iddia etmişti. Bu durum zamanla değişecekti. Veltman, yeni şeyler öğrenmek ve tartışmak için sık sık CERN'e ve Paris'e giderdi. Niçin bu sonsuz kuvvetler birbirlerini böylesine güzel bir şekilde götürüyor? Sonsuz kuvvetlere rağmen niçin zayıf kuvvetin etkileri akım cebiri kurallarına çok iyi uyuyor? Niçin müon elektrona çok benziyor? GIM mekanizması ne kadar hassas iş görüyor? Veltman, CERN'de John Bell ile bu konuda birçok fikir alışverişinde buluyordu.

Utrecht'te sınavlarımı verdikten sonra temel parçacıklar konusunda çalışmak üzere doktoraya devam etmek istedim. Bu arada dayım teorik fizikte başka bir konuya geçmişti ve Veltman benim hocam oldu.

Size Veltman'ı, hem kütleçekim teorisine hem de karışık modern yönteme hakimiyetini gösteren bir küçük olayla tanıtmak istiyorum. Tamamen dolu bir asansöre son girenlerden biri de Veltman olmuştu. Asansörün düğmesine basıldığında, sesle birlikte bir sinyal yanıp sönmeye başladı: fazla yük. Veltman, asansöre giren hem son, hem de en ağır kişi olduğundan bütün bakışlar ona çevrildi. Fakat Veltman inmesi gerektiği görüşünde değildi. "Evet" dediğimde düğmeye basın diye seslendi. Dizlerini büktü ve onun cüssesindeki birinden beklenmeyecek bir şekilde zıpladı. "EVET" dedi ve asansör hareket etti. Veltman yere indiğinde,

motor asansörü hareket ettirecek kadar hız kazanmıştı.*

Her neyse, ben alanlar teorisi çalışmaya başladım. İnsanlar Veltman'a, kendisinin ve öğrencilerinin fiziğin eski ve ıssız köşelerinin tozunu aldığını söylüyorlardı. Ne kadar tozlu ve ıssız olduğunu bundan sonraki bölümlerde göreceksiniz.

* Ben de o asansördeydim.

X. Bölüm

Yang-Mills Bonanza

Parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvetler teorisinin başarılarının henüz taze liğini yitirmediği 1954 yılına geri dönmeliyiz. Bilim adamları o dönemde, keşfedilmemiş çok sayıdaki parçacık topluluğunun yaratabileceği problemlerden ürkmeden, fizikte basit, zarif ve evrensel ilkeleri arıyorlardı.

Parçacıklar arasındaki elektromanyetik kuvvetlerin tüm özellikleri elektrik ve manyetik alanların sağladığı denklemlerden çıkarılabilir. Bunlar vektör alanlarıdır. Bir "vektör" sadece büyüklüğü ile değil, aynı zamanda yönü ile belirtilen bir niceliktir

ve onu tanımlamak için birkaç sayı (genellikle üç sayı) gerekir. "Alan" demek, bu sayıların uzayda ve zamanda değişik değerler alabilmesi demektir. Atmosferdeki rüzgâr hızına bir vektör alanı diyebiliriz. Rüzgârı anlatmak için önce kuzeye doğru ne kadar havanın estiğini göstermeniz gerekir (hava güneye doğru esiyorsa bu sayının önüne bir eksi işareti koyarsınız); ikinci olarak doğu batı yönündeki hareketi belirlersiniz; sonunda dikey bileşene karşılık gelen bir sayı bulursunuz.

Bütün olarak ele alındığında, elektromanyetik alanın altı bileşeni vardır. Ancak bunlar istenildiği gibi seçilemez. Tıpkı rüzgârın hız bileşenlerinin civardaki hava basıncı dağılımı ile ilişkili olması gibi, bu sayılar "alan denklemleri" nedeniyle birbirlerine bağlıdırlar. Havanın basıncını biliyorsanız rüzgârın her yöndeki hızını hesaplayabilirsiniz. Elektromanyetik alan için de buna benzer bir şey var: Üç sayı yerine, hava basıncına benzer bir şekilde tek bir sayıyla belirlenen elektrik potansiyel alanını tanımlayabilirsiniz. Alanlar zamana bağlı ise ve ayrıca manyetik alan da bulunuyorsa, o zaman bir vektör potansiyel alanı gerekir. Hepsi birden ele alınınca dört potansiyel alanı var demektir. Matematikçiler üç bileşenli vektörlerle nasıl kolayca işlem yapabiliyorsa, dört bileşenli vektörlerle de pekâlâ hesap yapabilirler. Bu yüzden potansiyel alanlarını birlikte ele alıyoruz ve onlara "4-vektör potansiyeli" diyoruz. 4-vektör potansiyelinin değe-

rini her yerde biliyorsanız, elektrik ve manyetik alan bileşenlerini (altı tane) bu potansiyelden türetebilirsiniz.

Bununla birlikte 4-vektör potansiyeli ile ilgili acayip bir durum var. Bu potansiyel doğrudan gözlenemez. Daha açık bir şekilde söylemek gerekirse, her noktada aynı elektromanyetik alanı veren çok sayıda 4-vektör potansiyel alanı yazılabilir ve bu yüzden deneyciler bunları birbirlerinden ayırt edemezler. Örneğin, Dünya'ya 100.000 voltluk bir potansiyel uygulanabilir ve elektrik prizinin iki deliğindeki potansiyeller sırasıyla 100.000 volt ve 100.220 volt olabilir. 220 voltluk bulaşık makinem normal çalışır ve beni elektrik çarpmaz.

Şimdi diyebilirsiniz ki, bu keyfilik 4-vektör potansiyelini neredeyse gereksiz kılar, ancak gerçekte bunun tersi doğrudur. Temel parçacıklar için yazılan denklemler, 4-vektör potansiyeli kullanıldığında hem çok güzel hem de çok basit bir hal alır. Ayar değişmezliği dediğimiz keyfilikten herhangi bir zarar gelmez.

Uygulamada ayar değişmezliği çok işe yarar. Örneğin çok karışık bir hesap yaptığınızda herhangi bir hatanın olup olmadığını kontrol etmek isterseniz ayar değişmezliğini kullanabilirsiniz. Yapacağınız iş 4-vektör potansiyelini görünmez bir şekilde değiştirmektir. Buna biz ayar dönüşümü diyoruz. Hangi parçacık yaratılırsa yaratılsın, ne miktarda ve hangi yönde olursa olsun, sonucun de-

ğişmemesi gerekir. Başka bir deyişle, bu parçacıkların adlarını değiştirmiş bile olsak, deneyde bir önceki durum ile bunun arasında bir fark görülemez. Bulaşık makinesi örneğine tekrar dönelim. Makinenin ne kadar gürültü yaptığını hesapladığımızda elde edeceğimiz sonuç, prizin her iki deliğine 100.000 volt eklemekle değişmeyecektir.

Ayar değişmezliği kuantum elektrodinamiği teorisinde anahtar görevi görür. Benzer bir ilke Einstein'ın kütleçekimi teorisinde de bulunabilir. Orada uzay ve zaman noktasının koordinatları istenildiği gibi seçilebilir. Bununla birlikte, deney yapan kişinin gözlediği fiziksel olay, uzay ve zaman noktalarına bağlı olmamalıdır.

1954 yılına kadar sadece iki kuvvette çok iyi anlaşılmış olan ayar değişmezliği öylesine önemli bir ilkeydi ki, başka kuvvetler için de benzer "ayar teorileri" geliştirmek çok doğal sayılıyordu. İşte bu ilke, aynı yıl Chen Ning Yang ile genç meslektaşı Robert Mills'in yaptığı çok şık bir hesabın çıkış noktası oldu. Sonradan anlaşıldığına göre, başkaları da benzer çalışmalar yapmışlardı. İngiltere'deki Cambridge Üniversitesi'nden Abdus Salam'ın öğrencisi olan Ronald Shaw, Yang-Mills makalesi çıktığında tezini tamamlamak üzereydi. Tezinin bir bölümünde anlattığı sonuçlar Yang ve Mills'in sonuçlarıyla hemen hemen aynıydı. Ancak bu çalışma hiçbir zaman yayımlanmadı. Shaw, görünüşte yenilgiyi kabul etmiş oldu. Günümüzde bilim

adamlarının çoğu yenilgiyi çabuk kabul etmiyor. Böyle durumlarda, sonradan buluşlarını "bağımsız olarak" yaptıklarını iddia etmek için çalışmalarını çabucak yayımlamaya uğraşıyorlar. Günümüzde, bilim adamları da tıpkı futbolcular gibi çok saldırgan oluyor.

Yang ve Mills'in önerdiği şey, ayar dönüşümlerini genişletmekti. 4-vektör potansiyel alanına daha fazla bileşenler eklendiğinde, bunu yapmak mümkün oldu. İlk ilginç durum, dört bileşen yerine on iki bileşenli bir potansiyel alanının ortaya çıkmasıydı. Böyle bir teoride, Yang-Mills alanları denen üç çeşit elektrik alanı ve üç çeşit manyetik alan vardır.

Yang ve Mills'in ileri sürdüğü teoriyi destekleyen güçlü kanıtlar bulmak zordu. Bu çalışmalar, o zamana kadar gözlenmiş olan parçacıkların davranışlarındaki herhangi bir özelliği açıklamak için yapılmış bir teşebbüs olarak düşünülmemelidir. Yaptıkları hesap, soyut ve gerçekçi olamayacak kadar basit ve bir "hayal âlemi" olarak algılanabilecek bir çalışmaydı. Bu çalışma, teorik fizikte giderek alışkanlık haline gelen ve matematiksel bilgimizi derinleştirmek şeklinde görülmesi gereken bir cins alıştırmadır. Bu durumda bir "model"den bahsediyoruz demektir. Aslında, "teori" sözcüğünü, bir model bir gerçeği (muhtemelen idealize edilmiş olan gerçeği) anlattığını iddia ettiği zaman kullanmalıyız. Ne yazık ki "model" ve "teori" sözcükleri günümüzdeki

yayınlarda sıkça birbirine karıştırılıyor. Yazarlar, yaptıkları çalışmalarda gerçek dünyayı anlamak için en küçük bir girişimde bulunmasalar bile, çalışmalarına "teori" demekten kaçınmıyorlar.

Yang-Mills modeli gerçek dünyadaki herhangi bir şeye uygulanabilir mi? Sonunda anlaşıldı ki, Yang-Mills hayal dünyasında üç cins foton vardır. Bunlardan biri az çok normal fotona benzer. Diğerleri pozitif ve negatif elektrik yüklüdürler. Aslında bunların üçü de birbirine eşittir: Ayar dönüşümleriyle birbirlerine dönüşürler.

Bu durumda şöyle bir soru sorulabilir: Yang-Mills fotonlarına özdeş elektrik yüklü parçacıklar var mı? Yang ve Mills'in baştan da kabul ettikleri gibi, böyle parçacıklar elbette yoktu. Tıpkı normal foton gibi, elektrik yüklü fotonların da spinleri 1 ve durgun kütleleri sıfır olmalıdır. Evet, öyledir. İster çok hafif, isterse kütlesiz olsun elektrik yüklü parçacıkların herhangi bir elektrik prizinden bol bol akması gerekir. Bu parçacıkları yaratmak için çok az enerji gerektiğine göre parçacıklar kendiliğinden ortaya çıkınalı ve herhangi bir yerdeki elektrik alanını nötrleştirmeye çalışmalıdır.

Spini 1 olan elektrik yüklü parçacıklar gerçekten var ama onlar kütleli. En iyi bilinen örnek, 770 MeV kütleli rho-rezonansıdır (ρ). Bu parçacık 1954 yılına kadar keşfedilmemişti ama var olduğu tahmin ediliyordu. Elektrik yüklü iki rezonans ρ^+ ve ρ^- ve bir de yüksüz ρ^0 rezonansı vardır. Acaba

alan denklemlerine birkaç terim ekleyerek Yang-Mills fotonunun kütlesini sıfır yerine 770 MeV yapacak şekilde teoriyi değiştirebilir miyiz? Yang ve Mills bunu denedi. Ancak ayar değişmezliğinin kaybolduğunu hemen gördüler. Bu güzel bir şey değil. Bu şekilde değiştirilmiş bir teorinin çelişkilerden uzak olduğu kuşku götürür. Özetle söylersek, Yang-Mills modeli çok parlaktı, ancak tabiatla bir ilişkisi olmadığından hemen unutuldu.

Buna rağmen Yang-Mills makalesi önemli bir rol oynamaya devam etti. Çoğu araştırmacı böyle güzel denklemleri veren bu temel fikrin önemini kavradığı halde, gerçek âlemde bu denklemlerin neye karşılık geldiğini kimse bilmiyordu. Örneğin Gell-Mann, kuark hipotezini önerdiğinde bu teoriden oldukça etkilenmişti, hatta zayıf kuvvet için yazılan Feynman-Gell-Mann formulü de bir çeşit Yang-Mills ilkesini işaret ediyordu.

Martinus Veltman'ın 1960'ların sonunda Cenevre'de John Bell ile tartıştığı konu buydu. Zayıf kuvvet tüm parçacıklar için niçin böylesine evrensel görünüyor? Bütün parçacıklar için elektrik yüklerinin evrensel olması da rastlantıdan öte bir şey mi? (Parçacıkların çok azında iki birim yük bulunur.) Olup bitenlerin tümünü Yang-Mills denklemleriyle daha iyi anlayabiliriz. Her şeyden önce, Yang-Mills teorisi elektromanyetik teorinin doğrudan doğruya genişletilmiş haliydi. Tıpkı elektromanyetizmada olduğu gibi, zayıf kuvvet bir

korunum yasasına uyar gibi görünen bir yük üzerine etki eder. Ancak, tersine, burada elektrik yükü elektronun evrensel yükünün tam katları olarak görünmektedir. Şimdi bu, yalnız başına bir elektrodinamik teoriden ziyade, genişletilmiş bir Yang-Mills sisteminin karakteristik bir özelliği olarak ortaya çıkıyor. İhtiyaç duyulan şey, Yang-Mills formalizmi üzerine oturtulmuş elektromanyetik teori ile zayıf kuvvetin bir birleşik teorisi gibi görünüyordu.

Bu arada CERN'deki fizikçiler başka bir problemi çözmüşlerdi. Hadronlar için ölçülmüş olan zayıf kuvvet, leptonlardaki zayıf kuvvete karşılaştırıldığında yüzde birkaç kez daha zayıf bulunuyordu. Bu kuvvet evrensel olmaya yakın ama belki de tam evrensel değil? Bu nasıl olur? Nicola Cabibbo, 1963'de bu farklılığın kökenini buldu.[*] Cabibbo'nun hesabına göre, normal hadronlar (acayip olmayan) zayıf kuvveti acayip hadronlarla bölüşmek durumundaydı. Bu kuvvet hadronlar üzerinde sanki bir miktar kaydırılmış gibi davranıyor. Acayip hadronların, acayip olmayan hadronlara zayıf kuvvet aracılığıyla dönüşmesinin nedeni bu kaydırmadan ileri geliyor. Kuvvetin geriye kalan kısmı acayip olmayan hadronlar üzerine etki ettiği için toplamdan belirli bir yüzde eksik kalıyor.

[*] Cabibbo modelinin özü, ondan birkaç yıl önce Gell-Mann ile Maurice Lévy'nin zayıf etkileşimleri de içeren bir parçacık modeli hakkında birlikte yaptıkları yayının dipnotunda verilmişti.

Veltman, Yang-Mills teorisinin hiç olmazsa bir kısım özelliğinin tabiatla bir ilişkisi olması gerektiğine inanıyordu. Bunun için sadece bu yüklü fotonlara bir şekilde kütle verilmesi gerekiyordu. Bir kuvvetin taşınmasından sorumlu olan bir parçacığa ("kuvvet taşıyıcısı") belirli bir kütle verilirse, o zaman bu parçacık tarafından iletilen kuvvetin menzili sınırlı olur. Bu genellikle geçerli bir ilkedir. Kütle ne kadar artarsa, menzil de o oranda kısalır. Gell-Mann ve Feynman'ın yaptığı zayıf kuvvet teorisine göre, zayıf bir akım, aynı noktada ve aynı anda sanki son derece küçük bir menzilde bir kuvvet etki ediyormuş gibi başka bir akım doğurur. Böyle bir kuvveti bir fotonun çok ağır bir çeşidinin taşıyabileceği genellikle biliniyordu. Buna zayıf kuvvetin "ara vektör bozon teorisi" deniyordu ve W^+ ve onun antiparçacığı W^- diye gösterilen elektrik yüklü, spinleri 1 olan çok ağır parçacıkları içeriyordu.

Her zayıf etkileşim süreci, birbiri arkasından gelen iki etkileşimin bir sonucu olarak ele alınabilir. Önce bir parçacık, üyesi bulunduğu bir çoklunun bir elemanına dönüşür (örneğin bir nötron bir protona dönüşür) ve bu noktada bir W parçacığı yaratır. Bu W'nun kütlesi aşırı derecede büyük ve bu geçişte W yaratılırken serbest kalan enerji genelde çok küçük olduğundan, W çok kısa bir süre varlığını sürdürür ve bu arada ikinci bir etkileşime sebep olur. W'ya başka bir parçacık tarafından yutu-

lur ve üyesi bulunduğu çoklunun başka bir elemanına dönüşür ya da bir parçacık ve antiparçacığa bozunabilir. Örneğin, Şekil 11 (*b*)'de görüldüğü gibi, bir elektron (*e*) ile bir antinötrinoya (ν_e) dönüşebilir.

Şimdi Yang-Mills denklemlerini ele alsak ve yüklü fotonlara kütle verecek şekilde bir miktar değiştirsek ne olur? Bu durumda ayar değişmezliği yaklaşık olarak doğrudur. Doğada böyle bir şeyi başka bir yerde görmüştük. Sadece yaklaşık olarak doğru olan çok çeşitli simetriler vardır. Örneğin, daha önce, proton ve nötronun eşit bir şekilde ele alındığı izospin simetrisini görmüştük; oysa proton ve nötronun kütlelerinin birbirine tam olarak eşit olmadığını biliyoruz.

Veltman, ayar değişmezliğini koruyan terimler içeren ve ayar değişmezliğini korumayan tek bir terimi bulunan Yang-Mills denklemlerini incelemeye karar verdi. Böyle bir teoriden kaynaklanan bir sistem daha önce Richard Feynman tarafından çalışılmıştı. Ancak Feynman'ın çıkış noktası tamamen farklıydı.

Feynman'ın yaptığını anlamak için geriye, 1961'e gitmeliyiz. O dönemde, teorik parçacık fiziğinin en zor problemlerinden birinin, belki de en zorunun, Einstein'ın genel göreliliği ile kuantum mekaniği kurallarını bağdaştırabilmek olduğu biliniyordu. Feynman şansını bir denemek istedi. Problemin bugün bile çözülememiş olduğunu bil-

seydi, acaba yine de dener miydi? Her neyse, kütleçekim teorisindeki en basit hesapların bile son derece karışık ifadelere yol açtığını hemen fark etti. Bu sefer araya Gell-Mann girerek Feynman'a bazı yararlı önerilerde bulundu: Mademki ayar değişmezliği, kütleçekimi teorisinin koordinat değişmezliğine çok benziyordu, Feynman neden yeteneklerini önce teknik olarak kütleçekimi hesaplarından çok daha kolay olan Yang-Mills teorisinde sınamıyordu? Tıpkı Yang-Mills teorisi gibi kütleçekimi teorisi de graviton denilen ayar bozonlarına sahiptir. Bu "kuvvet taşıyan parçacıklar"ın her ikisi de, yani Yang-Mills teorisinin bozonları ile graviton, ışık hızıyla hareket eden kütlesiz parçacıklardır.

Feynman böylece dikkatini Yang-Mills teorisine çevirdi. Ayar bozonlarının kütlesiz olmaları canını sıkıyordu. Bu parçacıklara "son derece küçük" bir kütle vermenin hiçbir zararı olmayacağını düşündü. Belirli bir kurala bağlı kalmaksızın bu parçacıkların denklemlerine küçük bir kütle terimi ekledi ve hesap yapmaya başladı (Veltman da daha sonra aynı terim üzerinde çalışacaktır). Feynman, karışık hesapları ve kanıtları basite indirgeyen gerçek bir uzmandı. Teoriye "hayalet parçacıklar" eklendiğinde kuralların basitleşeceğini keşfetti. Parçacıklar çarpıştıklarında ortaya çıkan "son durum", birçok ara etkileşimin bir sonucudur. Eğer bazı terimler özel bir yöntemle birbirini götürürse ilave parçacıkların geçici olarak yaratılıp arkasından

yok edildiği bir manzara ile karşılaşırız. Bunlar hayalet parçacıklarıdır. Ancak çarpışmadan geriye kalanlar deneycilerin gözleyebileceği "fiziksel" parçacıklardır.

Feynman çalışmasını bitirmedi. Birinci düzeltme terimlerinden sonra gelen düzeltme terimlerinin gerçekten çok karışık olduğunu gördü. Bu çalışmayla ilgili tek yayın Feynman'ın 1962'de Polonya'da verdiği ders notlarıdır. Notlar bir öğrenci tarafından tutulmuş ve bunlar *Acta Physica Polonica* isimli bilimsel dergide yayımlanmıştır.

Bu Polonya derslerini izleyenler arasında Bryce DeWitt (ataları Hollandalı olan bir Amerikalı) de vardı. DeWitt, Yang-Mills problemiyle değil, kuantum kütleçekimiyle ilgileniyordu. Ders notlarından DeWitt'in Feynman'ı hesaplarının ayrıntılarını vermesi için nasıl ikna etmeye çalıştığını okumak ilginç gelebilir. Feynman'a göre, kimsenin izleyemeyeceği karmaşık ve uzun formülleri tahtaya yazmak kadar anlamsız bir şey olamazdı. Ancak DeWitt ısrarını sürdürdü. Sonunda Feynman razı oldu ve "ben de herkes gibi uzun ve karışık formülleri tahtaya yazabilirim" dedikten sonra gerçekten ilginç ayrıntıları vermeye başladı.

DeWitt sonunda Feynman'ın yaptıklarını çok iyi bir şekilde anlamış oldu ve Feynman'ın takıldığı noktadan itibaren çalışmalarını sürdürdü. Hesap yöntemlerini geliştirdi ve her aşamada peş peşe gelen düzeltmeler için doğru hesaplama kuralları bul-

du. 1960'da sadece sonuçları yayımladı. Ancak bu yayın, anlaşılması o dönemde zor olduğundan, çok az kimsenin dikkatini çekti. Sonuçların tam olarak doğru olmadığı sonradan anlaşıldı. DeWitt 1967'de üç makale halinde hesaplarının tümünü yayımladı. Bu makaleler öylesine uzun ve ayrıntılıydı ki, insan okumaya başlamadan, okuma cesaretini yitiriyordu. Doğru kuralları nasıl çıkardığını çok sonradan anladık; bu makalelerde başkaları tarafından sonradan kullanılan modern yöntemlere çok yakın yöntemler vardı.

Bu arada başkaları da kütleçekimi/Yang-Mills problemiyle ilgilenmeye başlamıştı. Kaliforniya'da Stanley Mandelstam'ın kendine özgü çok farklı bir yaklaşımı vardı. Feynman'ın hayalet parçacıkları da dahil, Feynman kurallarına kaynaklık eden kütleçekimi ve Yang-Mills teorisi için yeni bir yaklaşımı olduğunu iddia ediyordu. SSCB'de de gruplar vardı. Moskova'da çeşitli bilim adamları bir hayli ilerleme kaydetmişlerdi; Leningrad'da Ludwig D.Faddeev ve Victor N.Popov, Mandelstam kurallarıyla hemen hemen aynı kurallar öne sürdüler. Kanıtları çok ciddi bir çalışma yaptıkları hissini veriyordu (bu nedenle Veltman, buna şüphe ile bakıyordu). İlk yayınları kısa, çok açık ve anlaşılması oldukça kolaydı.

Bu konuda çalışabilirdik, ama henüz her şey düzene girmiş değildi. Mandelstam kuralları Rusların bulduğu kurallarla tıpatıp aynı değildi. Üstelik bunların hepsi Feynman'ın bulduğundan 2 kat

farklıydı. Feynman sonradan, "iki çarpanına kim aldırır" diyecektir (böyle önemsiz ayrıntılara kafa yormak Feynman'ın tabiatına uygun değildi). Oysa şimdi kütle terimi içeren Feynman teorisinin, DeWitt, Mandelstam ve Rusların yaptıklarından temelde farklı olduğu için bu 2 çarpanının ortaya çıktığını ve bu yüzden Feynman'ın çalışmasını devam ettiremediğini biliyoruz.

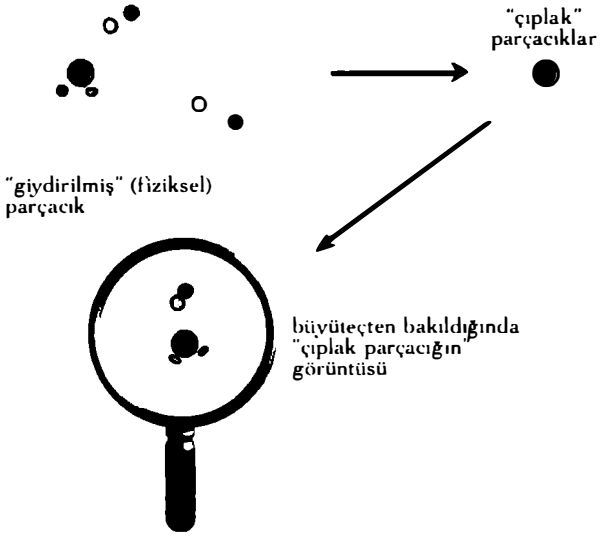
Yang-Mills teorisi ile kütleçekimi teorisi arasında da temel bir ayrılığın var olduğu sonradan anlaşıldı. Yang-Mills teorisinin kuralları bir renormalizasyon programıyla uyumlu olmasına uyumluydu, ama bu program kütleçekimi için hiçbir zaman çalışmayacaktı. Kütleçekiminde sonsuz seride sonsuz karşıt terim bulunması gerekiyordu ve bu kuvvetlerin fiziksel özelliğini anlamadığımız sürece güçlü bir teori yapabilmemiz mümkün olmayacaktı. Bu yüzden kütleçekimi teorisini şimdilik bir yana bırakıp Yang-Mills sistemine dönelim.

Veltman'ın istediği şey şuydu: İçinde kütle terimi de bulunan öyle bir Yang-Mills teorisi yapılsın ki renormalize bir teori ortaya çıksın. Bu Feynman'ın başlayıp başarıyla tamamlayamadığı modelin tıpatıp aynısıydı. Oysa öbürlerinin modelleri tamamen kütlesiz terimleri içeriyordu. Veltman, Feynman'ın yöntemini kullanarak sadece birinci düzeltme teriminin uygulanabileceğini biliyordu. Bu terimler bu teorinin gerçekten renormalize olması gerektiği izlenimini uyandırıyordu. Her şeye

rağmen Feynman'ın eklediği kütle terimi ilk bakışta çok masum görünüyordu. Bununla birlikte, başkalarının çalışmalarının bu modele uygulanabilmesi ise mümkün görünmüyordu. Veltman bir bataklığa saplanmış gibiydi. Denklemler çok zor değil, ancak çok uzundu. Gerekli, fakat sıkıcı olan hesapları şu ya da bu şekilde yapmak bilgisayarda mümkün olmalıydı. Yüksek mertebeden düzeltmeler teoriden şüphe götürmeyecek bir şekilde elde edilmeliydi. Yapılması gereken şey, daha önce IX. Bölüm'de anlattığım "dağılma bağıntılarını" kullanmak olmalıydı.

Veltman, cebirsel hesaplar için bilgisayar programları yazarak bu işe öncülük yaptı. Sonunda bilgisayar programları kusursuz bir şekilde çalışmaya başladığında bir düş kırıklığı ortaya çıktı: Sonsuz kuvvetler birbirini götürmüyordu. Bir başka deyişle, "kütleli Yang-Mills teorisi" renormalize edilemiyor, dolayısıyla zayıf kuvvet için anlamsız bir teori ortaya çıkıyordu.

Niçin temel parçacıkların bazı teorileri renormalize olabiliyor da diğerleri olamıyor? Durumu anlamak için I. Bölüm'ü anımsayalım. Orada kendi evrenimizi bir büyüteçten bakarak görebileceğimiz yorumunda bulunmuş ve küçükler âleminin, büyükler âleminin bir kopyası olduğunu söylemiştik. Bu durum temel parçacıklar âleminde de geçerlidir. Küçük bir ölçekte parçacıklar büyük bir ölçektekine benzer şekilde davranırlar (yine de bu boyutlar,



Şekil 9.

bir atom çekirdeğinin boyutundan daha küçük olmalıdır). Örneğin, elektromanyetik kuvvetler aynı denklemlere uymaya devam eder. Büyük ölçekte "çıplak" bir parçacık gibi görülen şey, "mikroskop" ile bakıldığında fotona benzeyen diğer parçacıklar tarafından çevrilmiş gibi görünür. Mikroskop altında da çıplak görülen bir parçacığı daha iyi görmek için onu biraz daha soymak gerekir. Renormalizasyon felsefesinin çalışma ilkesi budur: "Çıplak" parçacık kavramı sadece göreli bir kavramdır. Uygulamada mikroskopla baktığımız giydirilmiş bir parçacık, çıplak bir parçacık gibi davranıyorsa bu teori renormalize edilebilir bir teoridir.

Mikroskoptan bakıldığında değişen tek şey parçacığın kütlesidir (teorik fizik diliyle söylersek, bir ölçek dönüşümü gerçekleşir). Bunun nedeni, bir kuvvetin menzilinin mikroskop altında daha büyük görünmesidir. Bu yüzden parçacığın kütlesi daha küçük görünür. Normal yaşamda bunun tersine tanık oluruz: Mikroskopla bir kum tanesine baktığımızda kum tanesi daha büyük görünür (Dolayısıyla daha ağır?).

Bütün bu tartışmalardan şu sonuç çıkar: Bir Yang-Mills teorisinde bir ölçek dönüşümü yaptığınızda kütle terimi yok oluyormuş gibi görünür. Bu gösteriyor ki bir mikroskop altında ayar değişmezliği geçerliliğini koruyor. Veltman'ın karşılaştığı zorluğun gerçek kaynağı budur. Yang-Mills vektör potansiyeli doğrudan gözlenebilir mi, yoksa gözlenemez mi? Büyükler âleminde gözlenebilir gibi görünse de, küçükler âleminde gözlenemez. Bu bir çelişkidir ve bu tür bir yaklaşımın niçin tam olarak çalışmadığını açıklar.

Süperiletken Boş Uzay: Higgs-Kibble Makinesi

Bir çıkış yolu vardı! Ancak bu çıkış yolunu, teorik fiziğin tamamen farklı bir dalı, çok düşük sıcaklıklardaki metallerin fiziği, sağladı. Çok düşük sıcaklıklarda "kuantum olayının" oldukça ilginç etkileri vardır. Bu etkileri anlatmak için temel parçacıklar fiziğinde kullanılan yöntemlere tıpatıp benzeyen kuantize alan teorileri kullanılır. Temel parçacıklar fiziğinin düşük sıcaklıklar fiziği ile hiçbir ilişkisi yoktur. Ancak kullanılan matematik birbirine çok benzer!

Düşük sıcaklıklarda önem kazanan bazı maddelerdeki "alan", atomların kendi denge konumları

etrafında nasıl salınım yaptıklarını gösteren alan ya da bu maddelerdeki elektronları anlatan alan olabilir. Çok düşük sıcaklıklarda bu alanların "kuantumlarıyla" ilgilenmemiz gerekir. Örneğin, "fonon" sesin kuantumudur. Bazı sayıların farklı olması dışında, fononun davranışı ışığın kuantumu olan fotonun davranışına benzer: Fonon saniyede yüzlerce ya da binlerce metre yol alarak ses hızıyla hareket eder; foton 300.000 km/saniye olan ışık hızıyla, yani sesten bir milyon kere daha hızlı hareket eder! İlgi alanımız olan temel parçacıklar genelde ışık hızına yakın hızlara sahiptir.

Aşırı soğutulmuş metallerde meydana gelen çok ilginç "kuantum olayları"ndan birine süperiletkenlik denir; süperiletken maddede elektrik akımına karşı koyan direnç tamamen yok olur. Bunun bir sonucu olarak, madde en küçük bir elektrik potansiyeline bile izin vermez, çünkü elektrik potansiyeli hemen "ideal" bir elektrik akımı tarafından nötralize edilir. Üstelik bu madde manyetik alanların varlığına da izin vermez, çünkü Maxwell denklemlerine göre manyetik alanın yaratılması indüksiyon akımlarının oluşmasına neden olur. Bu akımlar herhangi bir dirençle karşılaşmadıkları zaman, manyetik alanı nötrleştirir. Bu yüzden bir süperiletken içinde elektrik ya da manyetik alan yaratılamaz. Süperiletken çok güçlü mıknatıs alanlarının etkisi altında kaldığı zaman ortaya çıkan indüklenmiş akım çok şiddetli olursa bu durum değişir; bu

durumda süperiletkenlik bozulmuş olur. Kaba kuvvete karşı koyamayacağı için, metal süperiletkenliğini kaybeder ve manyetik alanın içeriye girmesine engel olamaz.

Bir süperiletkenin temel parçacıklarla ne ilişkisi olabilir? Süperiletken bir madde, içinde elektromanyetik alanın çok kısa menzilli bir alan olarak ele alınabileceği bir sistemdir. Alan perdelenmiş durumdadır ve üstelik Maxwell alanı olduğu için de bir ayar alanıdır. İşte bu olay, parçacıklar arasındaki zayıf kuvveti bir ayar teorisi olarak tanımlamak isteyen biri için süperiletkeni ilginç kılar! Teorik fiziğin çok güzel bir özelliği! Birbirinden tamamen farklı iki dünya benzer matematiksel denklemlere uydukları için birbirleriyle karşılaştırılabiliyor.

Süperiletken nasıl işliyor? Bu çok özel olayın gerçek nedeni John Bardeen, Leon N. Cooper ve John R. Schrieffer tarafından çözüldü (1972'de bu çalışmalarından dolayı Nobel Ödülü aldılar). Bir katı madde içindeki elektronlar iki özel duruma uyarsa süperiletkenlik meydana gelir: Bunlardan birincisi eşleşme ve ikincisi *Bose yoğunlaşmasıdır*.

"Eşleşme" elektronların çiftler oluşturması ve fononların bu çiftleri bir arada tutan kuvveti yaratması sonucunda elektronların çiftler halinde hareket etmesi anlamına gelir. Bir çiftteki iki elektrondan ("Cooper çifti") her biri kendi ekseni etrafında döner. Bunlardan birisi bir yönde, öbürü zıt yönde

döndüğünden çiftin net bir dönmesi ("açısal momentum") olmaz. Bir Cooper çifti, spini 0 ve elektrik yükü –2 olan bir "parçacık" * gibi davranır.

"Bose yoğunlaşması" tipik bir kuantum mekaniksel olaydır. Yalnız tam sayı spinli (bozon) parçacıklara uygulanır. Bozonlar en düşük enerji durumlarına koyunlar gibi sürüler halinde hep birlikte geçerler. Bozonların aynı şeyi birlikte yapmak istediklerini hatırlayınız. En düşük enerji durumunda hâlâ hareket edebilirler, ancak bunlardan daha fazla enerji alınamaz. Bunun doğal bir sonucu olarak harekete karşı bir direnme yoktur. Cooper çiftleri, serbest olarak hareket ettikleri için elektrik akımı meydana gelir ve bunlara karşı koyacak bir direnç yoktur. Benzer bir olay çok düşük sıcaklıklarda sıvı helyumda görülür. Burada helyum atomları Bose yoğunlaşmasına uğrar. Bunun sonucu olarak, sıvı hiçbir direnç görmeden en küçük bir delikten bile akabilir.**

Spinleri $\frac{1}{2}$ olduğundan elektronlar Bose yoğunlaşması yapmazlar. Pauli ilkesi gereği spinleri bir tam sayı artı yarım olan parçacıkların (fermiyon)

* Böyle bir çiftteki elektronlar son derece gevşek bir şekilde birbirlerine bağlıdır. Durum, çok hareketli pop müziğinin çalındığı bir dans pistine benzer: Kimin kimle çift oluşturduğunu anlamak mümkün değildir. Daha sonraları Schrieffer bu teorinin niçin bu kadar zor olduğunu açıkladı: Bir milyon kere bir milyon kere bir milyondan fazla dans eden çiftin bulunduğu bir dans için koreografi yazmak gerekir.

** Ancak akan atomların hızı belirli bir sınırın altında olmalıdır. Yalnızca hız bu sınırın altında olduğunda direnç sıfır olur.

değişik kuantum durumunda bulunmaları gerekir. İşte bu yüzden, süperiletkenlik yalnız çift oluşumu meydana geldiğinde ortaya çıkar. Evet, bunun akla birkaç soru getireceğinin farkındayım, bunun için baştan özür dilerim. Yine formülleri sözcükler halinde vermeye çalıştım. Bu yüzden söylediklerim yeterince tatminkâr olmayabilir. Bunu bir bakıma karışık "kuantum mantığının" bir kusuru olarak görebilirsiniz!

Süperiletkenliğin temel parçacıklar için önemi, Belçikalı François Englert, Amerikalı Robert Brout ve İngiliz Peter Higgs tarafından fark edildi. Bunlar, spini olmayan elektrik yüklü parçacıkların Bose yoğunlaşmasına uğrayacakları bir model önerdiler. Ancak yoğunlaşma bu defa bir madde içerisinde değil, boş uzayın ("vakum") kendi içinde meydana gelmektedir. Bu parçacıklar arasındaki kuvvetler öyle özel bir şekilde oluşur ki, vakumu boş bırakmak yerine doldurmak üzere enerji depo ederler. Bu parçacıklar doğrudan gözlenemez. Bu fiziksel durumu uzay-zamanın Higgs parçacıklarıyla (şimdi böyle diyorlar) cızırdadığı, ancak enerjinin olabildiğince az olduğu ve uzay-zamanın tamamen boşmuş gibi göründüğü bir durum olarak algılayacağız.

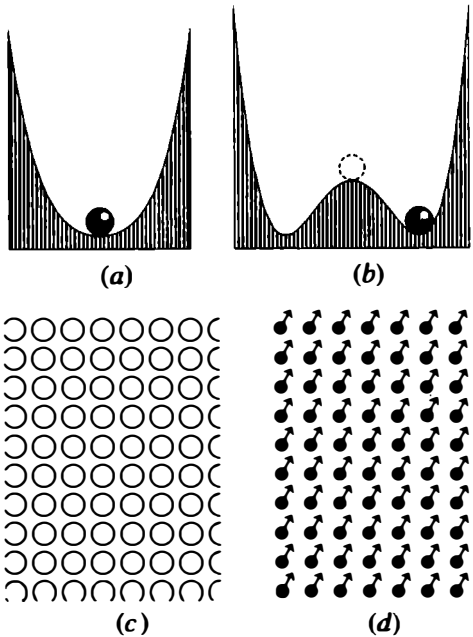
Higgs parçacıkları "Higgs alanının" kuantumlarıdır. Higgs alanı öyle bir alan ki, alan sıfır olduğunda değil de, sıfırdan farklı bir değere sahip olduğu zaman en düşük enerji durumunda olur. Boş uzay diye algıladığımız, alanın mümkün olan en

düşük enerji düzeyine sahip olduğu durumdur. Alandan parçacık kavramına geçersek, boş uzay aslında tamamen Higgs parçacıklarıyla doldurulmuş demektir. Yani Higgs parçacıkları "Bose yoğunlaşmasına" uğramışlardır.

Bu boş uzayın bir süperiletkenin içine benzeyen çok sayıda özelliği vardır. Burada da elektromanyetik alanın menzili kısadır. Çünkü böyle bir dünyada fotonun bir miktar durgun kütlesi vardır.

Üstelik burada tam bir ayar simetrisi var; yani ayar değişmezliği hiçbir yerde bozulmaz. Böylece, ayar değişmezliğini bozmadan bir fotonun "kütleli" bir parçacığa nasıl dönüştürüldüğünü öğrenmiş olduk. Bütün yapmamız gereken şey, denklemlerimize Higgs parçacıklarını eklemektir. Ayar değişmezliğinin fotonun özellikleri üzerindeki etkisinin böylesine farklı olmasının nedeni, Higgs alanının vakum durumunda bulunması yüzünden denklemlerin tamamen değiştirilmesidir. Bazen "vakum durumunun simetriyi kendiliğinden bozduğu" söylenir. Aslında bu doğru değil, ancak olay diğer durumlardaki kendiliğinden simetri bozulmasıyla yakından ilgilidir.

Higgs, yalnız "normal" elektromanyetik alanı ele almıştı. Kuşkusuz biliyoruz ki, gerçek vakumdaki normal fotonun durgun kütlesi yoktur. Bir Yang-Mills teorisine normal elektrik yükü yerine Yang-Mills yükü taşıyan spinsiz bir parçacık ekleyerek ve bu parçacığın Bose yoğunlaşmasına uğradığını



Şekil 10. Simetri ve simetrinin kendiliğinden bozulması. Simetrik denklem sisteminin kararlı ve simetrik bir çözümü olabilir (*a*) ya da sistem kendini simetrik olmayan bir çözümde bulabilir (*b*). Bir alanın simetrik bir çözümü varsa, tasvir ettiği fiziksel sistem simetriktir (*c*). Kararlı çözüm simetrik değilse, bu fiziksel sistem de simetrik olmayan bir yapı gösterir (*d*).

kabul ederek, teoriyi süperiletken hale getirmeyi akıl eden Thomas Kibble oldu. Bu durumda Yang-Mills kuvvetleri kısa bir menzilde etki eder ve Yang-Mills fotonları, spini 1 olan kütleli parçacıklar haline gelir.

Şimdi bu, bir önceki bölümdeki problemin ideal çözümü değil mi? Yang-Mills fotonları kütle kazandığı halde ayar ilkesi geçerliliğini koruyor! Öy-

le sanıyorum ki, bu yaklaşımın başlangıçta layık olduğu ilgiyi görmemesinin iki nedeni vardı. Birincisi, fizikçiler bu yaklaşımın çirkin olduğunu düşündüler. Ayar ilkesi geçerli olduğu halde problemin can alıcı kısmını teşkil etmiyordu. Higgs alanı teoriye "elle" konulmuştu ve Higgs parçacığının kendisi bir "ayar parçacığı" değildi. Böyle bir duruma izin veriliyorsa niçin bir yığın keyfi parçacık ve alan teoriye sokulmasındı? Bu fikirler fazla temel anlamı olmayan basit oyuncak modeller olarak görüldü.

İkinci olarak, ortada "Goldstone teoremi" diye bir şey vardı. "Kendiliğinden simetri bozulmasının" olduğu parçacık modelleri daha önce de önerilmiş, ancak Jeffrey Goldstone, bu tip modellerin büyük bir kısmının her zaman spinsiz ve kütlesiz parçacıklar içereceğini kanıtlamıştı. Bu yüzden çoğu araştırmacı, Higgs teorisinin zorunlu olarak kütlesiz bir Goldstone parçacığı içereceğini ve bunun bir bela olacağını düşünüyordu. Çünkü bildiğimiz parçacıklar arasında hiçbir Goldstone parçacığı yoktu.* Goldstone'un kendisi bile, Higgs modelinin Golstone teoreminin koşullarına uymadığı uyarısında bulunmuştu (yani Goldstone teoremi böyle bir durum için geçerli olmayabilirdi). Ancak herkes Goldstone teoremindeki tutarlı matematiksel ispattan öylesine etkilenmişti ki, Higgs-Kibble modeli uzun bir süre ilgi çekmedi.

* Kısmen Goldstone parçacıkları gibi davranan parçacıklar var: bir sonraki bölüme bakın!

Böylece Goldstone teoremi bir "karşıt teorem" olarak kullanıldı: Boş uzay simetrik değilse kütlesiz ve spinsiz parçacıklardan kaçınamazsınız. Bizim duruma gelince, biliyoruz ki, küçük bir değişiklik teoremi işlemez hale getiriyor; ayar değişmezliği yüzünden Goldstone parçacıkları görünmez hale geliyor. Bunlar Feynman'ın kendi hesaplarında karşılaştığı "hayalet parçacıklardan" başka bir şey olamaz. Unutmayınız ki, Higgs mekanizmasının gerçekten kendiliğinden bozulan bir simetri olmadığını daha önce söylemiştim.

Yang-Mills sisteminin zayıf kuvvetten, Higgs-Kibble mekanizmasının ise kısa menzilden sorumlu olduğu gerçekçi parçacık modellerinin yapılabileceği, önde gelen iki araştırmacı tarafından ve birbirlerinden bağımsız olarak ortaya atıldı. Bunlardan biri Pakistanlı Abdus Salam'dı. Salam, parçacıklar için estetik modeller arıyordu ve Yang-Mills düşüncesi öylesine güzeldi ki, bundan yararlanarak zayıf etkileşimler için bir model yapma girişiminde bulundu. Zayıf kuvvetin taşıyıcısı Yang-Mills fotonu olmalıydı ve Salam'a göre bu taşıyıcının bir miktar durgun kütleye sahip olması konusunda sadece Higgs-Kibble mekanizması kabul edilebilir bir açıklama getiriyordu.

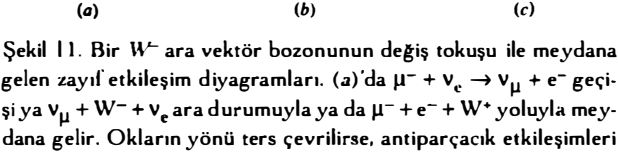
İsveç Nobel komitesince desteklenen 1968'deki bir toplantıda, Salam, meslektaşı John Ward ile uzun zamandır üzerinde durdukları çalışmayı açıkladı. Bu konuşma ve konuşmayla ilgili tartışmalar

yayımlandı ve hemen arkasından, bu teorinin renormalize olup olmadığı sorusu, incelenmesi gereken en önemli konu olarak ortaya çıktı. Salam, yanıtın olumlu yönde olduğunu seziyordu, ancak herhangi bir ayrıntılı ispat bulamamıştı. Feynman kurallarını formüle edebilmiş değildi ve bu teori yüzeysel olarak ele alındığında, her şeyi alt üst edecek hayalet parçacıklarıyla doluymuş gibi olduğunu itiraf etti. Herhangi bir deneyde böyle parçacıkların yaratılma olasılığı hesaplandığında ya "negatif bir olasılık" bulunuyor ya da enerjinin kendisi negatif çıkıyordu. Mantıklı bir teori için her iki sonuç da kabul edilemez.

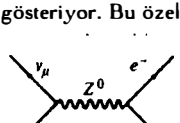
Diğer bir araştırmacı, Amerikalı Steven Weinberg de aşağı yukarı aynı sonuca varmıştı. Bununla birlikte Weinberg, bir önemli adım daha atmıştı; içinde ne tür alanların bulunduğunu ve birbirleriyle nasıl etkileştiklerini ayrıntılı bir şekilde gösteren basit bir model ortaya çıkarmıştı. Ancak kendisini leptonlarla sınırlamıştı. Weinberg, normal fotonun dışında üç ağır Yang-Mills fotonunun bulunması gerektiğini fark etti: biri artı yüklü, diğeri eksi yüklü ve üçüncüsü de yüksüzdü. Herkes, zayıf etkileşimleri anlatmak için yüklü fotonların gerekli olduğu görüşündeydi; bunlar şu ünlü W^+ ve W^- ara vektör bozonları olmalıydı. Weinberg'e göre, bunların kütleleri 60.000 MeV'den fazlaydı. Bu yüklü vektör bozonları, yalnız başına o zamanki tüm zayıf etkileşim süreçlerini açıklamak için yeterliydi. Bun-

lara ve normal foton γ'dan başka bir de yüksüz bileşene gereksinim duyuluyordu. Weinberg'in Z^0'dediği bu parçacığın niçin gerekli olduğu açık değildi. Z^0'ın kütlesinin yüklü bozonların kütlesinden bir miktar daha fazla olması gerektiği belirtilmişti. Şekil 11'de zayıf etkileşimlerin nasıl meydana geleceği gösterilmektedir. Bununla birlikte, "yüksüz" değiş tokuş sürecinin hiç gözlenmediği çok iyi biliniyordu. Bu yüzden Şekil 11(*c*)'de gösterilen diyagramın şu ya da bu nedenle yasaklanması gerekiyordu!

Yüksüz Z^0 parçacığının varlığına inanmak isteyenler için bu bir problemdi. π^- ile K_{Uzun}'un ömürleri karşılaştırıldığı zaman bu problem daha da göze çarpıyordu. Niçin pion bir μ^- ile bir ν_μ'ya bozu-



Şekil 11. Bir $W^\pm$ ara vektör bozonunun değiş tokuşu ile meydana gelen zayıf etkileşim diyagramları. (*a*)'da $\mu^- + \nu_e \rightarrow \nu_\mu + e^-$ geçişi ya $\nu_\mu + W^- + \nu_e$ ara durumuyla ya da $\mu^- + e^- + W^+$ yoluyla meydana gelir. Okların yönü ters çevrilirse, antiparçacık etkileşimleri elde edilir. Bu durumda diyagram μ^-'nin $\nu_\mu + e^- + \overline{\nu}_e$ (antinötrino)'ya nasıl bozunduğunu gösterir. (*b*)'de $n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e$ ve (*c*)'de Σ^+'ın bir yüksüz kuvvet taşıyıcısı aracılığıyla bozunmasını gösteriyor. Bu özel bozunma süreci gözlenmiş değil!



Şekil 12. Yüksüz bir Z^0 parçacığı değiş tokuş edilirse müonik nötrinolar, elektronlarla yalnız esnek olarak çarpışır.

nuyor da, daha uzun ömrüne rağmen K_{Uzun}, bir Z^0 aracılığıyla örneğin bir μ^+ ile bir μ^-'ye hiç bozunmuyor? Her şeye rağmen, Weinberg, Yang-Mills sisteminin sıkı matematiksel kurallarının, yüksüz Z^0 parçacıklarını yayan bir akımın varlığını şüphe götürmeyecek bir şekilde gerektirdiğini fark etti. Hadronlarla ilgili kısmın henüz bir düzene girmediğini varsaydı. İşte bu yüzden makalesinin başlığını "Leptonlar İçin bir Model" olarak seçti. Leptonlar açısından bakılınca, yüksüz Z^0 parçacığının varlığını gerektiren önemli yenilik Şekil 12'de gösterilen $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ çarpışma süreciydi.

Weinberg bu yüzden teorisinin deneyle sınanabileceği sonucuna vardı. Bu yönde nötrino deneyleri yapılmış olsa da, bu tür etkileşimlerin varlığı henüz belli değildi. Aslında, elektron nötrinolarının elektronlarla çarpışma etkinliği Z^0 değiş tokuşu katkısıyla değişse de, bu süreç yüklü ara bozonlar aracılığıyla da gerçekleşebilirdi.

Weinberg bu teorinin renormalize olabileceğini varsayıyordu ama ayrıntılı matematiksel kurallarla kanıtlamış değildi. Bütün bunlar 1967'de olmuştu. 1970'e gelindiğinde hem Weinberg hem de Salam, Yang-Mills teorisinden soğumuşlardı. Şekil 11'de görülen diyagramların dışında, hâkim rol oynayan başka diyagramların da bulunduğu yeni zayıf etkileşim teorileri ortaya atılmıştı. Bu teorilerde sonsuz sayıda diyagram bulunabiliyor, negatif olasılıklara ya da nedenselliğin bir miktar bozulmasına izin ve-

rilebiliyordu. Şimdi geriye dönüp bakınca bu tür çalışmaların neden başarısız kaldığını anlamak kolay, ancak o dönemde tüm seçeneklerin üzerinde durulması gerekiyordu.

Benim gibi genç bir araştırmacı için yeterince bilgi birikimi vardı. Başkalarıyla karşılaştırıldığında daha az okudum ama daha çok düşündüm. Sonunda herkesce bilinen bir şeyi yeniden keşfetmek durumunda kalacak da olsam, bu şekilde uzun ve derinlemesine düşünme tehlikesini göze aldım. Bu, temel problemlerin içini dışını daha iyi anlamamı sağladı. Bu şekilde Higgs-Kibble mekanizmasıyla karşılaştım (bu mekanizma için o zaman bu ismin kullanılması gerektiğini bilmiyordum). Veltman, bu görüşler konusunda çok şüpheciydi; onu boş uzayın gerçekten görülmez parçacıklarla doldurulmuş olduğuna inandırmak kolay değildi. "Bunların kütleçekim alanları varlıklarını açığa çıkarmaz mı?" diye soruyordu. Teori şu şekilde formüle edilebilir: Bu kütleçekimi alanları başka görünmez parçacıklar tarafından ya da boş uzayın kendisinin gizemli katkısından dolayı yok edilebilir. Doğanın, bu kütleçekimi etkilerini tamamen ve etkin bir şekilde nasıl gizlediğinin halen farkında değiliz. Bu problem günümüzde de güncelliğini koruyor. Bana kalırsa, bunun çözümünün, kuantum kütleçekimi teorisinin kendisini iyice anlayacağımız bir zamana kadar ertelenmesi gerekir. Henüz ortalıkta bir çözüm yok.

XII. Bölüm

Modeller

Sonunda Higgs mekanizmasından hoşlandım. Doğru mu acaba diye düşünmeye başladım. Sağlıklı bir teoriye götürür mü? Temel parçacıklar için yapılan bir teoride nelere izin verir, nelere izin vermez ve niçin?

Değişik ülkelerde çeşitli üniversiteler uluslararası düzeyde "yaz okulu" adı verilen kurslar düzenlerler. Sessiz ve sakin yerlerde yapılan bu kurslarda uzmanlar ve öğrenciler ders vermek, dersleri dinlemek ve her şeyden önemlisi araştırma konularını tartışmak için bir araya gelirler. Benim konumla ilgili en gözde yaz okulu, Mont Blanc eteklerin-

de Chamonix yakınlarında, kış sporlarının yapıldığı Les Houches köyünde düzenlenmişti. Büyük bir olasılıkla, kayıt yaptırmadaki gecikmemden dolayı okula kabul edilmedim. Bununla birlikte ikinci seçeneğim olan Cargèse'e kabul edildim ve 1970'de bu yaz okuluna katıldım.

Korsika adasında, Cargèse yakınındaki Bilimler Enstitüsü, Fransız fizikçi Maurice Lévy tarafından kurulmuştu. Küçük bir plajı olan güzel bir arazi üzerine küçük bir bina yapılmış ve 1960'dan itibaren burada yaz okulları ve konferanslar düzenlenmeye başlanmıştı. 1970'deki yaz okulunun konusu, kuvvetli etkileşimlerdi. Lévy, Gell-Mann ile birlikte kuvvetli etkileşimlerin bir modelini yapmıştı. Gerçeği tam olarak temsil etmesi beklenmese de, kuvvetli etkileşimlerin simetrilerini çok ilginç bir şekilde ortaya koyan, güzel özelliklere sahip bir modeldi. Burada kuvvetler öylesine güçlü ki, yaklaşık bile olsa, parçacıklar düzgün doğrusal bir hareket yapamazlar. Bu yüzden, "pertürbasyon açılımı" denen genel yaklaşıklık yöntemi güvenirliliğini yitirir. Tartışma, model sonuçlarından her şeye rağmen anlamlı bir şeyler çıkarma girişimleri tarafından belirleniyordu. Bununla birlikte, herhangi bir değere yaklaşmayan sonsuz seriler gibi modelin bazı temel özellikleri örneğin herhangi bir değere yaklaşmayan sonsuz seriler yaz okulunun tartışma konuları arasındaydı.

Model ilginçti. Renormalize edilebilen bu modelde proton, nötron ve üç pion hakim rol oynu-

yordu. Bununla birlikte, pionlara eşlik eden ve "sigma" (σ) denilen dördüncü bir parçacığa gereksinim duyuluyordu. Modelin simetrisi "çıplak" proton ve nötronların kütlesiz olmasını gerektiriyordu. Ancak o zaman zayıf kuvvetin etki ettiği akımların nasıl çalıştığını anlamak mümkündü. Modelin ilginç yanlarından biri de sigma parçacığının Bose yoğunlaşmasına uğradığının varsayılmasıydı. Burada da "kendiliğinden simetri bozulması" vardı. Simetrik bir ortamda kütlesiz olması gereken proton ve nötron, vakumu dolduran sigma parçacıkları tarafından yavaşlatılıyor ve simetri kendiliğinden bozularak proton ve nötron kütle kazanıyordu. Bu sistemde Goldstone teoremi geçerliydi: Üç pion Goldstone parçacığı olur ve dolayısıyla durgun kütlelerini kaybeder.

Bu hiç de fena bir şey değildi. Pionların tüm hadronlar içinde en hafif parçacıklar olduğunu daha önce görmüştük. Çoğu teoride parçacıkların kütlelerinin kareleri karşılaştırılır. Pionun kütlesinin karesi, daha sonra gelen kaonun kütlesinin karesinden yaklaşık on dört kez daha küçük. Pionun kütlesinin sıfır alındığı yaklaşım, bu yüzden pek de tuhaf bir şey değil. Geliştirilmiş bir sigma modelinde, çok küçük bir tedirginliğin varlığını kabul etmekle piona kütle kazandırılabilir. Daha sonra, kuark modelini kullanırken hem Goldstone pionlarının hem de sigma parçacığının kuark ve antikuarktan meydana geldiğini göreceğiz. O halde piona kütle

kazandıran "tedirginlik", XVI. Bölüm'deki Tablo 7'de gösterildiği gibi, bir hadron içindeki *u* ve *d* kuarklarının çok küçük kütlelerinden ileri gelmektedir. Bu yorum 1970'de zaten çok iyi anlaşılmıştı.

Renormalizasyon konusunun iki otoritesi, Koreli Benjamin Lee ve Alman Kurt Symanzik, sigma modelinde renormalizasyon işleminin nasıl yapıldığını anlatmak üzere Cargèse'e gelmişlerdi; bu modelin en ilginç özelliği, renormalizasyon işlemi yapılırken kendiliğinden simetri bozulmasının bir zarara uğramamasıdır.

Lee'ye ve Symanzik'e "Yang-Mills alanı olduğu zaman da aynı işlemler yapılabilir mi?" diye sordum. İkisi de aynı cevabı verdi: "Ben Veltman'ın öğrencisi olsam soruyu ona sorardım". Anlaşılıyor ki onlar Yang-Mills alanlarını incelememişlerdi. Kafamda birdenbire bir şimşek çaktı: Lee ve Symanzik'in sigma modeli için yazdıkları reçete, Higgs-Kibble teorisi de dahil, Bose yoğunlaşmasının simetriyi etkilediği herhangi bir sisteme de uygulanabilirdi. Burada yeni bir teorinin tohumlarını atmış oldum. Ancak bu tohumları nasıl yeşertecektim?

Veltman, kütleli Yang-Mills parçacıkları için yazılacak renormalize bir teorinin nasıl formüle edilmesi gerektiğini tam olarak biliyordu. Belli bir ilk durumdan belli bir son duruma geçiş olasılıklarını hesaplamak isteyen biri için teorinin doğru reçeteleri vermesi gerekiyordu ve bu olasılıkların toplamı

tam olarak bire eşit çıkmalıydı. Formülasyonda küçük bir hata bile yapılsa, olasılıkların toplamı bire eşit çıkmayacaktır. Her parçacık konfigürasyonunun enerjisi sıfırdan büyük olmalıdır, aksi halde her konfigürasyon kararsız hale gelir. Bu son ifadenin anlamı şu: "Boş uzay" görünmez parçacıklarla ağzına kadar dolu olsa da olmasa da hiçbir şey fark etmez. Önemli olan toplam enerjinin mümkün olduğu kadar küçük olmasıdır.

Cargèse'den Utrecht'e döndüğümde neyi çalışmam gerektiğine ve tezimin ne olacağına karar vermiştim. Her şeyden önce Higgs-Kibble mekanizması olmadan "saf" Yang-Mills teorisinin nasıl renormalize edileceğini araştırmak gerekiyordu. Evet, Feynman, DeWitt, Mandelstam, Faddeev, Popov ve diğerleri Feynman kurallarını çıkarmışlardı, ama bu kuralların Veltman koşulllarına uyup uymadığını açıklamamışlardı. Üstelik kurallarda küçük farklılıklar vardı. Acaba her biri aynı teoriden mi bahsediyordu? Konulan kural tek miydi? Aynı şey değişik yollardan hesaplanabilir miydi?

Veltman'la yaptığımız uzun tartışmaların sonunda ortaya çıkan ilk yayınımın konusu bu oldu. Gerçekten, bir yanda Mandelstam kuralları, öbür yanda Faddeev-Popov kuralları aynı teoriyi anlatıyordu ve renormalizasyon işleminin yapılabileceğine işaret ediyordu. Buna rağmen kesin bir ispat henüz yapılmış sayılmazdı. Teori, kuantum elektrodinamiği ve Lee ile Symanzik'in sigma modelinden çı-

karttıkları kadar mükemmel değildi. Ancak başlangıç noktası doğruydu.

Kütlenin nasıl konulacağını artık biliyordum. Kütlesiz durumların ispatında ayar değişmezliği kesinkes gerekliydi. Veltman'ın yapmak istediği biçimde kütle terimi konulursa ayar değişmezliği bozulacak ve hiçbir şey çalışmayacaktı. Çıkış yolu Higgs-Kibble mekanizmasıydı ve bu benim ikinci yayınımın konusu olacaktı; Higgs-Kibble mekanizması içeren bir teori, yine de renormalize olarak kalıyor ve ayrıntılı Veltman teknikleri bu teoriye uygulanabiliyordu. Aklıma gelen ilk uygulama rho mezonunu içeren Gell-Mann-Lévy modelinin bir çeşidiydi. Her şeyden önce, bu parçacık Yang ve Mills'in anlatmaya çalıştığı (X. Bölüm'e bakın) ancak o zaman kütlesinin nereden geleceğini bilmedikleri bir parçacıktı. Cargèse'de de birçok kimse, modellerinde rho gibi bir vektör parçacığının bulunmasını umut ettiklerine ilişkin konuşmalar yapmıştı. Bu şekilde, kuvvetli etkileşimlerin geliştirilmiş renormalize alan teorisi elde edilebilirdi.

Kuvvetli etkileşimler için yapılan bu tür modeller yararlı olsa da önemli bir buluş sayılmayacaktı. Rho parçacığı da kuark ve antikuarktan meydana gelmiş bir mezondur. Bu yüzden rho bir ayar parçacığı olamaz. Ayar parçacığı gibi davranıyor ama iç organları değişik.

Evet, bu yönde gitmemek gerekir. Veltman, zayıf etkileşimlerin çok daha önemli olduğu konu-

sunda beni ikna etti. Bunun anlamı şuydu: Tamamen aynı denklemleri kullanıp, her biri rho parçacığından yüz defa daha fazla kütleye sahip olan ve fizikte tamamen farklı, W ve Z parçacıklarını alıp yeni bir model yapmak.

Aslında artık Weinberg'in 1967'de yapmış olduğu modelin renormalize edilebileceğinin ispatının en önemli kısımlarına sahiptik.* Veltman'a göre problem, boş uzayı dolduran görünmez parçacıklardan bahsetmeye gerek kalmayacak biçimde ifade edilebilirdi. Veltman, bu görünmez parçacıkların kütleçekimi alanlarından hâlâ endişeli olduğu için, bir dönüşüm yaparak onları denklemden çıkarttım. Yeni kurallar Veltman'ın bilgisayar programına yüklendi ve hemen arkasından her şeyin mükemmel bir şekilde işlediği ortaya çıktı. Böylece bu zor problemin çözümü bulunmuş oldu!

Kaderin cilvesine bakın ki, 1971'in Ocak ayında Amsterdam'da uluslararası düzeyde büyük bir parçacık fiziği konferansı düzenlendi. Bu toplantıda tartışılacak zayıf etkileşim modelleri çok da ilgi çekici değildi. Veltman, bana Higgs-Kibble modelinin renormalize olduğunu gösteren yeni ispatı açıklama fırsatını vererek, ortaya yeni bir sürprizle çıkmanın keyfini yaşadı. Bundan sonra Veltman'la

* "Anomali" denen teknik ayrıntı hariç. Bu modelin modernleştirilmiş bir şeklinde bu sorun da halledilmiştir. XVII. Bölüm'e bakın.

yoğun bir işbirliği dönemi başladı. "İspatım" yeteri kadar ikna edici değildi. Veltman'la birlikte bulduğumuz yöntemleri genelleştirecek, parlatacak ve bu şekilde ispatı tamamlamış olacaktık. Birlikte kuantum kütleçekimi alanında da bir miktar ilerleme kaydedebildik.

Daha sonra geriye dönüp baktığımda, 1970 yılını, yaşamımın sonraki dönemlerini çok etkileyen iki büyük buluşu yaptığım yıl olarak hatırlıyorum. Buluşlarımdan ilki, yukarıda anlattığım ispattı. Bu benim Utrecht Üniversitesi'nde yardımcı doçent olmamı sağladı. İkincisiyse, sonradan eşim olacak hanımdı. Sonraki yıllarda, Cargèse ve Les Houches da dahil olmak üzere değişik yerlerde ayar teorileri üzerine konuşma yapmak üzere davet edildim ve bu arada iki de kızım oldu.

Ayar teorileri birdenbire popüler oldu. Benjamin Lee, Steven Weinberg ve başka pek çok kişi bu teorilere destek veriyordu. Beni yurtdışında ayar teorileri hakkında konuşma yapmaya çağıran ilk kişi Hamburg'da Kurt Symanzik oldu.*

Daha yapılacak çok şey vardı. Her şeyden önce zayıf kuvvetin hangi modeline inanmalıydık. Weinberg'in önerdiği ve benim bir önceki bölümde an-

* Symanzik'e büyük saygım var ve Hamburg'a yaptığım bu ziyaret önemli anılarla dolu. Symanzik'in evinin iç duvarları -en azından bilimsel kitap ve dergilerle kaplı olmayan kısımları- posterlerle kaplıydı. Bunların çoğu hanım posterleriydi. En büyük iki poster ise "Symanzik'in iki kahramanına", Albert Einstein ve Brigitte Bardot'ya aitti.

lattığım zayıf etkileşim teorisi çok aşikâr bir seçenekti ama tek seçenek değildi. Kuarklar henüz teoriye dahil edilmemişti. Renormalize olabilecek başka teoriler düşünmek de mümkündü. Açıklığa kavuşturulmuş olan en önemli şey, bir model ya da teori kurmanın genel kurallarının ortaya çıkmasıydı. Bir parçacık teorisinin renormalize olabilmesi için gerekli temel koşullar şu şekilde belirtilebilirdi.

- Spini 1 olan ve "foton" dediğimiz temel parçacıklar vardır. Bunların Yang-Mills tipi olmaları zorunludur ve kuvvetleri uzak mesafelere taşırlar. Diğer parçacıklar ve hatta fotonların kendileri de "yük" taşıdıkları için bu kuvvetlerden etkilenirler. Bunun tam matematiksel formülasyonu "grup teorisini" gerektirir; grup teorisi burada daha fazla anlatılamayacak kadar karışıktır. Tüm etkileşimleri hesaplamak için Doğa'nın birkaç sabitinden başka bir şeye gerek yoktur. Bu Doğa sabitlerinin değerlerini teoriden yola çıkarak saptamak olanaklı değildir, deneysel verilerden saptanması gerekir.
- Spini $\frac{1}{2}$ olan temel parçacıklar vardır. Bunlara "fermiyon", daha doğrusu "Dirac fermiyonları" deriz. Lepton ve kuark olmak üzere iki cins Dirac fermiyonu var-

dır. Ancak ilke olarak istenildiği kadar Dirac fermiyonu olabilir. Yang-Mills alanlarıyla nasıl etkileştiklerine bağlı olarak "çıplak", durgun kütleleri olabilir de olmayabilir de. Bu kütlelerin de deneysel olarak saptanması gerekir ve teoriden elde edilemez.

- Spini 0 olan temel parçacıklar da vardır. Onların Yang-Mills fotonlarıyla etkileşmeleri yükleri tarafından belirlenir. Ancak birbirleriyle ve fermiyonlarla etkileşmelerini tanımlamak için yeni Doğa sabitlerine gereksinim vardır. Çok sayıda spin 0 parçacıklarına izin verirsek pek çok Doğa sabiti olması gerekir ve bu sabitlerin değerleri ilke olarak belirlenemez. Genelde bir ya da iki cins spin 0 parçacığının olduğunu varsayarız. Bununla birlikte, bu parçacıklar herhangi bir sayıda olabilir. Önemli olan şey, bu parçacıkların Bose yoğunlaşmasına uğrayarak Higgs-Kibble mekanizmasını meydana getirmeleridir. Bose yoğunlaşması yüzünden çoğu Yang-Mills fotonu ve başlangıçta kütlesiz fermiyonlar belirli, sonlu durgun kütle kazanırlar. Bu kütlelerin değerleri her zaman ilke olarak keyfi olan Doğa sabitleriyle ilişkili olduğu için, çoğu durumda bu kütleleri hesaplamamız mümkün değil-

dir. Onların (dolaylı ya da dolaysız) deneysel gözlemlerden elde edilmesi gerekir.

- Teknik bir kısıtlama var: "anomaliler". Fermiyonların bütün kombinasyonlarına izin verilmez. XVII. Bölüm'de bu konuda daha fazla şey söyleyeceğim.
- Daha yüksek spinli temel parçacıklara izin yok. Çeşitli temel parçacıkların birbiri etrafında dönmesinden meydana gelen "bağlı durumlar" olabilir ve böyle parçacıklar temel parçacıkların kendilerinden daha hızlı dönebilirler. Ancak bu şekilde spini $1\frac{1}{2}$, 2, $2\frac{1}{2}$ ve benzeri olan parçacıklar meydana gelebilir (spini 2 olan graviton ile spini $1\frac{1}{2}$ olan gravitino istisnai bir durum teşkil ederler. Ancak bu teoriler renormalize olamadıkları için, şimdilik kesin bir şekilde formüle edilemezler).

Görüldüğü üzere serbestlik ve keyfilik oldukça fazla. Ne kadar temel parçacık ve Yang-Mills alanı var? Hangi kombinasyonun doğru olduğunu bugünkü deneysel gözlemlerden nasıl anlarız? "Büyük model avı" diye karakterize edebileceğim bir model yarışı dönemi başladı. Doğru modelle ortaya çıkan bir yazar şüphe yok ki Nobel ödülü için aday kabul edilebilecekti. Bu yüzden, yapılabilecek bütün modellerin kuralları birdenbire ortaya çıktı. En

çılgın fikirler ortaya atıldı. Büyük Yaratıcımızın* bile bu kadar hayal gücü yoktur.** Bir bakıma olabilecek en basit yapı olan Weinberg'in başlangıçtaki çalışması, leptonlar hesaba katıldığında doğru bir teori olarak ortaya çıktı. Weinberg'in karşılaştığı güçlüğe ne demeli? Yang-Mills fotonlarının yüksüz bileşeni, niçin bir Σ^+ parçacığının bir proton ile iki nötrinoya bozunmasına neden olmasın? Bu sorunun cevabı Glashow, İliopoulos ve Maiani'nin 1969'daki makalelerinde zaten verilmişti. "Tılsım" adlı dördüncü bir kuarkı işin içerisine sokarsak, istenmeyen etkileşimler ortadan kalkar. GIM mekanizması doğrudan doğruya uygulanabilirdi. Böylece bu götürmelerin ne kadar etkin bir şekilde meydana geldiği hesaplanabilirdi ve görüldü ki istenilen hassasiyette sonuç elde etmek için tılsımlı kuarkın bilinen kuarklardan biraz daha ağır olması gerekir. Özellikle K_{Uzun} bu hesaplara "duyarlıydı". Tılsımlı kuark çok ağır olsaydı çok sayıda K_{Uzun}'un iki müona bozunduğunu gözlerdik. Gerçekte bu şekildeki bir bozunma K_{Uzun}'un bütün bozunmaları içerisinde yüz milyonda birdir. Bu çok önemli bir gözlemdi. Özellikle Glashow, deneycilerin yeni kuarkı içeren parçacıkları araştırmalarının önemini

* Bu sözcüğü lisedeki fizik hocamdan aktarıyorum. Özür dileyerek belirteyim ki, bundan benim dini inançlarım hakkında bir sonuç çıkarılsın istemem.

** İnsanlığı yaratırken O'nun yaptığı şeylere bakılırsa, belki de bunu söylememek gerekir. Ancak belki de O'nun kullandığı şey sonsuz mizah yeteneğiydi.

vurguladı ve deneycilerin hangi olaya bakmaları gerektiğini de belirtti.

Tılsımı işin içerisine sokarak Z^0'ın istenmeyen etkileri ortadan kaldırılabilse de Z^0'ın meydana getireceği yeni olaylar hâlâ beklenebilir. Özellikle, Z^0 değiş tokuşundan kaynaklanan kuvveti nötrino hisseder. Bir nötrino bir Z^0 yakalarsa, nötrino olarak kalır ama hareketine yönünü değiştirerek devam eder. Buna biz "esnek" çarpışma diyoruz. Yalnız yüklü W parçacıkları olsaydı, nötrino elektrik yüklü bir leptona dönüşerek bir etkileşime girmiş olurdu.

Tam o sırada deneycilerin esnek nötrino çarpışmalarını ölçecek makineleri hazırdı. Aslında bu tür olaylara bakmışlardı bile. Fakat sonuç olumsuzdu. Bundan "yüksüz akım süreçleri" denen çarpışma süreçlerinin bulunmadığı sonucu mu çıkarılmalıydı? Yapılan deney, müonik nötrinoların atom çekirdeğiyle esnek çarpışmalarının araştırılmasıydı. Bu son derece zor bir deney. Çünkü aynı nötrinolar atom çekirdekleriyle müona dönüşecek biçimde çarpışabilir ve bu müon gözlenemeyebilir. Üstelik bir nötron yaratabilirler ve bunun sebep olacağı başka bir etkileşim yüzünden araştırılan nötrino etkileşimini ayıklamak oldukça zor olur. Esnek nötrino çarpışmalarının yapıldığı bir deneyde, gözlenen olayın deneyden kaynaklanan bir sonuç mu yoksa o şekilde görünen bir olay mı olduğunu tayin etmek son derece zordur.

Bunlar deneycilerin çok iyi bildiği şeylerdir. Zorluk, bu sahte olayların ne derece güçlü olduğunun ve diğer "fon gürültüsü" kaynağının belirlenmesinde yatıyordu. Kaydedilmiş olaylardan gerçek "sinyali" seçebilmek için, bu gürültüyü ve sahte olayları çıkarmak gerekiyordu. 1972'de deneyciler arasındaki genel kanı, sinyalin "muhtemelen" olmadığı doğrultusundaydı.

Fakat teorisyenler bundan emin olmak için birdenbire konuyla daha çok ilgilenmeye başladılar ve bir nötral akım olayının olması gerektiği yönünde güçlü ipuçları verdiler. Kabul etmek gerekir ki, aslında sadece bir deney yapılmıştı ve bunun sonucu da çok güvenilir değildi. Neyse ki, yeni, dev bir parçacık dedektörünün tamamlandığı CERN'de, deneyi yeniden daha hassas bir şekilde yapmak için bir fırsat doğmuştu. Binlerce ton çelik ve bakırla kaplı ve içi freonla doldurulmuş bir dedektörde, çok hızlı geçen parçacıkların neden olduğu küçük parçacık izleri görülebilir hale getiriliyor ve fotoğrafları çekiliyordu. Bu makineye Rabelais'nin yapıtındaki Gargantua devinin annesinin adı olan "Gargamelle" adı verildi.

Paul Musset, binlerce fotoğrafın çok zaman alacak analizlerine başlayan araştırmacılardan biriydi. Sonuçların ilk açıklaması bir belirsizlik ortaya koydu. Başlangıçtaki başarı iddiası geri çekildi. Bu yüzden eleştirmenler, yüksüz akımlar bir geliyor, bir gidiyor diye alay etmeye başladılar: Belki de yüksüz alternatif bir akım söz konusuydu? Bununla birlik-

te, 1974'de mükemmel bir analizden sonra zayıf nötral akımların varlığı kesin bir şekilde doğrulandı.

Nötrinolarla elektronlar arasındaki dolaysız esnek çarpışmalar son derece az görülür. Buna rağmen CERN verilerinin Aachen'da Hellmut Faissner tarafından yapılan analizi, elektronların atomlarından nötrinolar tarafından fırlatıldığını gösteren ikna edici resimleri ortaya çıkardı.

Teori şüphe götürmeyecek şekilde doğrulanmış mı oluyor, yoksa deneyciler kendilerini teorisyenlerin baskıları altında mı hissediyorlardı? Bu sonuçlar gerçek miydi, yoksa bir hayal ürünü müydü? Eleştirmenler ve bilim tarihçileri bazen bu tür şeylerin hayal ürünü olduğundan şüphelenirler. Öyle anlaşılıyor ki, teori istemiyorsa olay görülmüyor, ama teori istiyorsa deneycilerin hepsi birdenbire olayı görüyorlar.

Burada iki şey söylemek istiyorum. Birincisi, ön yargılı olduğundan şüphe etmek, saygın bir deneyciye karşı ciddi bir suçlama sayılır. İyi bir araştırmacı bilim adamı, özellikle yaptığı gözlem çok önemliyse, elde ettiği sonuçların hassasiyetini abartmak yerine daha mütevazi göstermeye dikkat eder. Tabii, ne yazık ki bazıları sonuçların hassasiyetini bugün olduğu gibi yarın da abartacaktır. Çoğunlukla meslektaşları bu hatayı ona göstermede geç kalmaz. Hatta teori o sonucu "istese" bile.

İkincisi, deneysel sonuçlar gerçekten doğruydu. Daha sonra diğer gözlemler en ince ayrıntısına kadar her şeyin doğru olduğunu değişik yollardan

gösterecekti. Her bilimsel buluşun "bilimsel devrim"le eninde sonunda ortadan kaldırılacağını öne süren bilim felsefecileri vardır. İşte bundan dolayı onlara göre "mutlak gerçek" diye bir şey yoktur. Bu bilim felsefecilerinden biri, yüksüz akımın olup olmaması sorununun "bilim adamlarının o anlık görüşü"nden ibaret olduğunu iddia etti ve ona göre bunun sonsuza kadar sürecek bir gerçek olması gerekmezdi. Doğru, bir zamanlar uzay araçlarından çekilen yerin fotoğraflarının sahte olduğunu iddia ederek Dünya'nın düz olduğunu söyleyen teori, anlaşılan ileride yeniden karşımıza çıkacak. Gerçekten, yüksüz akım olaylarının varlığı Dünya'nın yuvarlak olduğu gerçeğinden daha az nesnel değildir.

Zayıf kuvvetin muhteşem teorisini ilgilendiren durum, zamanla daha fazla açıklığa kavuştu. Yeni deneyler ışığında Weinberg modeli kalıcılığını korudu. Yüksüz akımlar hakkındaki öngörülerin doğru çıkması, teorisyenleri cesaretlendirdi. Ancak kuark teorisinde "tılsım" denen başka bir kuarka ihtiyacımız vardı ve böyle bir tılsımlı kuarkı içeren tek bir parçacık bile gözlenmemişti. GIM mekanizmasının doğru dürüst işlemesi için çok ağır olmayan bir tılsımlı kuarka gerçekten ihtiyaç duyuluyordu. Bu, zaman içerisinde tılsımlı parçacıkları laboratuvarda gözlemenin ve incelemenin mümkün olacağını gösteriyordu. Bu yeni bir öngörüydü ve sonunda gerçek olacaktı. Ancak bu arada başka bir şey oldu: Kuvvetli etkileşimin anlaşılmasındaki güçlük aşıldı.

XIII. Bölüm

Güçlü Kuvvetlerde Renklenme

Zayıf etkileşimlerin renormalize teorisini nasıl kuracağımızı anlamaya başladığımız bir sırada, kuvvetli etkileşimler hâlâ bir giz perdesi arkasındaydı ve daha az kontrol edilebilirmiş gibi görünüyordu. Araştırmacılar, yeni ve daha güçlü hızlandırıcılar kullanarak, artan çarpışma enerjilerinde çeşitli parçacıkları birbirleriyle nasıl çarpıştıracaklarını öğrendiler. Böylece hadronların merak edilen iç yapıları daha iyi anlaşılır hale geldi. İlk ortaya çıkan şey, rezonans listesinin gittikçe uzamasıydı. Bir rezonans birçok bakımdan Tablo I'deki parçacıklardan birine benzer. Ancak kütlesi

daha büyük ve çoğu zaman spini de daha fazladır. Rezonanslar, ağırlıkları spinleriyle doğru orantılı olarak artan diziler oluşturur. Baryonik ve mezonik rezonanslar vardır. Bu rezonanslar, toplam S (acayiplik) ve I_3 (izospin) kuantum sayıları değişikliğe uğramadan 10^{-23} saniye gibi bir süre içinde daha hafif parçacıklara bozunurlar.

Hadronların niçin bu şekilde davrandıklarını anlamak kolay değildi. Bununla birlikte Gabriele Veneziano, bu tür sorulara cevap verme girişiminde bulunmadan, parçacıkların çarpışmalarıyla meydana gelen rezonansların etkilerini çok güzel bir şekilde veren basit, matematiksel bir formül buldu. Formülünün en ilginç tarafı, güçlü kuvvetin etkilerinin gerçekçi bir şekilde belirtilmesiydi (yani, o zamanki deneyle oldukça uyumluydu); ama o zaman bu formülü açıklayan hiçbir teori mevcut değildi. Veneziano'nun formülü ileride çok önemli bir rol oynayacak ve ben buna daha sonra değineceğim.

Çarpışma enerjisini biraz daha artırırsak anında yeniden normal parçacıklara bozunan bir yığın rezonans meydana gelir ve bu rezonansları birbirlerinden ayırt etmek güçleşir. Ancak, bu arada başka bir etkileyici olay gözlenir. Kuvvetli etkileşen parçacıkların (hadronlar) jel tipi maddelerden yapılmış olduğunu varsayınız. Bunlar, birbirlerinin üzerine büyük kuvvetlerle fırlatılırlarsa, tahmin edebileceğiniz gibi, birbirlerini tamamen yok ederken, çıkan parçacıklar da aşağı yukarı aynı doğrultuda

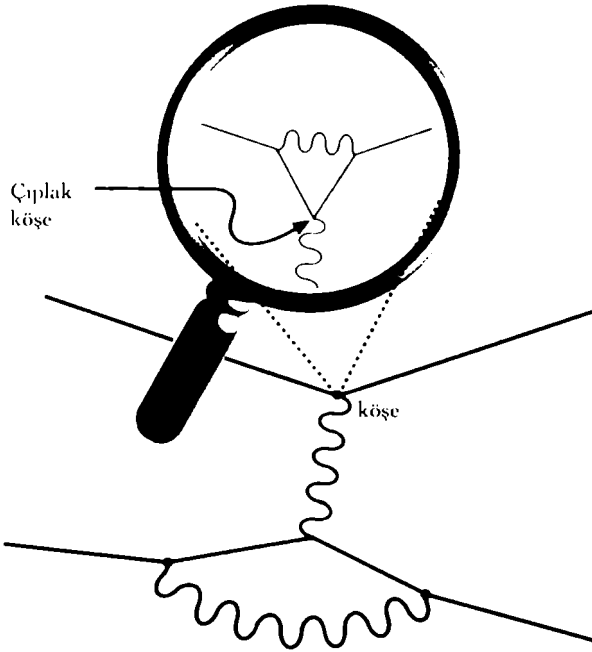
hareketlerine devam eder. Yani, çoğu çarpışma ürününün ileri yönde gitmesi beklenir. Gerçekten çoğu kez böyle olduğundan emin olabilirsiniz. Ancak araştırmacılar arada bir bazı parçacıkların büyük bir kuvvetle yanlara doğru da fırladıklarını gözlemlediler. Sanki jel içerisinde çok sert kum taneleri varmış gibi! James Bjorken, yana doğru giden parçacıkların basit bir denklemi sağladığını keşfetti: Çok yüksek enerjideki çarpışma süreçleri ile bundan bir miktar daha az enerjidekiler, enerji arttıkça birbirlerine daha çok benzemeye başlar. Buna Bjorken boyutsuzlaşması adı verildi.

Bu olay Feynman'ın ilgisini çekti: Bjorken boyutsuzlaşmasını "normal" alan teorisini kullanarak açıklamak mümkün olmalı, diye düşündü. Rezonansların daha temel yapı taşlarından meydana gelmiş olduğunu düşününüz. Feynman, daha dikkatli davranarak bunlara kuark yerine "parton" adını verdi. Rezonans içinde bu partonların aşağı-yukarı serbest parçacık gibi davrandıklarını düşünürseniz, o zaman Bjorken boyutsuzlaşmasını anlayabilirsiniz.

Kuark ya da parton olabilirler, serbest olabilirler ya da gevşetilmeleri imkânsız olabilir. Bilmece çözülmüştü. Bu tür şeylerden hiç anlamadığım için kuvvetli etkileşimlerden uzak durmaya karar verdim. Ne tuhaftır ki, not defterlerimde Bjorken boyutsuzlaşma probleminin cevabını çoktan vermişim! Kütlesiz Yang-Mills teorisini çok iyi incelemiştim ve başlangıçta önemsemediğim bir şey dik-

katimi çekmişti. Bu olay I. Bölüm'de tartışılan "ölçek dönüşümü" ile ilgilidir. Büyük cisimler âlemini küçük cisimler dünyasında düşündüğümüzü hatırlayınız. Bazı ayrıntılar değişik görünecek ama bazıları aynı kalacak. Temel parçacıklar âleminde buna benzer bir şey görüyoruz. Bir teoriye bir büyüteçle bakacak olursanız, daha önce gördüğünüz parçacıkları burada da görebilirsiniz. Özellikle, teorinizde kütle terimi yoksa, büyütülmüş parçacıklar orijinallerine çok benzer. Sadece renormalizasyonu uyguladığınızda bir şeyler değişir. Çıplak parçacıklar giydirilmiş parçacıklardan bir miktar farklı görünürler ve sonuç olarak parçacıklar arasındaki etkileşim şiddeti, büyüteçten bakıldığında bir miktar değişir (bakınız Şekil 13).

Fizikçiler, kuantum elektrodinamiği ve Gell-Mann-Lévy modeli gibi eski teorilerde, büyüteç altında gördükleri etkileşimlerin orijinallerinden daima daha şiddetli olmasına alışıktılar. Çıplak parçacıklar giydirilmiş parçacıklara göre daha fazla tepki gösterirler. Çünkü giydirilmiş parçacıklar "vakum parçacıklarının" örtüsüne bürünmüştür. Bu parçacıklar "vakum polarizyonundan" doğar ve yükleri kısmen perdeleme eğilimindedirler. Bu olay, Yang-Mills ayar teorisi gibi yeni teoriler dışında, tüm alan teorilerinde bu şekildeydi. Yang-Mills teorilerinde işler farklıydı; bu teoriler yeni ve çok iyi incelenmemiş olduklarından araştırmacılar bunun farkında olmamışlardı.



Şekil 15. Temel bir etkileşimin tanımı, büyütme ölçeğine bağlıdır.

Vakumun yarattığı Yang-Mills fotonları, çıplak parçacıkları öylesine sarar ki, bu fotonlar çok esrarengiz bir şekilde yükü zayıflatmak yerine kuvvetlendirirler. Bu hesabı ilk defa yaptığınızda oldukça karışık olduğunu görürsünüz. Ben 1972'de bu olayın farkına varmıştım. Üstelik, teori Yang-Mills fotonlarına ek olarak fermiyonları da içeriyorsa, o zaman tam tersine yüklerin zayıfladığını da biliyordum. Yani yükler perdeleniyor. Eğer on altıdan

fazla fermiyon varsa (her ayar teorisi için bu sayı farklıdır), o zaman vakum örtüsü normal teorilerde görüldüğü gibi davranır.

1972'de Marsilya'da küçük bir konferans yapıldı. Marsilya havaalanına yaklaşırken, Kurt Symanzik ile aynı uçakta olduğumuzu fark ettim. Hemen fizik konuşmaya başladık ve o bana kendi problemini anlattı. Bir kuantum alan teorisinde Bjorken boyutsuzlaşmasının nasıl olacağını anlamaya çalışıyordu. Ancak kendisini tüm alan teorilerinin prototipi olan basit, 0 spinli bir modelle sınırlamıştı. Ne yazık ki, boyutsuzlaşma yanlış çıkıyordu. "Bu boyutsuzlaşma davranışını tersine çevirebilsem, öyle bir teori elde ederim ki parçacıklar birbirlerine yaklaştıklarında serbestmiş gibi davranırlar ama birbirlerinden uzaklaştıklarında çok güçlü kuvvetlerle birbirlerini çekerler" dedi. "Bir Yang-Mills ayar teorisinde bulacağınız işte bu!" diye cevap verdim. Symanzik buna inanmanın güç olduğunu söyledi. Onun düşüncesine göre hesaplarımda bir yerde bir işaret hatası yapmış olmalıydım. Tüm teorilerin 0 spinli model gibi boyutsuzlaştığını gösteren ve "karşıt teorem" denen teoremler vardı!* "Benim söylediğim doğru değil de sen haklıysan, bu çalışmanı hemen yayımlamalısın, çünkü bu çok önemli!" dedi.

Sonradan çok pişman olmama rağmen, bu duyarlı uyarıyı o zaman dikkate almamıştım. Veltman'la

* Bu karşıt teoremler yanlıştı. Hayalet parçacıkların son terimlerde birbirlerini götürme olasılığına ciddi bir şekilde bakılmamıştı.

birlikte yaptığımız kuantum kütleçekimi ile ilgili bir çalışmayla çok meşguldüm ve üstelik yaptığım hesaplarda çok özel yöntemler kullandığımdan, bunları anlaşılır duruma getirerek yazmak çok zamanımı alacaktı. Güçlü etkileşimleri çok iyi anlamadığım için, bu hesapları nasıl makale haline getireceğimi de bilmiyordum. Şimdi Symanzik'e teşekkür borçluyum. Marsilya'daki konuşmasını şu sözcüklerle bitirdi: "Öyle görülüyor ki Bjorken boyutsuzlaşmasını açıklayan hiçbir teori yok, bununla birlikte belki de şu ayar teorilerine bir kez daha bakmalıyız." Tartışma kısmında, yaptığım çalışma konusunda bir şeyler söylemeye bir bakıma beni teşvik etmiş oldu. Ben de kalktım ve sonucu gidip tahtaya yazdım.

Ayar teorilerinin belirtilen boyutsuzlaşma davranışı üzerine ilk makaleler, Harvard'daki genç araştırmacı David Politzer ile aynı anda Princeton'dan David Gross ve Franck Wilczek'den geldi. Onlar bu özelliğe "asimptotik özgürlük" adını verdiler.* Sonradan, bu sonucun daha önce Avrupa'da elde edildiğini ve Marsilya'daki konferansta söylediğim şeyin, önceliğin nereye verilmesi gerektiğini açıklığa kavuşturduğunu söyleyen Symanzik oldu.

Doğa'nın büyük bulmacasının eksik kalan parçası buydu. Diğer parçalar daha önce yerlerine

* Daha sonra uluslararası büyük bir konferansta J.Iliopoulos şöyle demişti: "Birileri özgürlük hakkında konuştuğunda demek istedikleri, başkalarının demek istediklerinden tamamen farklı oluyor!" O zamanlar Iliopoulus'un ülkesinde askeri cunta vardı.

yerleştirilmişti. Harald Fritzsch ile birlikte Gell-Mann, Yang-Mills kuvvetlerinin, kuarkları birbirine bağlayan kuvvetler arasında en doğrusu olduğunu zaten göstermişlerdi. Yetenekli Japon fizikçi Yoichiro Nambu da daha önce bu fikri ortaya atmıştı. Bu fikre göre üç kuarkın ya da bir kuarkla bir antikuarkın birbirlerine niçin bağlandıklarını tam olarak anlamak mümkündü. Üstelik $\frac{3}{2}$ spinli baryonların niçin bir onlu ve $\frac{1}{2}$ spinli baryonların ise niçin bir sekizli meydana getirdiğini de anlamak kolaylaşmıştı.* Bu tür bir kuvvetten sorumlu olan Yang-Mills alanları sekizer elektrik ve manyetik alandan meydana gelir (sekiz katlı yolun başka bir örneği).

Kuarkların sahip olduğu yükler normal elektrik yüklerinden daha karışıktır. Elektrik yükü artı ya da eksidir ve bu yükler birbirini nötrleştirebilir. Her kuark cinsi (yukarı, aşağı, acayip, vs.) kırmızı, yeşil ya da mavi olmak üzere "renklere" sahip olabilir. Değişik renklerdeki kuarklar birbirlerini çekerek, bu renklerin karışımından meydana gelen maddeyi oluştururlar. Doğa'da serbest olarak dola-

* Eski kuark teorisinde bir zorluk vardı. Bu zorluk kuarkların spinlerinin $\frac{1}{2}$ olmasına karşın fermiyon gibi davranmamalarından ileri geliyordu. Örneğin onlu temsilde omega eksi hepsinin spini aynı yönde dönen üç özdeş kuark içeriyor. Pauli dışarlama ilkesine göre bunun yasak olması gerekir! Oysa yeni teoride omega ekside olduğu gibi hadron içerisindeki her bir kuark değişik bir renge sahiptir. O zaman matematiksel olarak gösterilebilir ki, baryonların gerçekten onlu ve sekizli temsilleri oluşturmaları gerekir.

şan madde, kuarkların "renksiz" (beyaz ya da açık gri) karışımlarından meydana gelir. Bu kuralı şu şekilde açıklamak mümkündür: kırmızı + yeşil + mavi = beyaz.

Antikuarklar eşlenik renklere sahiptirler: morumsu kırmızı (magenta, karşıt-kırmızı), mor (karşıt-yeşil) ya da sarı (karşıt-mavi). Çok açık nedenlerden dolayı renk üzerine etki eden Yang-Mills fotonlarına gluon (yapıştırıcı) denir. Onlar hem renk hem de karşıt renk taşırlar. Bu yüzden dokuz çeşit karışım oluşturulabilir. Ancak kırmızı/karşıt-kırmızı, yeşil/karşıt-yeşil ve mavi/karşıt-mavi'den meydana gelen bir karışıma renksiz denebilir, dolayısıyla bu karışım yapıştırıcılık görevi yapmaz. Bu yüzden geriye sekiz çeşit gluon kalır.

Kuarklar, antikuarklar ve gluonlar hep birlikte Feynman'ın partonlarını meydana getirirler. Peki, bir Higgs-Kibble mekanizmasının dahil edilmesine ne dersiniz? Önceleri pek çok fizikçi, güçlü kuvvetin bir teorisini de zayıf kuvvetinkine benzer bir şekilde kurmayı düşünmüştü; o zaman "çıplak" gluonların durgun kütlesi olmayacaktı. Böyle kütlesiz vektör parçacıkları gerçek dünyada mevcut değil; yalnız normal bir foton var. Bu yüzden bunların Higgs-Kibble mekanizması aracılığıyla kütle kazanması gerekir. Biraz durun bakalım! Gluon gibi renk taşıyan ve kütlesi olan parçacıklar da Doğa'da mevcut değil! Onlar gri olmadıkları için yasaklanmışlardır.

Bu sefer sorunun cevabı başka bir şey olmalıydı. Şimdi anlıyoruz ki güçlü kuvvet için Higgs-Kibble mekanizmasının hiç gereği yok. Toplam rengi bütünüyle nötrleşmemiş herhangi bir parçacığın ya da parçacık yığınının varlığını yasaklayan bir ilke var. Bir renksiz parçacık çorbasından bir parçacığı ya da parçacığın sahip olduğu rengi çıkarmaya çalışırsanız, geriye kalanların hepsi birlikte karşıt-renge sahip olacaklardır. Renk ile karşıt-renk arasındaki çekici kuvvet öylesine büyüktür ki, bunları birbirinden ayırmak için gerekli enerji miktarı sonsuzdur. Kuvvetin kendisi sonsuz değildir, ancak uzaklık arttıkça diğer kuvvetlerde olduğu gibi fazla azalmaz. Bu da böyle bir ayırma işleminin niçin hiçbir zaman mümkün olamayacağını açıklar. 1973'de bu ilkenin arkasındaki derin matematiksel düşünceyi çok az anlamıştık ama yine de ona bir isim vermek zor olmadı: "müebbet kuark hapsi". Bundan sonraki görevimiz bu kuark hapsi olayını anlamaya çalışmak ve açıklamak olacaktı.

Bu bölümün başında bahsettiğim ve Gabriele Veneziano tarafından ortaya atılmış olan muazzam formüle geri döneyim. Formüle göre rezonanslar seriler oluşturuyor: Bu serilerden birindeki ağır parçacıkların (daha çok enerji taşıyanların) daha büyük spinleri vardır. Dolayısıyla kendi eksenleri etrafında, hafif olanlara göre daha hızlı dönerler. Bunun gerisindeki fizik çok açık değildi. Bununla birlikte, Kopenhag'daki Niels Bohr Enstitüsünde

Danimarkalı fizikçi Holger B. Nielsen ile Ziro Koba ve Chicago'da Yoichiro Nambu gibi fizikçiler tarafından bir ilerleme kaydedilmişti: Bu rezonansların da "kuark"a benzer bir şeylerden meydana geldiği varsayılabilir. Ağır rezonansların büyük dönme enerjisini (daha açık söylemek gerekirse açısal momentumu) daha iyi anlamak için rezonanslar içerisindeki kuarkların birbirleri etrafında büyük çemberler üzerinde döndüğünü varsaymak gerekir, çünkü bu kuarklar ışık hızından daha hızlı hareket edemezler. Buna rağmen kuarklar birbirlerinden kesinlikle kopamazlar. Eğer bu hadronların, uç kısımlarında kuarkların bulunduğu küçük "sicim" parçalarından meydana geldiğini düşünürseniz, Veneziano formülü işte tam olarak bunu açıklar. Rezonanslarda sicim döner ya da "rezonansa girer". Sicimler çok güçlü birtakım maddelerden meydana gelmiş gibi davranır. Çok esnek olmadıklarından onları germek çok enerji gerektirir. Bir sicimi germeyi başarırsanız, harcadığınız enerji birdenbire daha çok sicim malzemesine dönüşür. Böylece sicimi sonsuza kadar gerebilirsiniz. Uzadıkça uzar ve hiçbir zaman zayıflamaz! Eğer kuarklar böylesine ideal, esnek sicimler tarafından birbirlerine bağlanmışlarsa, birbirlerinden ayrılamayacakları kesindir.

Hiçbir şey ideal değildir. Bir sicimi çok fazla gerdiğinizde zayıflamaz ama başka bir şey meydana gelebilir. Kopabilir! Ancak uç noktalarında yeni bir kuark ile antikuark meydana getirmeden

kopmaz. Kuark ya da antikuark olmayan uç noktalar yoktur. Bir uçta bir kuark varsa, öbür uçta daima bir antikuark vardır.

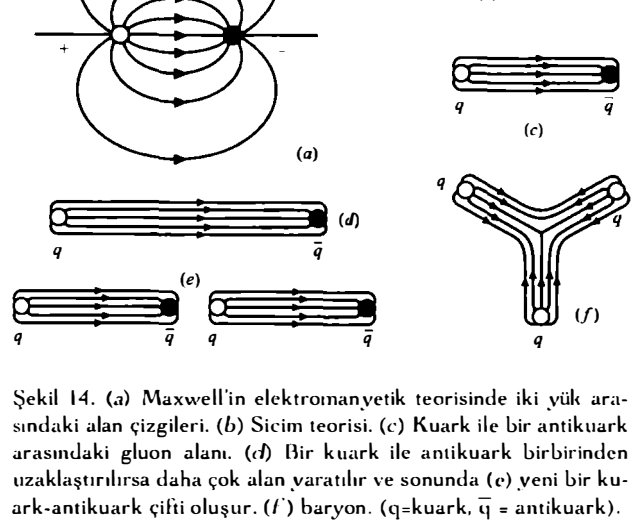
Üç kuarktan meydana gelen baryonlar üç sicimin uç noktalarının özel bir şekilde birbirine bağlanması suretiyle elde edilirler. Kuralın ayrıntılarıyla sizi daha fazla meşgul etmek istemiyorum. Bunu kafamızda canlandırmak için her sicimin bir yönlenmesi olduğunu düşünmemiz gerekir. Bir ucun tabi olduğu kurallar, diğer ucun tabi olduğu kurallardan farklıdır. Bir sicimin gerilme şiddeti bir Doğa sabitidir: Yaklaşık 14 tonluk bir kuvvet karşılığıdır.

İlk bakışta, bu sicim teorisi ile kuarkların ayar kuvvetleri aracılığıyla bir arada tutulduğunu söyleyen teoriyi uzlaştırmak zor gibi görünüyor. Unutmamak gerek ki, Veneziano formülü tam olarak değil, yaklaşık olarak doğrudur. Uçlarında kuark bulunan bir sicim modelinin bir yaklaşımdan başka bir şey olmadığını düşünmek çok doğaldır. Şu anda kuarklar arasındaki ayar alan çizgilerinin Şekil 14 (c)'de gösterilen çizgiler gibi olduğuna inanıyoruz. Kuarkları birbirlerinden ayırmaya çalışırsanız, kuarklara verilen enerji bunlar arasındaki alan çizgilerini daha çok germek için harcanır.

Açıklamamı kabul edilebilir ve inandırıcı bulabilirsiniz ve belki de Şekil 14'deki resimleri beğenmiş olabilirsiniz. Fakat önemli bir sorun var. Elektronun manyetik momenti, zayıf kuvvetin renormalize

edilmesi ve "asimptotik özgürlük" olayı gibi daha önce bahsedilmiş olan hesaplar, çok büyük bir matematiksel hassasiyetle yapılabilir. İlginç bir şeyi (bir "modeli") anlattığına inanmak için çeşitli nedenleriniz bulunan tam bir denklem takımı ile başlıyorsunuz ve matematiksel mantığı kullanarak daha çok bilmek istediğiniz özellikleri çıkarıyorsunuz.

Kuark hapsi olayıyla bunun yapılması olanaksızdı. XII. Bölüm'deki kuralları aynen uygulayarak içinde renkli foton ve fermiyon, yani kuark bulunan bir Yang-Mills teorisinin denklemlerini yazabilirdik. Teorinin renormalize edilebileceğini ve asimptotik olarak özgür olduğunu gösterebilir-



Şekil 14. (*a*) Maxwell'in elektromanyetik teorisinde iki yük arasındaki alan çizgileri. (*b*) Sicim teorisi. (*c*) Kuark ile bir antikuark arasındaki gluon alanı. (*d*) Bir kuark ile antikuark birbirinden uzaklaştırılırsa daha çok alan yaratılır ve sonunda (*e*) yeni bir kuark-antikuark çifti oluşur. (*f*) baryon. (q=kuark, $\bar{q}$ = antikuark).

dik. Asimptotik olarak özgür olmak demek, kuarklar birbirlerine çok yaklaştıklarında aralarındaki kuvvetin giderek zayıflaması demektir. Bunun tersine, kuarklar birbirlerinden uzaklaştırılmaya çalışılırsa, elektromanyetik teorideki kuvvete oranla kuarklar arasındaki kuvvetler daha da güçlenir. Buraya kadar her şey gayet iyi. Peki, kuvvet çizgileri niçin sicim gibi davranıyor? Niçin kuarkları birbirinden ayırmak için sonsuz enerjiye ihtiyaç var? Bunun elektrik kuvveti ile birbirine bağlanan parçacıklardaki (örneğin, atomlardaki elektronlar ya da moleküllerdeki iyon halindeki atomlar) karşılığının iyonlaşma enerjisi olması gerekir. O halde, kuarklar için gerekli iyonlaşma enerjisi niçin sonsuz oluyor? Şekil 14'deki diyagramlara inanılabilir, ancak onlar doğru mu? Onlar bildiğimiz denklemlerden elde edilebilir mi? Ne yazık ki, kuvvetler giderek güçleneceği için hesaplarımız güvenirliliğini yitirir.

İşte kuark hapsi problemi bu. Şu andaki düşünceme göre bu problemin çözümü iki aşamada yapılabilir. İlk olarak, teorinin bu özel yanını hassas bir şekilde ancak nitel olarak anlatan genel bir senaryo bulmalıyız. Burada normal maddenin katı halden sıvı ya da gaz haline veya süperiletken faza ya da Higgs-Kibble fazına geçişine benzeyen bir faz değişimi ile uğraşıyoruz. Hapis fazı fotonların kütle kazanmadığı, Higgs-Kibble fazındaki gibi yükleri perdelemediği, ancak yükleri birbirine sonsuz bir et-

kinlikle bağladığı bir durumdur. Bu anlamda kuark hapsini çok iyi anlayabileceğimiz bir noktaya geliriz ve ben bu konuya daha sonra yeniden döneceğim.

İkinci olarak, bu "hapis fazı"nın gerçekten meydana gelip gelmediğini anlamalıyız ve meydana gelmişse, hangi koşullarda bu faza geçildiğini bulmalıyız. Bu soru öncekinden çok daha zordur ve şu soruyla karşılaştırılabilir: Düşük sıcaklıklarda hangi madde süperiletken olur, hangileri olmaz ya da hangi maddeler, hangi sıcaklıklarda sıvı ya da katıdır? İlke olarak bütün bu soruların cevapları atomlar ya da temel parçacıklar arasındaki temel kuvvetlerden çıkarılabilir. Sorunun cevabı, çoğu kez, mutlaka büyük bilgisayarların kullanımını gerektiren son derece teknik hesaplara bağlıdır. Bu hesap artık kâğıt kalemle yapılamaz. Çünkü parçacıklar arasındaki kuvvetler öylesine büyük değerler almaya başlar ki, basit yaklaştırım yöntemlerinden hiçbirine güvenilemez. Şimdilik en büyük bilgisayarlarla yaptığımız hesaplar bile hiç de hassas olmayan sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte tüm sonuçlar çok güçlü bir şekilde göstermektedir ki, müebbet hapis tam olarak renk ayar teorisinde olan bir şeydir.

1974'lü yıllarda, içinde spin 0 parçacığı bulunmayan, yani Higgs-Kibble mekanizmasının olmadığı bir güçlü kuvvet teorisi için, sade bir renk ayar teorisi fikri giderek daha fazla destek kazandı. Yunanca χρωμα = renk sözcüğü kullanılarak teoriye

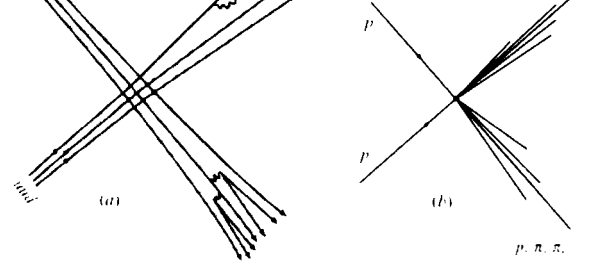
kuantum kromodinamiği (kuantum renk dinamiği) adı verildi.

Bu teori araştırmacıların kafasında yavaş yavaş oluştu. Görelilik teorisinin ve kuantum mekaniğinin aksine, kuantum renk dinamiğini tek bir kimse bulmadı, birçok kimsenin katkısı oldu. Bununla birlikte daha az devrimci bir teori değildir! Teori, kafamızdaki güçlü kuvvet imajını tamamen değiştirdi! Bütünüyle keyfi olmak yerine, şimdi elimizde Doğa'nın sadece bir tane temel sabiti vardı ve bu daha önce teori tarafından verilmemişti. Bundan sonra geriye kuarklara kütle değeri vermek kalıyordu. Eğer kuarklar birbirlerine çok yakın duruyorlarsa, o zaman bu kütlenin fark edilebilir bir etkisi vardır; aksi halde bu kütleler pek fark edilmez. Buradan hadronların tüm özelliklerinin hesaplanabileceği anlamını çıkarıyoruz. Çok değil, bundan birkaç yıl önce, Cargèse yaz okuluna katılan hiç kimse böyle güçlü bir teoriyi hayal bile edememişti.

Teorinin yavaş yavaş ilgi toplamaya başlaması anlaşılır bir şey. İlke olarak hesapları yapmak mümkündü, ancak güçlü bilgisayarların hadron kütleleri hakkında ilginç bazı sonuçlar vermesi için epeyce zaman geçmesi gerekiyordu. Örneğin, çok küçük uzaklıklar söz konusu olduğunda, güçlü kuvvetin kendisini zayıf bir kuvvet olarak gösterdiği şeklinde öngörüler yapılmıştı. Fakat bunlar deneyle nasıl doğrulanabilirdi?

Şu andaki merakımızı gidermek bakımından hikâyemin sonundan başlayayım. Eğer parçacıklar normal atom-altı cisimlerin (hadronlar) kütlelerinden daha büyük enerjilerle birbirlerine doğru fırlatılırlarsa, o zaman bu hadronlar, içinde kuarkların küçük, sert çakıl taşları gibi hareket ettiği süngerimsi bir kartopu gibi davranırlar. Çoğu çarpışma sırasında bu kuarklar birbirlerini geçerler ve kartopu parçalanır. Düzgün doğrusal hareketlerine devam eden kuarklar (ve gluonlar), enerjinin çoğunu taşırlar. Bu tür çarpışma olayları genelde fazla ilginç değildir; Şekil 15'e bakın.

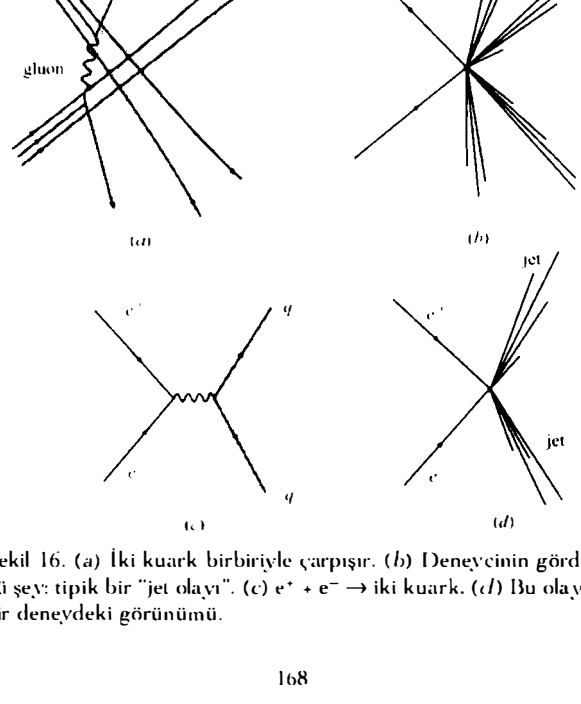
Bununla birlikte, ara sıra iki kuarkın birbirlerine çarptığı tepkimeler görülür. Kuarklar yanlara doğru hareket ederler ve renklerini nötralize etmek için arkalarından gluon ve kuarkları sürüklerler. Bu şekilde, özgün kuarkların yeni yörüngelerini izleyen iki (bazen daha fazla) hadronik parçacıktan



Şekil 15. (*a*) İki proton birbiriyle çarpışır, ama kuarklar birbirine çarpmaz ("periferal" bir çarpışma). (*b*) Deneycinin çarpışma sonunda gördüğü durum.

meydana gelen tıkız bulutlar elde edilir. Bu bulutlara jet diyoruz. Deneycilerin gözledikleri şey Şekil 16'da görülüyor.

Jet teorisine 1977'de George Sterman ve Steven Weinberg öncülük etmişlerdi. Başka deneylerde kuarklarla birlikte gluonların da "jet" meydana getirdiği gözlendi. Örneğin, bir elektronu bir pozitronun üzerine fırlatırsanız, bu ikisi bir foton yayarak kendilerini yok ederler. Bu foton bir kuark antikuark çifti oluşturur (Şekil 16 (*c*)). Ortaya çıkan kuarklar tekrar hadron bulutları oluştururlar: iki jet



Şekil 16. (*a*) İki kuark birbiriyle çarpışır. (*b*) Deneycinin gördüğü şey: tipik bir "jet olayı". (*c*) $e^+ + e^- \rightarrow$ iki kuark. (*d*) Bu olayın bir deneydeki görünümü.

(Şekil 16 (*d*)). Bazen ilk çarpışmada üçüncü ya da dördüncü bir parçacık yaratılır (çoğunlukla gluonlar). Bunlar da sonunda kendilerini jet şeklinde gösterirler. Kısaca, bir çarpışma olayında meydana gelen orijinal kuark ve gluonlar kendilerini jet şeklinde sakladıklarından varlıklarına ihanet ederler. Bu jetler hassas bir şekilde ölçülerek teorinin geçerliliği doğrudan doğruya sınanabilir. Özellikle şimdi, kuarklarla gluonlar arasındaki etkileşim şiddetinin ölçülmesi de mümkündür.

Her seferinde yeni ve daha güçlü parçacık hızlandırıcıları devreye giriyor. Bu şekilde yeni ve daha büyük enerji bölgesi incelenmiş oluyor. Böylece kuark gluon etkileşim şiddetini artan enerjilerde ölçebiliriz. Enerji arttıkça özgün kuarklar birbirlerine daha da yaklaşır. Görüyoruz ki, daha yüksek enerjilere çıktığımızda, etkileşim şiddeti "asimptotik özgürlüğe" tamamen uygun bir şekilde giderek azalır.

XIV. Bölüm

Manyetik Tekkutup

1973 ve 1974 yıllarında müebbet kuark hapsi problemi çok ilgimi çekmeye başlamıştı. Bildiğimiz tek şey şuydu: Küçük mesafelerde çıplak kuarkların üzerine etki eden renk kuvvetleri, büyük mesafelerde giydirilmiş kuarklara etki eden kuvvetlere göre daha küçüktü.

Bir önceki bölümde bahsettiğim gibi buna "negatif perdeleme etkisi" diyoruz. Eğer bu etki büyük mesafelere uzatılırsa, öyle görülüyor ki, kuarklar arasındaki renk kuvvetleri artmaya devam eder. Kuvvetler yüksek değerlere çok çabuk ulaştıkları için, kuarkları ebediyen birbirlerine bağlı-

yorlar. Ama gerçekte olan bu mu? Asıl zorluk, kuvvetlerin çok büyümesinden dolayı hesapların neredeyse yapılamamasından kaynaklanıyor. Yapabildiğimiz tek şey, yaklaşık olarak düzgün doğrusal hareket eden parçacıklar için yaptığımız hesaplardır. Şüphesiz kuvvetler çok güçlü olduğunda kuarklar düzgün doğrusal hareket yapamazlar. O zaman akla şu soru geliyor: Kuarkların hep görünmez kalması için temel bir neden mi var? Şekil 14'de gösterilen renk teorisinin alan çizgileri niçin sosis gibi görünüyor da, "normal" elektrik ve manyetik alanlar gibi etrafa dağılmıyorlar? Bu açıklanabilmiş olsa, hadronların özelliklerini belirtmek için belki de bir hesaplama yöntemi bulunabilir. Bir cevap bulabilmek için her türlü şeyi denedim.

Kopenhag'dan Holger Nielsen ile Paul Olesen ve bağımsız olarak CERN'den Bruno Zumino, benim daha önce fark etmediğim bir şeyi keşfettiler. Söyledikleri şey şu: Bir süperiletken madde ele alın, içine bir manyetik tekkutup koyun. Evet, manyetik tekkutupların mevcut olmadığını biliyoruz ama her zaman böyle bir şey düşleyebilir ve o zaman süperiletkenin nasıl davranacağını hesaplayabiliriz. Normal bir mıknatısın aksine manyetik tekkutup bir parçacıktır ve bir manyetik kuzey kutbu olduğu halde güney kutbu yoktur (ya da tersi). Tekkutuplar hiçbir zaman görülmedi ama bu konuda daha söylenecek şeyler var.

Daha önce açıkladığım gibi, bir süperiletken herhangi bir elektrik ya da manyetik alanı içine almaz: Alanları tamamen dışarı atar. Ancak, tekkutup bir kere süperiletkenin içine tamamen girdiğinde, süperiletken onu dışarı atamaz. Süperiletken, bir tekkutubu içine alırken küçük bir bölge oluşturur ve bu bölge artık süperiletken gibi davranamaz. İşte tekkutubun manyetik alan çizgileri bu bölgenin içine girer. Süperiletken bunu en az enerji harcayacak şekilde yapar. Hesaplar bir manyetik kuzey kutbu ile bir manyetik güney kutbu arasındaki alan çizgilerinin, tam tamına Şekil 14'deki sosis şeklini aldığını göstermektedir. Sosis şekline gelmiş bir madde hiçbir zaman süperiletken değildir. Bununla birlikte, böyle bir bölgeyi yaratmak belirli bir enerjiye mal olduğu için, mümkün olduğu kadar küçük olması gerekir. İşte bu yüzden alan çizgileri etrafa dağılmaz (Şekil 17(a)'ya da bakın).

Böylece Nielsen, Olesen ve Zumino kuarklar için bir model bulmuş oldular. Kuarklar bir cins tekkutup gibidir ve uzayımız da bir çeşit süperiletkendir. Bunları daha önce görmüştük: bir Higgs teorisi!

Ne yazık ki kuarkların gerçekten manyetik tekkutup olduklarını savunmak kolay değil. Çok inandığım kuantum renkdinamiğine göre, 1973 yılına kadar kuarkların manyetik yüke benzeyen herhangi bir tarafı yoktu. Kuantum renkdinamiğini bir an için unuttuğumuzu varsayalım ve manyetik tekku-

tup teorisini ele alalım. O zamanlar manyetik tekkutupların hareketlerini tam olarak anlatan tek bir yararlı teori yoktu: Çünkü manyetik tekkutup yüklerinin her zaman güçlü olması gerekiyordu. Eğer bütün bu yük, kuark gibi noktasal bir parçacık üzerine konursa, bu tür parçacıklar arasındaki kuvvetler en yakın mesafelerde bile daima çok güçlü olacaktır: Yani asimptotik özgürlüğe elveda. Böyle bir teoride artık hiçbir şey hesaplanamaz.

Ne var ki bu fikir beni adeta büyüledi. Kendi kendime dedim ki bunu bir Yang-Mills teorisinde yaparsak ne olur? O zaman çok garip bir zorlukla karşılaştım. Sosis biçimindeki alan şekillenmesi diyerek başladığımız "akı tüpleri" kararsız hale geliyordu. Ama bu nasıl olur? Manyetik tekkutbun manyetik alan çizgileri, başka bir tekkutbun bulunduğu yerde sona erer. Eğer akı tüpü kayboluyorsa o zaman alan çizgileri nereye gidiyor? Bu hayali deneyden çok önemli bir sonuç çıkarılacağını gördüm. Ele aldığım modeldeki akı tüplerinin bozunmasının akla yatkın tek nedeni, olsa olsa başka bir kuzey kutup ile güney kutbunun kendiliğinden oluşmuş olmasıdır. Böyle bir şeyin bir ayar teorisinde olup olamayacağı o zaman belli değildi! Bu yeni ve önemli bir şeydi.

Kuark hapsi problemini unutalım. İncelemekte olduğum modelin güçlü kuvvetle hiçbir ilişkisi yoktu. Farkında olmadan tekrar zayıf kuvvet teorisine dönmüştüm. 1974 yılında literatürde bu tür bir yı-

ğın model vardı. Bu modellerin bazılarının sadece anlatmak istedikleri parçacıkları değil, bunlara ek olarak manyetik tekkutupları da içerdiğini gösterdim. Özellikle Glashow ile birlikte daha genç bir araştırmacı olan Howard Georgi'nin bir süre önce ortaya attığı bir model tekkutup içermeliydi; bu tekkutupların yapıtaşları modeldeki parçacık ve alanlardı. Bu "manyetik tekkutup" için yapılan eski teorilerden tamamen farklı bir şeydi; eski teorilerde noktasal tekkutuplar ile diğer bilinen noktasal parçacıkların varlığı bir varsayımdan ibaretti. Ancak benim tekkutuplarım hiç de noktasal olmayıp, uzayda belirli bir yer işgal eden, yumuşak nesnelerdi. Kütleleri dahil bütün özelliklerini hesaplayabilmiştim. Bunların daha önce yapılması olanaksızdı. Bütün bunların daha önceden yapılmamasının nedeni, bu yeni cisimlerin enerjilerinin ya da kütlelerinin "normal" parçacıkların enerji ya da kütlelerinden kısmen daha büyük olmasından ileri gelmekteydi. Bu ilginç buluşu, Londra'da düzenlenen bir temel parçacıklar konferansında açıkladım. Anlaşıldı ki aynı buluş, Moskova'da Alexander Polyakov'un Lev Okun ile yaptığı bir tartışma sonunda da ortaya çıkmıştı.

Daha önceleri, 1931'de, Paul Dirac, manyetik tekkutup parçacıklarının bulunabileceğini ileri sürmüştü. Genel ilkelerden hareket ederek, bir elektronun temel elektrik yükü ile muhtemel bir manyetik tekkutbun temel manyetik yükünün çar-

pımının Planck sabitinin daima tam sayı katı olması gerektiğini kanıtlamıştı. Manyetik tekkutuplar için bir model yapmak istenirse bu pek uygun olmayan bir şeydir. Çünkü tekkutbun manyetik yük birimi, elektrik yük biriminin 68,5 katıdır (bu sayı ünlü 137,036...'nın tam yarısıdır; IV. Bölüm'deki "elektromanyetik kuvvet" başlığı altında verilen kutuya bakınız). Eğer kuarklar tekkutup olsalardı hiçbir zaman asimptotik olarak özgür olamayacaklardı!

Kuşkusuz, bilinen pertürbasyon yaklaşımını izleyerek manyetik tekkutuplarla her şeye rağmen uğraşan ve çok umutsuz sonuçlar elde eden pek çok araştırmacı olageldi. Benim tekkutbum bir noktasal parçacık olmayıp, bir alan demetinden ibaretti. Manyetik yükün çok küçük olması halinde geçerli olan pertürbasyon yaklaşımı burada gerekli olmadığı için benim tekkutbum* çok daha güzeldi. Kütlesini tam olarak hesaplayabilmiş olmam çok önemli bir olaydı, çünkü o ana kadar hesaplanması mümkün olmamıştı. Eğer Georgi-Glashow modeli doğruysa, manyetik tekkutup hidrojen atomundan yaklaşık 8000 kere daha ağır olmalıydı.

Benjamin Lee bundan çok etkilendi ve onunla bu konuyu Londra'da tartışırken kulak kabartan biri bana sürpriz bir soru yöneltti: "Hey sen, manyetik tekkutup için bir model daha mı öneriyorsun?" Lee

* Benim tekkutbum diyorum ama aslında Polyakov ile Okun'a da ait.

dedi ki: "Hayır, hayır, onun modeli yok, o bir tekkutup buldu!" Benjamin Lee'ye hep hayran olmuşumdur. Görüşmemizden birkaç yıl sonra bir trafik kazası onu bu dünyadan aldığında, temel parçacıklar fiziği önemli bir ismini yitirmiş oluyordu.

Georgi-Glashow modeli manyetik tekkutupları içeriyordu ama ne yazık ki Weinberg-Salam-Ward modelinde böyle bir durum söz konusu değildi ve teknik engeller yüzünden benim tekkutbum bulunmuyordu. Bu yüksüz akımdan kaynaklanıyordu. Georgi-Glashow modelinde ise yüksüz akım yoktu. Yüksüz akımların deneysel olarak bulunduğunu biliyorsunuz (Londra konferansında yüksüz akımlar önemli bir olaydı!). Bu şekilde Weinberg-Salam-Ward modeli geniş bir kabul görürken, Georgi-Glashow modeliyle diğer modeller ilgi çekmez olmuştu. Manyetik tekkutuplar gerçekten varsa, tahminen kütlelerinin Georgi-Glashow modelinden çıkan 8000 proton kütlesinden çok daha ağır olması gerekir.

Bu teorik gelişme, deneycileri deniz suyunda, ay taşlarında ve istiridyelerde* manyetik tekkutup arama konusunda hemen harekete geçirdi. Süperiletken halkaları bulunan çok hassas dedektörler yapıldı. Tek bir olay kaydedilir gibi oldu. Ancak alet yeniden gözden geçirilip ölçme etkinliği artırılınca görüldüğü sanılan sinyal kayboldu. Bu, deneylerde

* İstiridyeler deniz suyundan tuhaf mineralleri emerek bünyelerinde depolarlar.

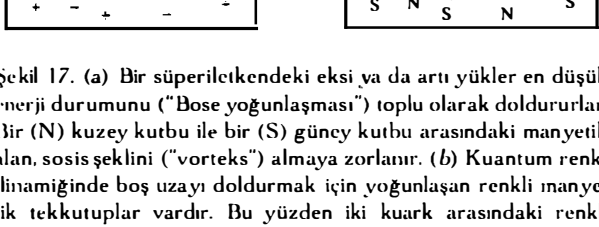
çok bilinen bir olaydır; ilk sinyalin yanlış bir yorum üzerine oturtulduğunu gösterir (ilk gören fizikçi de sinyalin güvenilir olmadığını kabul etti).

Manyetik tekkutbun mevcut olup olmadığını hâlâ bilmiyoruz ama, bu teorik olasılığın keşfi iki nedenden dolayı önemini koruyor. Daha sonra göreceğimiz gibi, Weinberg-Salam-Ward modelinin, günümüzde mevcut olan makinelerde deneysel olarak gözlenen parçacıkları doğru olarak anlattığını kabul etmemiz akla yatkındır. Ancak, bir laboratuvarda, bir tek parçacığa verilecek enerji miktarı sınırlıdır. Bu enerjilerin çok ötesinde beklenen fiziksel olaylar ancak Weinberg-Salam-Ward modelinin daha da genişletilmesiyle anlaşılabilir. Geliştirilecek olan teorinin nasıl bir şey olduğunu henüz bilmiyoruz, ama " 't Hooft-Polyakov tekkutbu"nun bir çözüm olarak ortaya çıkma olasılığı var. XXII. Bölüm'de anlatacağım model gerçek, bununla birlikte çok ağır manyetik tekkutupları içeriyor.

Bazı teorisyenler "izin verilen her şey zorunludur" iddiasında bulunuyor. Bu şu anlama gelir: Teorik olarak düşünülen her yapı Doğa'da herhangi bir yerde bulunuyor olmalı. Korkarım bu her zaman doğru değil ama manyetik kutuplar için geçerli. Teorik olarak öngörülüyorsa, Evren'in çok erken dönemlerinde bunlardan hangi miktarda meydana gelmiş olduğunu hesaplamak da mümkündür. Bu hesapların sonuçları Evren'in erken evrelerini anlamak isteyen teorisyenlerin başını ağrıtır. Tüm

bu tekkutupların şu anda gördüğümüz Evren'den çok farklı bir Evren görüntüsü vermesi gerekirdi. Gerçekten bu kozmolojik hesaplar manyetik tekkutupları içeren parçacık modellerini sınırlamak için kullanılmaya başlandı bile.

Tekkutuplarla ilgili ikinci önemli nokta, kuantum renkdinamiğinin büyük miktarlarda renk manyetik tekkutupları içerdiğini anlamaya başlamış olmamızdır. Bu renk manyetik tekkutuplarının bir çeşit Bose yoğunlaşmasına uğradıkları varsayılırsa, kuantum renkdinamiğindeki kuark hapsi olayının daha gerçekçi bir şekilde açıklanmasına başlanmış demektir: Nielsen ve Olesen'in özgün fikirlerini kullanıyoruz (Şekil 17(a)), ancak tüm elektrik yük ve alanlarını, manyetik yük ve alanları ile değiştiriyoruz. Kuarklar renk elektriği; çevreleyen vakum ise bir renk manyetik süperiletkendir! Bakınız Şekil 17(b).



Şekil 17. (a) Bir süperiletkendeki eksi ya da artı yükler en düşük enerji durumunu ("Bose yoğunlaşması") toplu olarak doldururlar. Bir (N) kuzey kutbu ile bir (S) güney kutbu arasındaki manyetik alan, sosis şeklini ("vorteks") almaya zorlanır. (*b*) Kuantum renkdinamiğinde boş uzayı doldurmak için yoğunlaşan renkli manyetik tekkutuplar vardır. Bu yüzden iki kuark arasındaki renkli elektrik alan bir vorteks şeklini almaya zorlanır.

Bu zor ancak büyüleyici bir cisim. Renk manyetik tekkutbu ile Büyük Bozyap Bulmacasının başka bir parçası yerine oturuyor gibi. Nielsen-Olesen çözümü ve manyetik tekkutup, matematikçileri ve fizikçileri bugün de meşgul eden Yang-Mills teorilerinin üstün matematiksel özelliklerinin bir dizisinin başlangıcı olacakmış gibi görünüyor.

XV. Bölüm

Çingene

1974'ün Kasım ayında temel parçacıklar dünyası sürpriz bir buluşla sarsıldı. Yeni bir parçacığın doğum haberi verildiğinde ben Paris'teydim. "Yeni bir parçacık mı?" diye hayrete düşmüş olabilir ve "Zaten bir sürü parçacık var, bir tane daha olsa ne olacak?" diye sorabilirsiniz. Bu parçacığın mevcut parçacık dizilerinden hiçbirine uymadığı anlaşıldı. Keşif iki deney ekibi tarafından bağımsız olarak yapılmıştı.

Samuel Ting, New York yakınlarında Brookhaven'da, çok yüksek enerjili protonların ağır bir malzemeden yapılmış bir hedefle çarpıştırıldığı

bir deneyin lideriydi. Ting ve grubu, aletlerinde aylardır acayip bir "sinyal" görüyorlardı. Ting, bu sinyalin yeni bir parçacık olabileceğine inanmakta güçlük çekiyordu; çünkü böyle bir şey doğruysa bunun çok ilginç bir şey olması gerekirdi. Deneyi defalarca tekrarladı (basit bir yanlışın kurbanı olma olasılığını da gözden geçirdi) ve ekibindeki fizikçilere ağızlarını sıkı tutma emrini verdi.

Ting'in *J* adını verdiği yeni parçacık olağanüstü verimli bir biçimde bir elektrona ve bir pozitrona bozunuyordu. Aslında onun gözlediği şey bu parçacık çiftleriydi ve bağıl enerjilerini ölçtüğü zaman anlaşıldı ki, bunlar 3100 MeV kütleli (üç proton kütlesinden daha fazla) yeni bir maddeden çıkıyorlardı. Parçacık fiziği yasaları, bu cismin, her birinin enerjisi 1550 MeV olan elektron ve pozitronların kafa kafaya çarpıştırılması sonucunda da elde edilebileceğini söyler.

Kaliforniya'da Stanford yakınlarında SLAC ("Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezi") adlı bir laboratuvar var. SPEAR denilen yeni bir hızlandırıcıda elektron ve pozitronlar birbirleriyle çarpıştırılıyordu. Ting, SPEAR makinesinin her bir parçacık için 1500 MeV civarında bir enerjiye ayarlandığını duyunca, bulduğu sonucu yayımlaması gerektiğini anladı. Ancak biraz geç kalmıştı: SLAC'daki dedektörlerin sayaçları birdenbire çılgınca saymaya başlamışlardı bile!

Elektron ve pozitronların her birine 1540 ya da 1560 MeV'lik enerji verilirse birbirlerini görmezlikten gelirler. Elektron ve pozitron hüzmeleri pratikte hiçbir etkileşmeye uğramadan birbirlerinin içinden geçip giderler. Fizikçiler her an bir çarpışma olayı beklemeye alışmışlardı. Ancak makinelerini 1550 MeV/parçacık'a ayarladıklarında, aniden bir sürü direkt çarpışma meydana geliyordu. Bu ortalama olarak saniyede bir çarpışmadır. Yaratılan yeni parçacıklar hemen yeniden bozunarak dedektörlerde sinyal bırakıyordu. Bu deneyin lideri olan Burton Richter'e göre çarpışma frekansındaki ani artış makinedeki bir kusurdan kaynaklanmıyordu. Richter, Ψ (SPEAR'deki ilk iki harfe atıf olarak, psi) adını verdiği yeni parçacığın keşfini ilan etti. Dedektörlerdeki çılgınca tıkırtılar yükseltildi ve SLAC'daki çalışanlar yeni keşfi görsünler diye laboratuvardaki iletişim şebekesine verildi. SLAC'dakilerin ancak bundan sonra Ting'in sonuçlarından haberleri oldu. Ting ve Richter'in aynı keşfi yaptıklarına inanmamak için artık bir neden kalmamıştı.

J/Ψ'de (İngilizce "gypsy" sözcüğünün okunuşuna (cipsi) benzerliğinden dolayı, konuşma dilinde "çingene" olarak adlandırılır.) böylesine acayip olan ne vardı ki parçacık tablosunda ona göre bir yer bulunamıyordu. J/Ψ çok değişik şekillerde bozunabilir: $e^+ + e^-$, $\mu^+ + \mu^-$, 5π, 7π, 9π, $2\pi + 2K$. Ancak, daha az olmakla birlikte başka sayıda pionlara,

kaonlara ve baryon-antibaryon çiftlerine de bozunabilir. Bazen bir fotonun çıktığı da görülür. Ecole Normale Supérieure'ün Paris laboratuvarında bulunduğum sıralarda SLAC takımının bir elemanı, yeni parçacık hakkında öğrendiklerini açıklamak üzere, tıklım tıklım dolmuş olan konferans salonuna geldi. Konuşmasını gözlemlerinin muhtemel teorik açıklamasının bir listesini vererek ve yeni parçacığın nasıl görülebileceğini belirterek bitirdi.

Bu bir mezon muydu? Ortalama ömrü (10^{-20} saniye), bir mezonun ömrüne göre oldukça uzundu. Bu bozunmaların gerisinde yatan bir korunum yasası mı var? Ancak, böyle bir bozunmaya neden olan kuvvetin zayıf kuvvetten çok daha güçlü olması gerekir. Yeni parçacık bir cins foton muydu? Bu görüşü destekleyen bazı belirtiler vardı. Tıpkı normal foton gibi spininin 1'e eşit olduğu anlaşılıyordu. Acaba bu zayıf kuvvetten sorumlu bir Yang-Mills fotonu muydu? Ama kütlesi beklenenden çok düşüktü. Yoksa güçlü kuvvetin taşıyıcısı mıydı? Bu doğruysa kuantum renkdinamiği hakkında bildiğimi sandığım kesinlikle hiçbir şey doğru olamazdı.

Bir öneriye göre, J/Ψ çok uzun zamandır araştırdığımız bir tılsımlı (charm) kuark c ile onun antiparçacığı olan $\bar{c}$'nin bir bağlı durumu olmalıdır. Kafamdan şimşek gibi bir düşünce geçti. Yanımda oturan arkadaşıma "Hey, en güçlü olasılık bu. Bunda yanlış olacak ne var?" dedim. Birçok teoris-

yeninkine benzer bir cevap vererek dedi ki: "Hiç de bile, sıradan bir mezon olmalı, ama o zaman ömrü daha kısa olmalıydı!" c ve $\bar{c}$ güçlü kuvveti kullanarak birbirlerini yok edebilirler; uzun süre bu işlemi yapmalarını engelleyen nedir?

Bu cinsten daha fazla parçacık olduğu haberini aldığımızda şoktan henüz kurtulmuştuk. Yaklaşık 3700 MeV kütleli Ψ' ve 3770 MeV ağırlığındaki Ψ'' olmak üzere iki parçacık daha bulunmuştu. Ancak bu sonuncu, iyi bir rezonans gibi davrandığı için daha kararsızdı. Acaba renkli bozonları mı bulmuştuk, yoksa bunlar yeni bir rezonans serisinin başlangıcını mı oluşturuyordu?

Şimdi, aklıma gelen parlak bir fikirden daha bahsedeyim. Bu konuda gerçekten öncülük yaptığım iddiasında bulunamam. Çünkü, J/Ψ'nin bir $c\bar{c}$ mezonu olduğu, daha ayrıntılı deneyler ile ve deneycilere benden daha yakın olan çeşitli teorisyenlerin yaptığı teorik analizlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştı. Bu sonuca varanlar çok coşkuluydular, çünkü tılsımın gerçekten var olduğunu gösteren en açık sinyal buydu. J/Ψ ya da $c\bar{c}$'nin çok merak edilen kararlılığı, asimptotik özgürlükten kaynaklanıyordu. Niçin?

c kuarkı daha önce tartıştığımız u, d ve s kuarklarından daha ağırdır. Bir bağlı durumunda her iki kuark da "normal" kuarklara göre birbirlerine daha yakın durumda bulunurlar - kuvvetli etkileşim yapan bir cismin titreşim yapacağı tipik uzaklık

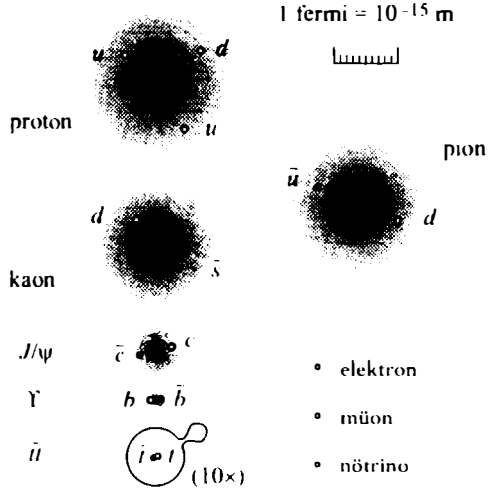
kütlesiyle ters orantılıdır. Bu yüzden "$c\bar{c}$ mezonu" diğer mezonlardan çok daha ufaktır. Küçük mesafelerde etki ettiğinde güçlü kuvvetin daha az güçlü olduğunu ve bunun negatif yük perdelemesi etkisinden ileri geldiğini hatırlayabilirsiniz (XIII. Bölüm). Bu göstermektedir ki $c\bar{c}$ sistemi içindeki bütün kuvvetli etkileşimler alışılmadık bir şekilde yavaşlamaktadır. İşte bu yüzden, bu mezon kuzenleri olan $s\bar{s}$ (phi rezonansı), $u\bar{u}$ ve $d\bar{d}$ (rho ve omega) rezonanslarına göre çok daha uzun yaşar.

Bir elektronla pozitronun bağlı durumu hafif bir "element"e benzer ve bu nedenle buna "pozitronyum" denir. Bu yakın benzerlik nedeniyle bağlı durumuna da hemen "charmonyum" adı verildi. Charmonyum için güçlü kuvvetin nispeten zayıf olması, birçok hesabın diğer kuvvetli etkileşim süreçlerinde alışık olduğumuzdan daha büyük bir hassasiyetle yapılabilmesine yol açar. İşte bu yüzden, charmonyum sistemi güvenilir bir şekilde kuantum renkdinamiği hesaplarını yapmamıza izin veren ilk sistemdir! Doğrusunu söylemek gerekirse, charmonyumun ömrünün hesabı pozitronyumun ömrünün hesabına çok benzemeliydi. Pozitronyum elektromanyetik kuvvet aracılığıyla fotonlara bozunabilir. Charmonyumun ömrünü hesaplamak için yapılması gereken tek şey, pozitronyum için yapılan hesaplamayı almak ve elektrik yükünü kuvvetli etkileşim bağlanma sabiti ile değiştirmekti.

Hesabın kendisi çok karmaşıktı. Bu, bir zarfın arka yüzünde yapılacak türden bir hesap değildi. Eve döner dönmez kitaplarda pozitronyumla ilgili çalışmalara baktım. Orada daha önce düşünmediğim bir şeyin farkına vardım. Spin 1 bağlı durumuna baktığınız zaman bunun iki fotona bozunmadığını görebilirsiniz; en az üç tane foton olması gerekir. Sonuç olarak bu şunu gösteriyordu: Bozunma olasılığı, her durumda, kuvvetli bağlanma sabitinin altıncı kuvvetiyle orantılı olmalıdır. J/Ψ'nin uzun ömrünü açıklamak için, $c\bar{c}$ sisteminin kuvvetli etkileşim şiddetinin, $s\bar{s}$ ya da $u\bar{u}$ sistemlerinin kuvvetli etkileşim şiddetlerinden çok az daha zayıf olması gerekir.

J/Ψ parçacığı, iki kuark birbirini yok ettiği zaman üç gluon yaratarak bozunur. Bu gluonlar daha sonra pion, kaon ve benzeri parçacıklar yaratırlar; birinci etkileşim yavaş geliştiğinden J/Ψ'nin toplam ömrünü bu etkileşim belirler. Sayılar yerine konularak gözlemle uyumlu sonuçlar elde edildi. Parçacık fiziği topluluğunun bu açıklamayı kavraması ve kabul etmesi ise çok zaman almadı.

Tılsımlı kuark kendi antiparçacığı olmadan da diğer normal kuarklarla birleşerek varlığını muhafaza etmeliydi. Özellikle, $c\bar{u}$, $\bar{s}c$ türünden mezonların ve hatta *udc*, *usc* gibi bileşimlerden meydana gelen diğer baryonların da olması gerekirdi. Olağandışı çarpışma süreçlerinin kayıtlarından bu hadronların varlığını işaret eden birkaç sinyal zaten gözlenmişti, ancak ayrıntılı bilgi çok azdı.



Şekil 18. Parçacık büyüklükleri.

Artık c kuarkının özellikleri çok hassas bir şekilde belirlenebilirdi ve deneyciler bunları nerelerde bulabileceklerini kesin olarak biliyorlardı. Bu parçacıkların kütlelerini hesaplarken, daha ağır olan Ψ''nün direkt olarak tılsımlı mezonlara bozunduğu sonucuna varmak makul görünüyordu. Bu bozunma, tılsımlı kuark ile antikuarkının önce birbirlerini yok etme sürecini gerektirmediği için, J/Ψ'den daha hızlı meydana gelir. Bu da Ψ''nün daha az kararlı olduğunu ve aynı zamanda tılsımlı mezonları aramak için de Ψ'' bozunma ürünlerinin niçin ideal bir yer olduğunu açıklar. Yeterince emin olunca, istenen yerde bu parçacıklar bulundu.

J/Ψ de müon gibi kimsenin ısmarlamadığı bir parçacık mıydı? $c\bar{c}$ mezonlarını bulmak için çeşitli

girişimlerin olduğunu göz ardı etmemek gerekir. Ancak renkli kuvvetteki asimptotik özgürlüğün sonuçları yeteri kadar iyi değerlendirilememişti. Bu mezonların daha çok bilinen kuark ve antikuarklardan oluşmuş ρ (rho) ve φ (phi) rezonanslarına benzeyeceği ve spin 1 durumunda olacağı sanılıyordu. Şimdi kafamızı duvara vuruyoruz: J/Ψ hakkındaki her şeyi öngörebilirdik!

J/Ψ bizim Büyük Bozyap Bulmacamızın çeşitli gevşek parçalarını bir araya getiren bir elemandır. Bir tarafta, GIM mekanizması yoluyla zayıf kuvvet teorisini düzeltmek için gerekli olan tılsımlı kuarkımız kayıptı; öte yanda, asimptotik özgürlüğe sahip olan kuantum renkdinamiğinin bizde şaşkınlık yaratacak şekilde teorik kurallara uygun bir davranış gösterdiği ortaya çıkmıştı. Şurası açık ki, kuantum renkdinamiği basitleştirilmiş bir model değildi: O zamana kadar çok azımızın ciddiye aldığı teorinin ayrıntıları deneyle tamamen uyum içerisindeydi!

Veltman, tipik şüphecilerden biriydi. "Eğer bir teoriniz varsa, her şey gayet iyi uyuşuyor demek yerine, hesap yaparak öngörülerde bulunmanız gerekir" diyordu. Bir öngörüde bulunmak için hazırlanmıştım. J/Ψ'deki kuvvetler zayıf olduğundan orada kuarklar ışık hızına göre daha yavaş hareket ederler. Bu nedenle, bu kuarkların spin etkileri nispeten daha az önemli olmalıdır. J/Ψ'de iki kuark aynı yönde döner; işte bu yüzden, bu birleşimde toplam spin 1'e eşittir. Ancak, ters yönde de döne-

bilirler. O zaman spin 0 durumu elde edilir. Bu da yeni bir parçacık demektir ve deneyciler onu aramaya çoktan başlamışlardı bile. Spin 0 parçacığını bulmak J/Ψ'yi bulmaktan daha zordur (elektronlarla pozitronları çarpıştırıp, doğrudan doğruya yaratılamazlar). Benim hesaplarıma göre spin 0 parçacığının kütlesi J/Ψ'nin kütlesinden biraz daha az olmalıydı. Normal kuarklarda kütle farkları nispeten daha fazladır. Henüz bulunmamış olan parçacığın kütlesinin 3000 ile 3100 MeV arasında olması gerektiğine inanıyordum. Birçok fizikçi ise daha az kütleli olacağını tahmin ediyordu.

Bu benim kaybettiğim bir iddia oldu. η_c olarak adlandırılacak yeni spin 0 parçacığı, "η (eta) mezonunun tılsımlı hali", iddia ettiğim limitin hemen altında, 2980 MeV kütleye sahip olarak ortaya çıktı. Yukarıda bahsettiğim gibi, η_c elektron pozitron çarpışmasından elde edilemez. Kuşkusuz e^+ ve e^-'ye de bozunamaz. Bu tür bir bozunmanın olabilmesi için önce bir foton yaratılmış olmalı ve arkasından bu foton elektron-pozitron çiftine dönüşmelidir. Ancak, fotonun spini 0 değil 1'dir. Deneycilerin η_c'yi görmeleri için J/Ψ'nin bir foton ile η_c'ye bozunmasını beklemeleri gerekiyordu. Bu bozunma çok az görülür; meydana gelse bile analizi pek kolay değildir. Ancak deneyciler bu tür problemlerle karşılaştıklarında gerçek bir sanatçı gibidirler.

η_c'nin tahmin ettiğimden daha hafif olmasının nedeni, kuarklar arasındaki güçlü kuvvetin henüz

yeteri kadar zayıflamamış olmasıdır. Bu yüzden, doğrudan yapılan pozitronyum hesaplarındaki sapmalar zaten dikkate alınır. İddiamda biraz ileri gitmiştim.

Benden yaşlı olan fizikçi meslektaşlarım geriye, "fiziğin o parlak günlerine" sık sık özlemle bakarlar. Onların bahsettikleri dönem yirminci yüzyılın ilk yarısında yapılan büyük keşiflerdir: kuantum mekaniği, genel görelilik teorisi, kuantum elektrodinamiği ve ilk temel parçacıkların bulunmaları. Ancak benim için "parlak günler" elektromanyetik kuvvete ve zayıf, güçlü kuvvetlere ait Bozyap Bulmacasının birçok parçasının yerini bulduğu 1970 ile 1976 yılları arasıdır. J/Ψ'nin 1974'deki keşfi en büyük olaydı. Bu keşif yapılmadan önce doğru bir zayıf etkileşim teorisine sahip olup olmadığımız konusunda şüpheler vardı. Ayrıca, güçlü etkileşim teorisinin çok fazla karışık ve anlaşılmaz bir şeyin idealleştirilmesinden başka bir şey olmadığını sanıyorduk. Oysa arkasından, birdenbire bu iki teorinin de ayrıntılarına varıncaya kadar doğru olduğundan emin olduk. Deneyler devam ettikçe hayretimiz giderek arttı. Ayrıntılar çoğumuzun düşündüğünden daha hassastı. Bir şey her zamankinden daha açıktı: Matematik yasalarına çok titiz bir şekilde bağlı olan bir dünyada yaşıyoruz. Matematik zordur ama iyi bir şekilde anlaşılabilir.

Belki de bu bizi düşünmeye sevk eden mucizevi şeylerden biridir. Nasıl oluyor da beynimiz, bu son

derece tuhaf atomaltı parçacıkların tamamen yabancı dünyasını en küçük ayrıntısına kadar anlayabiliyor? Beyinlerimiz doğal seçilim kurallarına göre değişime uğramadı mı? En iyi yay ve oku yapıp kullanan kimseye bu yeteneğini torunlarına geçirme fırsatı verilmeyecek mi? Peki, temel parçacıkların ok ve yayla ortak tarafı nedir? Verebileceğim tek cevap, gerçekten birçok ortak yanları olduğudur: Mantık aynı mantık; oklara ve yaylara nasıl uygulanıyorsa temel parçacıklara da aynı şekilde uygulanıyor.

Tılsımlı kuarkı içeren temel parçacıkların ömürlerini ölçmek, deneyciler için ilginç ve yeni bir olaydı. Bu parçacıkların çoğunun ömrü 10^{-12} saniye kadardır ve bu yüzden bütün ömürleri boyunca bir milimetrenin sadece bir kesri kadar yol alabilirler. Bu durumda kabarcık odaları ya da tel odalarıyla çalışmak güçleşir. Ancak deneyciler çok yaratıcıdırlar. Hassas bir şekilde ve daha önemlisi sabırla ölçüm yaparak (bazen bir parçacık biraz daha uzun yaşayabilir) bir izin ortalama uzunluğunu ölçmeyi becerebilirler. Bazen bir parçacık bir mikroskopun altında yeniden incelenmek üzere bir fotoğraf plakasından geçirilir.

XVI. Bölüm

Standart Modelin İhtişamı

Bugüne kadar keşfedilmiş olan parçacıkların elektromanyetik, zayıf ve kuvvetli etkileşimler altında nasıl davrandıklarına ilişkin oldukça ayrıntılı bir harita çıkardık. Şimdiye dek çizilen resimde tam doğru olmayan tek bir şey kaldı: Ortalama olarak bin K_{Uzun} mezonundan üç tanesinin sadece iki piona bozunması ve böylece VII. Bölüm'de belirttiğim *PC* simetri korunumunu bozması. Bu olaydan sorumlu olan kuvvet hangisidir?

Bu problemi özellikle zorlaştıran şey, bugüne kadar bu özel kuvvetin kendisini belli ettiği tek

parçacığın K_{Uzun} olmasıdır.* K_{Uzun} acayip kuark ve aşağı kuarktan meydana gelir. Öyle anlaşılıyor ki kuarklar birbirleri üzerine *PC* altında simetrik olmayan kuvvetler uyguluyor. Böyle bir kuvvet nereden kaynaklanıyor olabilir? Matematiksel formüllerimiz böyle bir kuvveti içermez: Bütün denklemlerimiz otomatik olarak *PC* altında simetriktir. K_{Uzun} bozunmasını açıklayabilmek amacıyla *PC*'yi bozan bir kuvvet terimi ekleyerek modeli tamir etmenin çeşitli yolları bulunmuştu. Hangi durumda olursa olsun, yeni kuvveti taşıyan daha fazla "yardımcı parçacığa" ihtiyaç duyuluyordu.

Öyle anlaşılıyor ki, başka bir Yang-Mills alanı ekleyerek modeli düzeltmeye çalışmak mümkün değil. Spin 1 parçacıkları daima *PC* simetrisini koruyor. (Acaba bu yüzden mi *PC* simetrisinin bozulması çok zayıf kalıyor?)

PC bozulmasının başka bir spin 0 parçacığından ileri gelebileceğini düşünebiliriz; tercihen bu spin 0 parçacığı bir çeşit Bose yoğunlaşmasına uğramış bir parçacık olabilir. Bu durumda "kendiliğinden *PC* bozulması" diyeceğimiz bir olay ortaya çıkar. Bununla birlikte, o sıralar ileri sürülen modeller çok dikkat çekici değildi. Çok sayıda keyfi etkileşim parametresi gerektirdiğinden spin 0 parçacıklarından mümkün olduğu kadar kaçınmayı

* Nötronlarda *PC* bozulmasını görme çalışmaları bugüne dek başarılı olamadı. *PC* bozulmasını D ve $\overline{D}$ ya da B ve $\overline{B}$ mezonlarında arama planları daha umut verici görünüyor.

isteriz. Bu tür parçacıklarla yapılan modeller çok yapmacık oluyor. Kuşkusuz böyle bir yargılama, bu olasılığı dışlamak için tek başına yeterli bir neden değil. Ama göreceğiz ki daha ilginç olasılıklar da var.

Zayıf kuvvetin simetrisini anlamak için Glashow, Iliopoulos ile Maiani'nin tılsımlı kuark fikrini ortaya attıklarını hatırlayacaksınız. Evet şimdi bunu yeniden inceleyelim. Bu kez iki tane daha kuark ileri sürmemiz gerek. İlk dördü elektrik yükleri $+\frac{2}{3}$ ve $-\frac{1}{3}$ olan çiftler oluşturmuşlardı (*u* ile *d* ve *c* ile *s*). Yeni kuark çifti bunlara benzemeliydi. Ancak bunların öncekilere göre daha ağır olması gerekirdi. "Yukarı" ve "aşağı" kuarklara benzer bir şekilde bunlara "üst" (*t*) ve "alt" (*b*) adları verildi. (Bazen aynı harfler daha şiirsel olan truth (hakikat) ve beauty (güzellik) isimleriyle de anılıyor).

Zayıf kuvvete sahip olduğu simetriyi Higgs-Kibble mekanizması aracılığıyla verecek olan bir spin 0 parçacığına gereksinim duyulması kaçınılmazdı. Bu tek Higgs parçacığı, kuark ve leptonlara kenetlenerek onlara kütle kazandırır. Bununla birlikte aynı Higgs parçacığı çeşitli kuark cinsleri arasında geçişler de yaratabilir. Eğer zayıf kuvvet olmasaydı, kuarklar çeşitli kararlı durumlar halinde kalacaklardı. Acayip ve tılsımlı hadronların pek çok farklı türde bozunmalarını sağlayan şey, zayıf kuvvet ile Higgs kuvveti arasında yapılan gizli bir anlaşmadır.

Daha fazla fermiyonumuz olursa, Higgs alanı bu kuarklarla çok sayıda değişik etkileşime girer. Bu durumda elde edilecek kuvvetler için en genel matematiksel ifadeyi Japon fizikçileri M. Kobayashi ile K. Maskawa yazdı ve sonuçta denklemlerindeki bir terimin PC simetrisine uymadığı ortaya çıktı. Böyle bir terim ancak kuark sayısı altı olduğu zaman görülür. İşte bu yüzden, bu yeni kuark cinslerini içeren parçacıklar için bir araştırma başlatıldı. Beklendiği gibi bulundu da! Tablo 6'da yeni "güzellik" kuarkını içeren bazı parçacıklar gösterilmektedir. Bunların bulunması da tılsımlı parçacıkların bulunması çizgisini izledi. 1977'de b ve $\bar{b}$ 'den meydana gelen Υ (upsilon) parçacığı bulundu. Kütlesi yaklaşık 9460 MeV'dir. Daha sonra, kütlesi 5000 MeV'den daha fazla olan ve b kuarkını içeren hadronlar bulundu. Öyle görülüyor ki, bu güzellik kuarkını yaratmak yaklaşık 5000 MeV'lik bir enerjiye mal oluyor.

"Üst" ya da "hakikat" denilen altıncı kuark, yaratılması ve ölçülmesi en zor olanıydı. Bunun nedenlerinden biri de, kütlesinin ne olduğunu teorik olarak öngörmenin çok zor olmasıydı. Giderek artan güçte makineler yapılsa da, deneyciler uzun bir süre herhangi bir şey göremediler. Bu nedenle, bu sonuçlarla tutarlı mümkün olan en küçük kütle değeri sürekli artıyordu. Ancak her şeye rağmen fizikçiler "üst" kuarkın bulunacağından emindiler.

Böylece altı çeşit kuark ("yukarı", "aşağı", "acayip", "tılsımlı", "alt" ve "üst") ve dört lepton (elektron, müon ve bunların nötrinoları) içeren bir modele ulaşmış olduk. Bu model 1970 öncesi parçacık fiziği hakkında bildiğimiz her şeyi açıklayabilecek durumdaydı. Diğer taraftan, ne yazık ki, modelin tamamen doğru olamayacağını da biliyorduk. Modelde çok küçük, kirli bir benek bulunuyordu: İlk görünüşte daha çok matematiksel ve teknik bir probleme benziyordu ve eğer Doğa bu küçük teknik problemimize aldırış etseydi bu çok şaşırtıcı olurdu. Bununla birlikte, gerçek şu ki, eğer altı kuarkla birlikte yalnız dört lepton varsa, renormalizasyon işlemi de istediğimiz gibi çalışmayacaktı. Biz buna anomali diyoruz. Bu anomalinin asıl fiziksel nedenini daha sonra açıklayacağım.

Bereket versin teoriyi düzeltmek oldukça kolay oldu. İhtiyacımız olan tek şey e, ν_e elektron çifti ve μ, ν_μ müon çifti gibi yeni bir lepton çiftiydi, ancak bu leptonlar daha önce saptanamayacak kadar ağırdı. Deneyciler bu lepton çiftini aramaya başlamıştı bile. Bunun nasıl bulunacağına ilişkin doğru yaklaşım ilk olarak 1960 yılında İtalyan fizikçi Antonio Zichichi tarafından ortaya atıldı. Zichichi yıllarca, kütleleri yaklaşık 1 GeV civarında olan ağır leptonları bulmaya çalıştı. Ancak ne yazık ki onun aradığı şeyin (şimdi τ leptonu olarak adlandırılıyor) söz konusu kütle miktarından çok farklı bir kütleye sahip olduğu ve 1960-1965 yıllarında

Parçacık	Kuarklar	Kütle	Spin	Yaşam süreci (saniye)	Bazı bozunma kipleri
J/ψ	$c\bar{c}$	3096,9	1	$7{,}5 \times 10^{-21}$	e^+e^-, $\mu^+\mu^-$, 5π, 7π, $3\pi + 2K$, $p\bar{p}\pi^+\pi^-$, vb.
Ψ'	$c\bar{c}$	3686,0	1	$2{,}4 \times 10^{-21}$	$J/\psi + 2\pi$, $e^+ + e^-$, $\mu^+ + \mu^-$, 5π, vb.
ψ''	$c\bar{c}$	3770	1	$2{,}8 \times 10^{-23}$	$D^+ + D^-$, $D^0 + \overline{D}^0$, $e^+ + e^-$
η_c	$c\bar{c}$	2979	0	$6{,}4 \times 10^{-23}$	$\eta + 2\pi$, 4π, $2K + 2\pi$, $p + \bar{p}$
χ	$c\bar{c}$	3415	0	5×10^{-23}	4π, $2\pi + 2K$, 6π, 2π, $J\psi + \gamma$, $2K$
χ'	$c\bar{c}$	3510	1	$7{,}5 \times 10^{-22}$	$J/\psi + \gamma$, 4π, 6π, vb.
χ''	$c\bar{c}$	3556	2	3×10^{-22}	$J/\psi + \gamma$, 4π, 6π, vb.
Υ	$b\bar{b}$	9460	1	$1{,}2 \times 10^{-20}$	$\mu^+ + \mu$, $e^+ + e^-$, $\tau^+ + \tau^-$, hadronlar
Υ'	$b\bar{b}$	10023	1	$1{,}5 \times 10^{-20}$	$\Upsilon + 2\pi$, $\mu\mu$, ee, hadronlar
Υ''	$b\bar{b}$	10355	1	$2{,}5 \times 10^{-20}$	$\Upsilon + 2\pi$, $\Upsilon' + 2\pi$, $\mu\mu$, ee, hadronlar
D^+	$c\bar{d}$	1869	0	$1{,}06 \times 10^{-12}$	$K^- + 2\pi^+$, $K^- + 4\pi$, $\overline{K}^0 + \pi^+$, $\overline{K}^0 + 2\pi$
D^-	$d\bar{c}$	1869	0	$1{,}06 \times 10^{-12}$	$K^+ + 2\pi^-$, $K^+ + 4\pi$, $K^0 + \pi^-$, $K^0 + 2\pi$
D^0	$c\bar{u}$	1865	0	$4{,}2 \times 10^{-13}$	$K^- + \pi^+$, $\overline{K}^0 + \pi^0$, $K + 2\pi$, $K + 3\pi$, 2π, $2K$, vb.
D^0	$c\bar{s}$	1865	0	$4{,}2 \times 10^{-13}$	$K^- + \pi^-$, $K^0 + \pi^0$, $K + 2\pi$, $K + 3\pi$, 2π, $2K$, vb.
F^+	$c\bar{s}$	1969	0	$4{,}7 \times 10^{-13}$	$2K$, $2K + \pi$, 4π, 6π, vb.
F^-	$s\bar{c}$	1969	0	$4{,}7 \times 10^{-13}$	$2K$, $2K + \pi$, 4π, 6π, vb.
B^+	$u\bar{b}$	5279	0	$1{,}5 \times 10^{-12}$	$\overline{D}^0 + \pi^+$, $\overline{D}^0 + e^+ + \nu_e$, vb.
B^-	$b\bar{u}$	5279	0	$1{,}5 \times 10^{-12}$	$D^0 + \pi^-$, $D^0 + e^- + \bar{\nu}_e$, vb.
B^0	$d\bar{b}$	5279	0	$1{,}5 \times 10^{-12}$	$\overline{D}^0 + \pi^+ + \pi^-$, vb.
$\overline{B}^0$	$b\bar{d}$	5279	0	$1{,}5 \times 10^{-12}$	$D^0 + \pi^+ + \pi^-$, vb.
Λ_c^+	cdu	2285	$\frac{1}{2}$	2×10^{-13}	$\Lambda + \pi^+$, $p + K^- + \pi^+$, $p + \overline{K}^0$, vb.

CERN'de, 1967-1973 yıllarında da İtalya'da kullandığı makinelerin gereken enerjiyi sağlamadığı anlaşıldı.

Martin Perl, bu zorlu araştırmayı Stanford Lineer Hızlandırıcı Merkezinde aynı doğrultuda devam ettirdi. Deneycilerin yaklaşımıyla yukarıda anlatılan teorinin hiçbir ilişkisi yoktu. Güçlü etkileşen parçacıklar proton, nötron ve bunların uyarılmış durumları (rezonanslar) sonsuz bir seri oluştururlar. Niçin zayıf etkileşen parçacıklar iki çiftte (elektron ile elektron nötrinosu, müon ile müon nötrinosu) son bulsun ki? Zichichi, çok az sayıda lepton bulunduğundan, yeni fiziğin leptonlar bölgesinde araştırılması gerektiğini düşünüyordu. Perl'in düşüncesine göre hadronlar gibi leptonlar da sonsuz sayıda olmalıdır ancak bunları bulmak biraz daha zordur.

Yeni bir lepton bulmak zordur. Çünkü bir lepton, kısa ömürlü olmasının yanı sıra, bozunurken gözlenmesi mümkün olmayan nötrinolar yayar. Bu yüzden, bozunan bir yeni leptonun sinyalini tanımak zordur. Perl, 1975'de bir sinyal gördüğünde karşısına başka bir problem daha çıktı: Meslektaşlarını bunun güvenilir bir sinyal olduğuna ve bu nedenle yeni bir leptona ait olduğuna inandırmak. Başlangıçta ben de bunu şüpheyle karşılamıştım, ancak şu anda ölçümler öylesine hassas ki, şüphe etmek için bir neden yok. Kütlesi 1784 MeV olan bu yeni leptona "tau" (τ) adı verildi.

Tau, $e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$, $\mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$, $\pi^- + \nu_\tau$ gibi parçacıklara ya da diğer hadronlara bozunur ve bozunma ürünleri arasında daima ν_τ bulunur. Tahmin edebileceğiniz gibi, Perl araştırmasına devam etti. "Doğru yoldayım" diye düşündü. "Daha pek çok lepton olduğundan şüphe yok." Ancak onun düşüncesinin aksine, geçici bile sanılsa seri orada bitiyordu.

İlk olarak Weinberg tarafından 1967 yılında ortaya koyulan modelin, küçük değişikliklerle birlikte zayıf kuvveti doğru olarak tanımladığı konusunda artık çok az şüphe kalmıştı. 1980'e kadar zayıf akım ölçümleri öylesine hassaslaştı ki, zayıf kuvvet taşıyıcıları olan yüklü W^+ ve W^- bozonları ile Weinberg'in Z^0 dediği yüksüz taşıyıcıyı ilgilendiren ayrıntılı öngörüler artık yapılabilir duruma geldi. W^+ ve W^-'nin kütlelerinin 80.000 MeV'den biraz daha fazla ve Z^0'ın kütlesinin de 90.000 MeV'den fazla olduğu anlaşıldı.

1970 Cargèse yaz okulu sırasında, Hollandalı bir mühendisin, bir hızlandırıcı içinde bir hedefteki atomları protonlarla çarpıştırarak çok yoğun bir antiproton hüzmesini elde etmenin akılcı bir yöntemini bulduğunu öğrendim. Antiprotonlar her yöne saçılan diğer parçacıklarla birlikte yaratılırlar. Bir elektrik potansiyel farkından geçirildikten sonra antiprotonların aynı yönde gitmeleri sağlanabilir, ama hüzme çok dağınık kalır. İstenilen şey, proton

hüzmesiyle antiproton hüzmesinin birbirleriyle çarpışmasıdır. Bu ancak her iki hüzme de son derece ince bir hale getirildiğinde mümkün olur. Protonlar için bu büyük bir problem değil, ama aynı yönde ve aynı hızla yola çıkmamış olan antiprotonları nasıl odaklarsınız? Matematiksel olarak imkânsız gibi görünüyor.

Her şeye rağmen tamamen olanaksız da değil. Parçacıklar birbirlerine göre tamamen keyfi bir şekilde büyük hızlarla hareket ederlerse, böyle bir sistemin "sıcak" olduğunu söyleriz. Parçacıklar daha küçük hızlarla hareket ediyorlarsa, o zaman, sistem "soğuk" deriz. Bu durumda karşımıza çıkan soru şuydu: Bir antiproton hüzmesini nasıl "soğuturuz"? CERN'de, Simon van der Meer, işte bu problemin kesin bir çözümünü buldu. Her biri farklı, yaramazca şeyler yapan, disiplinsiz öğrencilerin bulunduğu bir sınıf ve burada öğrencilere bağırmaktan başka bir şey yapamayan bir öğretmen düşünün. Bağırarak emirler verdiğinde öğrencilerin birkaçı buna uyacak, diğer bir kısmı ise daha kötü davranışlar gösterecektir. Ancak öğretmen sözcüklerini dikkatli bir şekilde seçerse, bir süre sonra sınıfı kontrol altına almayı başarabilir.

Şimdi öğrencilerin yerine, aşağı yukarı dairesel yörüngelerde hareket eden antiprotonları koyun. Öğretmenin gözleri ve kulakları hüzmenin ortalama koşullarını kaydeden hassas elektrotlar gibidir. Emirler hızla değişen elektrik ya da manyetik alan-

lar şeklinde verilir. Bunun sonucu olarak antiprotonların hepsi ortak bir ideal yörüngede toplanırlar. Bu, Van der Meer'in "stokastik soğutma" dediği olaydır. CERN'deki çeşitli denemelerden sonra yöntemin çok iyi çalıştığı anlaşıldı. *SpS* adı verilen süper proton çarpıştırıcısı, $S\ \bar{p}pS$ (Süper Antiproton-Proton Sinkrotronu) olarak yeniden inşa edildi. Yaklaşık bir çember şeklindeki tüpler içinde proton ve antiprotonlar zıt yönlerde hızlandırıldı ve soğutuldu ve daha sonra birbirlerinin üzerine odaklanarak çarpışmaları incelendi. W^+ ve W^- parçacıklarını yaratmak için çarpışmalar yüksek enerjilerde yaptırıldı. Gerçekten, istenilen enerjilere ulaşıldıktan sonra, W ve Z parçacıklarının parmak izleri hemen gözlendi.

Daha sonra LEP ("Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı") denen daha da büyük bir makine inşa edildi. Bu makine, çevresi yaklaşık 27 kilometre olan çember şeklinde bir tünel gerektiriyordu. Kütlelerinin küçük olması nedeniyle elektron ve pozitronları yüksek enerjilere hızlandırmak, proton ve antiprotonları hızlandırmaya oranla daha çok tercih ediliyordu. (Bu hafif parçacıklar hızlandırıldığında daha çok radyasyon yayılıyor.) Elektron-pozitron çarpışmasını incelemenin yararı, bu iki parçacığın enerjilerini başka bir şeye harcamadan sadece bir Z^0 bozonu yaratmasıdır. Eğer elektron ve pozitronların her birine 45.000 MeV'den bir miktar daha fazla enerji verilirse, çok sayıda Z^0

parçacığı yaratılır ve bu sürecin enerjiye hassas bir şekilde bağlı olması, bir deneyciye ayrıntılı ölçme imkânları sağlar. LEP'in çok büyük bir başarı öyküsü vardır. Makine son derece iyi bir şekilde çalışmaktadır. 1989'da tamamlanmasından çok kısa bir süre sonra yığınla Z^0 üretmeye başladı. Teorisyenleri düş kırıklığına uğratan tek şey, mevcut teori ile uyuşmayan herhangi bir şeyin bulunamamış olmasıydı.

Deneyciler, çok sayıda Z^0 parçacıkları üreterek bunlar üzerinde daha hassas ölçümler yapabildiler. Diğer parçacıkların Z^0'ın özellikleri üzerindeki dolaylı etkileri ölçülebiliyor ve ortaya çıkan teorinin pek çok matematiksel ayrıntısı doğrulanabiliyordu. Halen ortalıkta gözükmeyen üst kuarkın etkisi bile hesaba katılabiliyor ve teorisyenler bu şekilde onun kütlesi hakkında tahminde bulunabiliyorlardı. Bu kütle önce 135.000 MeV civarında bir şey olarak tahmin edildi ve daha sonra 175.000 MeV'a kadar yükseltildi. Buradaki hata payı da 20.000 MeV olarak belirlendi. Chicago yakınlarında, kısaca "FERMILAB" denen ve daha güçlü bir makine olan Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı, bu kütle mertebesindeki maddeleri yaratmak için gerekli olağanüstü enerjilere çıkmaya hazırlanıyordu. 1994'de iki Amerikalı grup ilk sonuçları açıkladılar: Onlar üst kuarkı bulmuşlardı. Belirsizlik olmasına rağmen, kütlesi CERN tarafından tahmin edilen değerle uyuşuyor gibiydi.

Teorik çerçevede halen eksik olan tek şey Higgs parçacığıdır. "Boş uzay"ın gerçekten bir bakıma ağzına kadar bunlarla dolu olduğunu söylemek inanılmaz gibi geliyor. Denebilir ki; Higgs parçacıkları boş uzayı zayıf akımlar için bir süperiletken durumuna sokuyor. Bu parçacıklar en düşük enerji durumlarında bulundukları sürece tamamen görünmez oluyorlar; bütün yaptıkları iş, dünyamıza bildiğimiz özelliklerini sağlamaktır. Ama onları da uyarmak mümkündür. Bu, rüzgârın bir buğday tarlasında yarattığı etki ile karşılaştırılabilir. Tarlaya uzaktan baktığımızda tek bir başağın rüzgârdaki hareketini göremeyiz. Ancak tarla boyunca hareket eden daha büyük dalgaları görebiliriz. Teorinin gözlenebilir spin 0 parçacığı için öngördüğü şey bir ressam gözüyle bu şekilde anlatılabilir ve deneycilerin zaman içerisinde bunu gözlemelerini bekliyoruz.

Higgs parçacığının kütlesi dışında birçok özelliğini tam olarak hesaplayabiliriz. Kütle, teorik olarak 1000 MeV ile yaklaşık 1.000.000 MeV arasında herhangi bir değer olabilir. Bugüne kadar deneyler düşük kütle değerlerinin olmadığını gösterdiğinden, geriye 60.000 ile 1.000.000 MeV'lik değerler kalıyor.* Çok kesin olmayan bu değerler, ne yazık ki zavallı deneyci arkadaşlarınızın pek işine yaramıyor. Kütle değerlerinin bu son derece geniş aralığını kısım kısım taramak gerekir.

* 1995'deki durum.

Tablo 7. 1995 değerlerine göre Standart Model.

Adı	Simgesi	Kütle (MeV)	Yük	N_c	
Spin 1, ayar fotonları					
foton	γ	*0*	*0*	1	$U(1)$
Zayıf kuvvetler için vektör bozonları	Z^0	91 188	0	1	$SU(2)$
	W^+	80280	+	1	
	W^-	80 280	−	1	
Gluon	A_s	0*	*0*	8	$SU(3)$
Spin 0, Higgs:					
	H^0	*> 60 000*	*0*	1	
Spin $\frac{1}{2}$, kuarklar:					
I yukarı	*u*	5*	$\frac{2}{3}$	3	
I aşağı	*d*	10*	$-\frac{1}{3}$	3	
II tılsımlı	*c*	1600*	$\frac{2}{3}$	3	
II acayip	*s*	180*	$-\frac{1}{3}$	3	
III üst	*t*	180 000*	$\frac{2}{3}$	3	
III alt	*b*	4500*	$-\frac{1}{3}$	3	
Spin $\frac{1}{2}$, leptonlar:					
I e-nötrinosu	ν_e	≈ 0	0	1	
I elektron	*e*	0.510999	−	1	
II μ-nötrinosu	ν_μ	≈ 0	0	1	
II müon	μ	105.6584	−	1	
III τ-nötrinosu	ν_τ	≈ 0	0	1	
III tau	τ	1771	−	1	
Spin 2, graviton:					
	g	*0*	*0*	1	

N_c: Bir parçacığın sahip olduğu renk bileşenlerinin sayısı. $N_c = 1$ ise parçacık renksiz sayılır. Üzerinde * işareti bulunan kütle değerleri, çevreleyen renk kuvvet alanları hesaba katılmadığında elde edilen kütleler biçimde tanımlanabilen etkin kütlelerdir. Bu sayılar diğer değerler kadar kesin değildir. Üstelik son gelen bilgilere göre nötrino kütleleri tam olarak sıfır değildir.

Bir elektron ya da bir protonun milyon kere milyon voltluk elektrik potansiyelini geçerek kazandığı enerjiye karşılık gelen 1.000.000 MeV'lik kütle birimine, bir trilyon-elektron-volt (TeV) denir. Fizikçiler çok yakında, her bir lepton ya da kuarkın bu enerjiye ulaşacağı makineleri kullanabileceklerini umut ediyorlar. Uzun bir süredir ben de Higgs parçacığının çok ağır olduğundan şüpheleniyordum. Böyle bir durumda, ölçülebilir sayıda Higgs* parçacığı yaratabilmek için bu parçacıklara daha da çok enerji verilmesi gerekir. Higgs parçacıkları hemen bulunmayabilir. Bununla birlikte, en son veriler ve son ayrıntılı teorik hesaplar umut etmemiz için çok neden olduğunu gösteriyor; hesaplar daha hafif Higgs kütlesi yönünde ipuçları veriyor.

Bu görünmez parçacık bulunacak; peki sonra ne olacak? Ondan sonra "Standart Model" diyeceğimiz bir modelimiz olacak. Bu, bilinen tüm parçacıklar ile aralarındaki bilinen tüm kuvvetlerin matematiksel bir anlatımıdır. Bu matematiksel model, bu parçacıkların davranışlarını açıklamamıza yardımcı olur. Standart Model XII. Bölüm'de verilen reçeteye göre kurulur. Bildiğimiz kadarıyla, Standart Modelin bir sonucu olarak düşünülemeyecek hiçbir fiziksel olay yoktur. Üstelik ana formülleri

* Ölçülebilir miktarda bir TeV'lik Higgs parçacıkları yaratmak için, çarpışan parçacıkların bir TeV enerjiden daha fazla enerjiye sahip olmaları gerekir.

hiç de karışık değildir. Modelin tamamen mükemmel olduğunu söyleyemeyiz. XIX. Bölüm'de bu modelin nasıl geliştirilmesi gerektiği konusunda birtakım fikirler ileri süreceğiz. Bununla birlikte ulaşılan mükemmellik derecesi bile etkileyici. Tablo 7, bugüne kadar bilinen temel parçacıkların ya da alanların bir listesini veriyor. (Her bir parçacık karşılık gelen bir alanla belirtilir. Bu yüzden, Standart Modelde aynı kavramı belirtmek için bazen "parçacık" sözcüğünü bazen de "alan" sözcüğünü kullanırız.)

"Temel" demekle bir parçacığın, bildiğimiz kadarıyla başka parçacıklardan yapılmadığını söylemek istiyoruz (ya da alan, diğer alanlardan bağımsızdır demek istiyoruz). Şüphesiz daha önceden düştüğümüz hataya düşmemeliyiz: şimdi temel olan şeyin, yarın, "daha da temel" olan cisimlerden meydana geldiği ortaya çıkabilir. Dolayısıyla bunlar "1995'in temel" parçacıklarıdır. Standart Modelin çeşitli özellikleri burada ayrıntılarıyla açıklanamayacak kadar karışıktır. Bununla birlikte en önemli kısımlarını özetleyeceğim.

Her birinin kendine özgü "etkileşim sabiti" olan üç çeşit Yang-Mills ayar alanı vardır: bu etkileşim sabitleri, bu sistemlerin her birinden kaynaklanan kuvvetlerin şiddetini anlatan sayılardır ve bunlar teoriden çıkarılamaz, ancak deneyle tayin edilmeleri gerekir. Kuvvetler için kullanılan matematik semboller şunlardır: $U(1)$, $SU(2)$ ve $SU(3)$; etkile-

şim sabitleri de sıra ile g_1, g_2 ve g_3'dür. Bu üç sabit, parçacıklar arasındaki kuvvetleri anlatmak için yeterlidir. Yang-Mills alanları spini 1 olan ayar bozonu denen parçacıklarla özdeşleştirilmiştir.

Şimdi üç nesil parçacığı olan $\frac{1}{2}$ spinli fermiyonları tanıtalım. Her nesilde bir kuark ikilisi (örneğin *u* ve *d*) ile bir lepton ikilisi (örneğin ν_e ve *e*) bulunur. Teorinin kendisi üç nesil bulunması gerektiğini söylemez; hatta çok sayıda nesil de olabilirdi. Ancak LEP devreye girip de Z^0'ın bozunma oranı hassas bir şekilde ölçülebildiğinde, tam olarak üç nötrino çeşidinin olduğu anlaşıldı. Eğer daha çok nötrino çeşidi bulunmuş olsaydı, yeni bozunma olasılığı, Z^0'ın ömrünün gözlenenden daha kısa olmasını gerektirecekti. Elimizdeki Standart Modele göre her bir nesil, kütlesiz bir nötrino içerir. Bu yüzden üçten fazla bu tür nesil olamaz. Bu, nötrinoları Z^0'ın kütlesinin yarısından daha ağır olduğu farklı nesil çeşitleri olasılığını dışlamaz, ne var ki bu tür parçacıkların olduğuna dair herhangi bir belirti mevcut değildir.

Şimdiye kadar sahip olduğumuz parçacıkların hepsi kütlesiz olarak başlar. Bunlara spini 0 olan Higgs parçacığını ekleriz. En ağır işi yapan Higgs parçacığıdır. Tüm parçacıklar -ayar bozonları, fermiyonlar ve Higgs'in kendisi dahil- kütlelerini Higgs'le olan etkileşimlerinden alırlar. Higgs parçacığının kendisi bugüne dek gözlenmedi ama Higgs alanı her yerde hissediliyor. Eğer Higgs par-

çacığı teoride bulunmasaydı modelimiz öylesine çok simetriye sahip olurdu ki, tüm parçacıklar birbirine benzerdi; aralarında çok az fark bulunurdu. Parçacıkların kütle kazanmaları için, simetrilerinin bir hayli azaltılması gerekir. Bu olayın, helisite adı verilen hareket doğrultusundaki spin bileşeninin korunumuyla bir ilişkisi vardır. Fakat ayrıntılar burada açıklanamayacak kadar matematik içermektedir. Hatırlanması gereken en önemli şey, tüm parçacıkların kütlelerini Higgs alanıyla etkileşimleri sonucunda elde etmiş olmalarıdır.

Fermiyonların Higgs alanıyla etkileşimlerinin çok değişik biçimleri olduğu için, sadece kütle değil, aynı zamanda teoride başka yapılar da ortaya çıkar. Bundan, kütlelerin hepsinin birbirinden farklı olduğu anlamını çıkarırız. Hatta üç nesil bulunduğu için, *PC* bozulmasına neden olan etkileşimler bile vardır. Bu yüzden, bu modelde K_{Uzun}'un iki piona dönüşen nadir bozunmalarını bile açıklamak olanaklıdır.

Bütünlüğü sağlamak amacıyla, kütleçekimi kuvvetinin taşıyıcısı olarak bilinen ve graviton denilen parçacık da Tablo 7'de gösterilmektedir. Graviton kuantum mekaniği ile kütleçekimi teorisinin kaçınılmaz bir sonucu olarak ortaya çıkar ve spininin iki olması gerekir.

Parçacıkların kütleleri ile temel etkileşim şiddetleri, teori tarafından öngörülmemiştir, dolayısıyla deneyle bulunmaları gerekir. Çünkü modelin bu

temel parametrelerinin Doğa sabitleri ile bir ilişkisi yok. Bunların tam bir listesini yapmaya kalksak, yirmi kadar sayı olduğunu görürüz. Standart Modelin herhangi bir matematiksel ifadesinde bu yirmi sayının belirlenmesi gerekir. Bu sayıların çoğu Tablo 7'deki kütlelere karşılık gelir. Diğerleri, önceden anlatılan üç ayar bağlanma sabiti gibi karşılıklı etkileşim özelliklerini belirtir. Bir kısmı oldukça büyük hassasiyette olmak üzere bu sayıların tümü ölçülmüştür. Diğer bir kısmı tamamen sıfırmış gibi gözüküyor (örneğin, boş uzayın yaymış olduğu kütleçekimi alanını belirten "kozmolojik bağlanma sabiti"). Bunların şu ya da bu nedenle listeye eklenmemesinin nedeni, bildiğimiz kadarıyla modelde bunları sıfır olmaya zorlayan herhangi bir şeyin olmamasıdır.

Şurasını özellikle vurgulamak isterim ki, her ne kadar söz konusu değerleri niçin aldıklarını bilmediğimiz yirmi sayıyı içerse de ve bu yüzden onları bir temel ilkeden hareket ederek nasıl hesaplayacağımızı bilmesek de, Standart Model gerçekten olağanüstüdür. Bununla birlikte, bu sayılar bize bir kez verildi mi "ilke olarak" diğer bütün fiziksel olayları hesaplayabiliriz. Temel parçacıkların, hadronların, atom çekirdeklerinin, atomların, moleküllerin, cisimlerin, dokuların, bitkilerin, hayvanların, insanların, gezegenlerin, güneş sistemlerinin, galaksilerin ve hatta tüm Evren'in bütün özellikleri, Standart Modelden doğrudan doğruya çıkarılabi-

lir. Üstelik Higgs kütlesi dahil bu genel özelliklerinin çoğu için şu ana kadar tam olarak bilinmeyen sabitlerin gerçek değerlerinin ne olduğu çok önemli değildir. Örneğin, zayıf kuvvetin atomların kimyasal özellikleri üzerindeki etkisini ölçmek son derece zordur (zayıf kuvvet atomlara sağ sol ayrımı yapılabilecek sarmal bir yapı kazandırır).

Şunu da ekleyeyim ki, bu ifadeler felsefi anlamdan öte önem taşımaz ve uygulamada fazla bir şey ifade etmez. Standart Modelimizi kullanarak hamamböceğinin özelliklerini saptamamız hiç mümkün değil ve bu durum hiçbir zaman da değişmeyecek. Bir sınavda aşağıdaki sorunun sorulduğunu düşünün:

> Standart modelden hareket ederek Asellus aquaticus'daki boğumların sayısını hesaplayınız. Aşağıdaki Higgs kütlesi ve CP'yi bozan parametreler listesini kullanabilirsiniz.

Böyle bir problemi çözmek hiçbir zaman mümkün olmayacaktır. Teorik fizikçinin niyeti fizik yapmak yerine bir biyoloğun ya da başka herhangi bir disiplinden birinin işini yapabileceğini ima etmek değildir. Bizim iddiamız, bu yaratığın boğum sayısından sorumlu olan Doğa kuvvetlerinin bilindiğini, ancak etkisinin hesaplanamayacağını söylemektir. Temel kuvvetlerin, tek bir hadronun, örneğin protonun üzerindeki etkisini hesaplamamız çok zordur (sonuçlar yüzde elliden fazla hata içermektedir). Bir de hamamböceği şekline bürünmüş 10^{22}

atomun yaratacağı karışıklığı düşününüz! Kuantum mekaniği kurallarını izleyerek, bir arada bulunan iki atomun özelliklerini hesaplamak, tek bir atomun özelliklerini hesaplamaktan çok daha zordur. Öte yandan, çoğu atomun özellikleri, en basit atom olan hidrojenin özelliklerinden çok daha zor hesaplanır.

Standart Modeldeki kuvvetleri anlamak önemlidir, çünkü o zaman onların uyması gereken yasaların ne olduğunu da bilebiliriz. Enerji korunumu, momentum korunumu ve hatta bilgi korunumu yasalarımız var; bilgi korunumu yasası, paranormal olayların normal fizik, normal biyoloji, psikoloji ve benzerleri cinsinden açıklanabileceğini söyler. Bu yarım yamalak şeyler hakkında istediğiniz kadar düşünebilirsiniz. Ancak, ayağı yere basan açıklamalar verilmediği sürece, bunların Standart Model hakkında bildiklerimizle uzaktan yakından ilişkileri olamaz.

XVII. Bölüm

Anomaliler

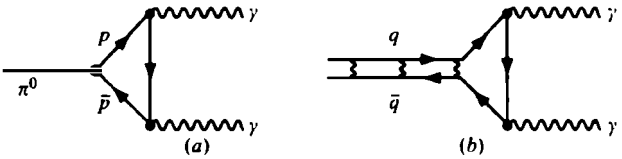
Bir önceki bölümde anlatılanlar size şu izlenimi vermiş olabilir: sonuçta bütün yapılan iş, sürekli yeni parçacıklar bulmak ve onları modele eklemek. Belki de bir rastlantı sonucunda öyle bir noktaya ulaştık ki, "Standart Model" adını verdiğimiz modelimiz şimdilik bildiğimiz her şeyle uyum halinde. Peki bu modelden yola çıkarak, önceden bilmemiz mümkün olmayan tamamen yeni bir şeyi de elde etmemiz mümkün mü? Aşağıdaki "anomaliler" hikâyesi bu soruya cevap verebilir. Küçükler âlemindeki büyük seyahatımıza ara vererek, bu bölümde kısa ve bölgesel bir gezi

yapalım. Biz fizikçiler her şeyin mükemmel olmasını ve modelimizde bir leke varsa onun temizlenmesini isteriz. Tarih bize bir engelle karşılaştığımızda, bu engel bir formalite ya da teknik bir karışıklık gibi görünse de, engelin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerektiğini öğretmiştir. Doğa belki bize bir şeyler anlatmaya çalışıyor ve bizim görevimiz onun ne olduğunu bulup çıkarmak.

Bu bölümdeki bazı matematiksel argümanlar ayrıntılarıyla açıklanamayacak kadar teknik de olsa, yine de çoğunu sözcüklerle anlatabiliriz. Bu bölümün anlaşılamaz olduğu konusunda birçok arkadaşımla ve yayımcımla aynı fikirdeyseniz, bu bölümü atlayınız. Her şeye rağmen yine de size Doğa'nın bu işleri nasıl incelikle hallettiğini anlatmaya çalışacağım.

"Anomali" terimi parçacık teorisinde çok özel bir olayı anlatmak için kullanılır. Bu terim, çok hafif Dirac fermiyonlarının (spini $\frac{1}{2}$ olan parçacıklar) elektromanyetik ya da Yang-Mills alanı içindeki davranışını incelemek istediğimiz zaman ortaya çıkar. Bana ilk anomali örneğini 1969'da, ben bir üniversite öğrencisiyken Veltman göstermişti.

Yüksüz bir pion çok kısa bir sürede bir proton ile bir antiprotona geçiş yapar. Bunlar genellikle hemen "pion durumuna" yeniden dönerler, ama iki foton yayarak birbirlerini de yok edebilirler. Bu süreci Şekil 19(*a*)'daki bir diyagramla gösteriyoruz. Bu sürecin nasıl ilerlediğini 1960'larda bilinen



Şekil 19. π^0'ın iki fotona bozunması: (*a*) proton-antiproton yok olması ile (*b*) kuark-antikuark yok olması.

kuralları kullanarak hesaplamak istersek, pion iki fotona şekilde gösterildiği gibi bozunur ve hesaplanan bozunma süresi deneyle gözlenen $\pi \rightarrow 2\gamma$ bozunmasıyla çok iyi uyuşur. Bu hesap çok önceleri, 1949'da ilk defa Jack Steinberger tarafından yapılmıştı. Günümüzde aynı hesabı değişik bir tarzda daha hassas bir şekilde yapabiliyoruz. Çünkü, yüksüz pionu bir kuark ile bir antikuarkın bağlı durumu olarak ele alacağımızı biliyoruz (yüksüz pion $\bar{u}u$ ve $\bar{d}d$ arasında salınım yapar). Burada kuark ile antikuark birbirlerini yok ederek iki foton yayar. Bu hesabın sonucu Steinberger'in sonucuyla hemen hemen aynıdır (Şekil 19(*b*)).

Bu çok güzel bir şey; artık yüksüz pion bozunmasını anlıyoruz. Gerçekten anlıyor muyuz? Bir dakika durun, yanlış olan bir şey var! İki foton bozunmasının hiç olmazsa bir yere kadar yasaklanmış olması gerektiğini düşünebiliriz. "Proton modelinde" kullanılan "çıplak" proton nasıl hemen hemen kütlesiz ise, kuark modelindeki çıplak kuark da kütlesizdir. Bunlar tamamen kütlesiz olsalardı, pion içindeki özel bir korunum yasası nedeniyle pionun herhangi bir sayıda fotona bozunması kesin-

likle mümkün olmazdı. Çünkü kütlesiz fermiyonlar kendi kendilerini yok edemezler. Bu durumda "helisiteleri" birbirlerine denk gelmiyor diyebiliriz.* Hatırlayacağınız gibi bu korunum yasası görevini kusursuz bir şekilde yapmaz. Çıplak kuarklar bir miktar kütle taşır. İşte o zaman pionun bir bozunma şansı vardır.** Ancak bozunmanın bastırılmış olması gerekir. Aksi halde pionun ömrü gözlendiğinden daha uzun çıkar. Kısaca söylemek gerekirse, bir şeylerin kurala uygun olmadığını bize söyleyen "ciddi" bir iddia vardı.

Bize bu "ciddi" iddianın kusurlu olduğunu gösteren yalnızca deneysel veriler değil, aynı zamanda kesin hesaplar da doğru sonucu verdi. Böyle bir şey nasıl olabilirdi? Problem incelendikten sonra anlaşıldı ki, gerçek hesaplar herhangi bir cevaba yönelmeden önce bir "hile tekniği" kullanılmasını gerektiriyor. Bu teknik renormalizasyondan dolayı gerekli. Teori, ölçülebilir herhangi bir şeyin hesabının yapılmasında birbirlerini götüren sonsuz sayıda kuvvet içerir. Helisiteye ne olduğu gözden geçirildiğinde sonsuzlukların giderilmesi hesabında helisite korunumunun feda edildiği anlaşıldı. Fermiyonlar Şekil 19'da verilen üçgen diyagramlarında

* Helisite bir parçacığın hareket doğrultusuna göre dönme yönünü belirleyen bir kavramdır. Çok iyi tanımlanmış olan bu kavram, ışık hızıyla hareket eden bir parçacık için yani "kütlesiz" parçacıklar için korunan bir büyüklüktür.

** Kütleli bir parçacık, helisitesini kütlesiyle orantılı bir frekansla belirli bir yönden karşıt yöne değiştirir.

dolaştığında böyle bir şey her zaman meydana gelebilir. Galiba bizim cebirsel hesaplarımız renormalizasyon yüzünden zarara uğruyor. Pion durumunda teorisyenler bu cevaptan memnun kalmışlardı. Deneyle hassas hesaplar arasındaki uyum herhangi bir şüpheye yer vermiyordu. Biz bu olaya "üçgen anomalisi" diyoruz.

Pion bakımından anomali, hata yapmamak için akılda tutulması gereken bir merak konusundan başka bir şey değildi. Ancak Yang-Mills teorilerinin renormalizasyonu için kesin reçeteler aramaya başladığım sıralarda anomali tekrar kendisini gösterdi. Weinberg-Salam modelinde çıplak fermiyonlar tamamen kütlesiz olmak durumundadır. Sağa ve sola dönen kütlesiz fermiyonların kendilerine özgü özellikleri, modelin temel öğelerindendi. Sol elli "helisiteye" sahip fermiyonlar ile sağ elli olanların ayar alanlarıyla etkileşimleri birbirlerinden farklıdır. Bu olay, zayıf etkileşimlerin bir "mantar açacağı yapısına" sahip olmasından kaynaklanıyor: Zayıf etkileşimler solu sağdan ayırt eder. Bu çok hassas bir problem. Teoriye ait parçacıkların, kabul edilebilir fiziksel özelliklere sahip olduklarını kanıtlamak için, tüm etkileşimlerin "ayar değişmezliği"ne uyduğunu bilmemiz gerekiyordu. Anomaliler gerçekten bir düzensizliğe yol açabilir: Ayar değişmezliği yok edildi. Herhangi bir şeyi değişik yollardan hesapladığınızda, değişik sonuçlar alıyordunuz; bu yanlış bir mantık.

İşin başında, renormalizasyon reçetesindeki bu küçük kusurun "düzeltilebileceğini" sanıyordum. Weinberg-Salam modeli gibi güzel bir yapıyı anomali denen aptalca bir şeyin bozmasına nasıl izin verilebilirdi?

Fakat bunun böyle olmadığına kısa sürede ikna edildim.* Anomaliler birbirlerini tam olarak götürmedikleri sürece teoriyi tamamen gereksiz bir hale sokuyorlardı! Anomaliler yalnız üçgen fermiyon yörüngesi içeren diyagramlarda rol oynarlar. Bu diyagramlarda işler kötü gidebilirdi. Ancak tüm fermiyon cinslerinin katkılarının toplanması gerekiyordu. Geriye bir seçenek kalıyordu: Anomaliler birbirlerini götürebilir ve bu durumda teorimiz düzelir. Ortaya çıkan durum küçük bir mucizedir. Standart modeli formüle edildiği gibi alırsak, e ile ν_e leptonlarının tüm tehlikeli anomalileri bir tarafta, u ve d kuarklarının anomalileri öbür tarafta olmak üzere birbirlerini güzelce götürüyorlar! Müonik leptonlarla birlikte s ve c kuarklarını da alırsak aynı şeyler oluyor. Son olarak tau leptonları ile üst ve alt kuarklar için de aynı şey geçerli. İşte bunun için, XVI. Bölüm'de kuark türleri ile aynı sayıda lepton türlerine ihtiyaç olduğunu belirtmiştim. Biraz sürpriz olmakla birlikte Doğa teorisyenlerin arzularına karşı çok hassastı ve bize eşit sayıda lepton ve kuark verdi. Öyle bir durum olmasaydı, çözümü imkânsız bir renormalizasyon problemiyle karşı karşıya olacaktık.

* Bu işin onuru Princeton'dan William A.Bardeen'e aittir.

Anomalilerin belirgin bir rol oynadığı yer yalnız zayıf etkileşim teorisi değildir. Yalnız kuark ve gluonların bulunduğu güçlü etkileşimlerde de üçgen diyagramları ortaya çıkar. Ancak burada, kuark helisitesinin (kuark spinlerinin hareket doğrultusundaki bileşeni) korunmasıyla ilgili cebiri göz önünde bulundurmak gerekir. Bu cebirin bir sonucu olarak bazı hadronlar kütlesizdir ve spinleri 0'dır: Bunlar XI. Bölüm'de sözü edilen Goldstone bozonlarıdır. Gerçekten üç pionun kütlesi* çok küçüktür ve spinleri sıfırdır. Bununla birlikte, matematiksel kurallar üç yerine dört korunum yasasının olması gerektiğini söylüyor. İşte bu yüzden, hafif ve 0 spinli dördüncü bir parçacığın olması gerekiyordu. Bu ve gerekli diğer özellikleri sağlayan tek parçacık eta, η idi. Kısaca söylersek, kuantum renkdinamiği, pionların yanı sıra η parçacığının da nispeten hafif olması gerektiğini öngörüyordu.

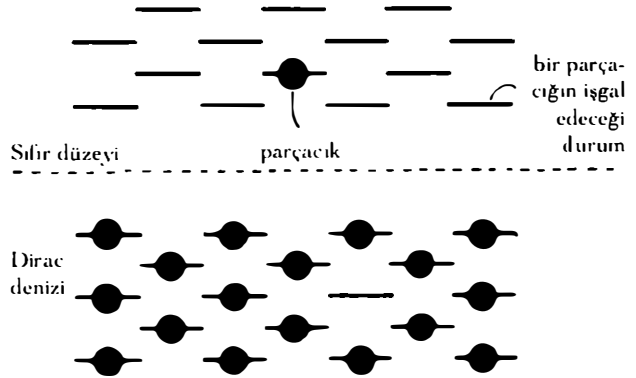
Oysa, eta piondan çok daha ağırdır. Kütlelerinin karelerini karşılaştırma zorunluluğu, problemi daha da zorlaştırıyordu. Buna eta problemi adı verildi. Kuantum renkdinamiği hafif bir eta parçacığı öngörüyor gibiydi, ama öyle bir parçacık ortada yoktu. Daha sonra anlaşıldı ki, eta parçacığı için öne sürülen iddia tam olarak formüle edilmek istendiğinde ortaya bir anomali çıkıyor. Kütlesiz pi-

* Pionun kütlesinin tam olarak sıfır olmamasını kuarkların çok küçük "çıplak" kütlelerinin bulunmasına bağlayabiliriz.

on durumunda olduğu gibi, burada da üçgen diyagramları yüzünden eta parçacığının çok kısa bir sürede iki gluona dönüştüğünü düşünebiliriz. Ancak bu defa kesin hesaplar yapılamadı ve Doğa'nın anomaliyi eta parçacığının kütlesine nasıl dönüştüreceğini düşünmek oldukça zordu. Helisite korunumu açıkça görülmesine rağmen, matematiksel kuralların bozulması gerekiyordu. Çünkü yaklaşımın bu duruma uygulanmasında küçük bir ayrıntıya dikkat edilmemişti. Anomalinin gerçek kökeni renormalizasyon işleminden çok daha derinlere gider; problem, bir parçacık ile bir antiparçacık arasında yaptığımız ayrımdan kaynaklanmaktadır.

Fermiyonları tanımlamak için kullanılan en "kaba" yöntem, antiparçacıklar gibi şeylerin olmadığı bir durumla işe başlamaktır. Dirac da teoriyi ortaya attığında ilk kez bu yöntemi kullanmıştı. Burada daha ziyade her biri bir parçacık tarafından işgal edilebilen ya da edilemeyen "uzaydaki konumlar" kullanılır. Bu konumların ve onların temsil ettiği enerjilerin bir listesini çıkardığımızı varsayalım.* Böyle bir konuma ait enerji negatif ise oraya bir parçacık koyarız; eğer enerji pozitif ise o zaman orayı boş bırakırız. Stokumuzdaki tüm parçacıklar bütün konumlar için ihtiyacı karşıladığında, "mümkün olan en düşük enerjili durum"a ulaşmış

* Bu liste sonsuz olduğu için enerjilerin sıfırdan çok uzaklaşmaya başladığı bir yerde durmalıyız. İşte bu yüzden, teorideki sonsuzlukların bastırıldığı "renormalizasyon" denen yöntem ortaya çıkar.



Şekil 20. Şekilde Dirac teorisine göre bir parçacık ve bir antiparçacık vardır.

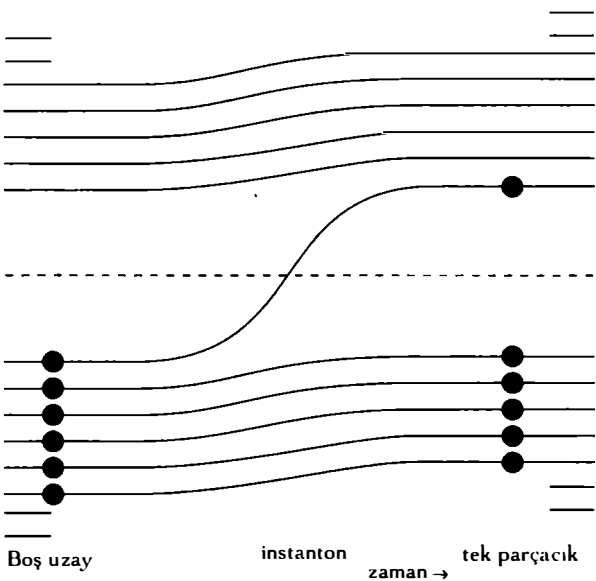
oluruz (az sonra açıklığa kavuşacak). Bu duruma boş uzay ya da vakum adını veriyoruz.

Ama belki de geriye kalan bir parçacığımız vardır. O zaman bu parçacığın pozitif enerjili bir konuma yerleştirilmesi gerekir ve bu gerçekten gözlenebilir bir parçacıktır. Belki de bir parçacığımız eksik kalacaktır. Bu da demektir ki negatif enerji konumunu boş bırakmalıyız. Negatif enerjili böyle bir "çukur" yapmak için pozitif bir enerji gerekir. Böyle bir çukur pozitif enerjili sıradan bir parçacık gibi davranır ama, bir tek farkla: elektrik yükü (ve diğer özellikleri) özgün parçacığa ait olanların zıttıdır. İşte buna antiparçacık diyoruz.

Şimdi anomali denen şeyi açıklayabiliriz. Kuvvetli alanlar varken, belli özel koşullar altındaki negatif enerjili bir konum, pozitif enerjili bir konuma geçer. Başlangıçta negatif enerjili konumun işgal

edildiğini, yani boş uzaya sahip olduğumuzu varsayalım. Enerjisi pozitif değerli bir enerjiye dönüşür dönüşmez nereden geldiği belli olmayan bir parçacık ortaya çıkar. Bu negatif enerjili ilk konum boş ise, bu olay bir antiparçacığın tamamen yok olmasına karşılık gelir. Bir pozitif enerji konumu da negatif enerji konumuna dönüşebilir. Bu durumda da bir parçacık yok oluyor demektir.

Eta problemi, Dirac'ın parçacık ve antiparçacıkları tanımlarken kullandığı yukarıdaki yöntemin unutulmaya yüz tutmasından, ama belki daha çok, negatif enerjiden pozitif enerjiye ve tersine bu tür



Şekil 21. Bir instanton, birlikte olduğu parçacığı sürükleyerek parçacığın bir negatif enerji konumundan bir pozitif enerji konumuna (ya da tersine) geçmesini sağlar.

geçişlerin gerçekten mümkün olabileceğini düşünememekten kaynaklanmaktaydı. Dört Rus araştırmacı, Alexander Belavin, Alexander Polyakov, Albert Schwartz ve Yuri Tyupkin, ilgili denklemlerle oynarken bir ayar alanının uzay-zamanda bir "bükülmüş düğüm" gibi göründüğünü keşfettiler. Kısa bir süre sonra bu "düğüm"ün, fermiyonik bir durumun negatif-pozitif enerji geçişini sağlamak için gereken alan çizgilerinin birbirlerine dolaşması olduğu anlaşıldı. Alan konfigürasyonu bir "parçacık" gibi görünüyordu. Ancak bu parçacık, yaratılır yaratılmaz kaybolan ve çok kısa bir süre yaşayan bir şeydi. Bu durumu belirleyen bir isim bulundu: "instanton". İnstanton, çok kısa bir an görünen küçük bir kapıya benzetilebilir; bu kapı, birdenbire açılarak çeşitli parçacıkların "Dirac denizi" denilen sonsuz kaynaktan dışarı çıkmasına, ya da bu kaynağın içine girmesine izin verir ve hemen arkasından kapanarak kaybolur.

Şimdi biliyoruz ki, eta parçacığı kütlesini instantona borçludur.* Kuantum renkdinamiğinde instantonun yaptığı iş şu: Sağ helisiteli bir parçacığın enerjisini pozitiften negatife çevirir; sol helisiteli durumda ise bunun tersini yapar. Böylece sağ heli-

* Şunu da ekleyeyim ki, eta kütlesinin böyle bir yorumu hâlâ tartışına konusudur. Bazıları, etaya kütle verilmesine izin vermeyen simetriyi, instantonun tamamen kaldıramayacağını öne sürüyorlar. Bununla birlikte, yeteri kadar dikkatli bir şekilde formüle edildiği takdirde, instanton yaklaşımının tamamen doğru olduğunda ısrar ediyorum.

siteli bir parçacık kaybolmuş gibi ve sol helisiteli bir parçacık da yaratılmış gibi olur. Sanki sağ helisiteli parçacık sol helisiteli bir parçacığa dönüşüyor! İşte bu yüzden helisite korunmuyor ve sonuç olarak bununla ilgili cebir bozulmuş oluyor. Eta parçacığı gerçekten QCD'deki gibi davranıyor.

Parçacık sayısının korunmadığı bir durumda parçacıkların Yang-Mills alanıyla etkileştiği bir teorinin varlığına izin verilmez. Çünkü bu, elektromanyetik kuvvetler teorisinde elektrik yüklerinin tamamen korunması durumuyla aynıdır. Dolayısıyla, instanton'un davranışı yüzünden sol helisiteler ile sağ helisitelerin ayar alanlarıyla bağımsız bir şekilde etkileşmelerine izin verilmez. Bu olanaksız şeye teşebbüs edilirse "anomali" denen bir problemin içine düşmüş oluruz! Öyle görünüyor ki, teorimizin tüm ayrıntıları hep birlikte işin içerisine giriyor.

Şimdiye kadar yapılanlar deneyle gözlenen olayları modelimize uydurmaya çalışmak şeklinde özetlenebilir. Anomalileri halletmenin başka bir yöntemi olmadığından emin olabilirsiniz. Şimdi karşımıza yeni bir şey çıkıyor. Ele aldığımız instantonlar kuantum renkdinamiği denen kuvvvetli $SU(3)$ ayar alanlarına aittir. Bununla birlikte, instantonların zayıf $SU(2)$ ayar alanlarında da görülmesi gerekir. Bizi eşit sayıda lepton ve kuark nesli bulmamıza zorlayan şey, "zayıf" anomalinin direkt etkisi olabilir. Zayıf etkileşim farklı helisiteler üzerine

farklı şekilde etki eder; solu sağdan ayırır. Bu yüzden instanton burada tehlikeli şeyler yapar. Tek bir kuark nesli bulunmuş olsaydı, instanton her renkteki kuarkı yok edeceği için üç kuark birden kaybolurdu. Yalnız bir tek lepton nesli olsaydı, bir lepton da yok olurdu ya da aynı sonucu verecek şekilde bir antilepton yaratılmış olacaktı. Aynı zayıf alanla etkileşen üç nesil bulunduğu için, tek bir instanton her birine aynı anda aynı şeyi yapar. Bundan şöyle bir etkileşim ortaya çıkar:

$$u + u + d + s + c + c + t + t + b \rightarrow e^+ + \mu^+ + \tau^+ .$$

Dikkatle bakarsanız bu geçişte toplam elektrik yükünün tam olarak korunduğunu fark edersiniz. Eğer τ leptonunu (ve nötrinosunu) ihmal etmiş olsaydık bu sonucu alamazdık; etkileşime izin verilmezdi. Elektrik yük korunumu olmadan elektromanyetizma olmaz. İşte bu yüzden tau lepton çifti bulunmayan bir teori kusurlu olurdu.

Her bir baryon üç kuarktan oluştuğu ve egzotik baryonlar "normal" zayıf etkileşimler yoluyla normal baryonlara dönüşebildiği için, üç baryon (örneğin üç proton) yok olabilir ve yerlerinde pozitif yüklü üç lepton (ya da antinötrinolar ve pionlar) bırakabilir. Sonuçta Evren'deki bütün madde (temelde baryonlardan ve leptonlardan oluştuğu biliniyor) daha hafif parçacıklara bozunabilir ve kendisini tamamen yok eder! Çok ilginç bir sonuç. Ne var ki kesin hesaplara bakmak gerekir. Bahsedilen geçiş son derece az görülen bir olaydır. Evren'in

başlangıç aşamalarında belki de bu etkileşimlerin çok sık olduğu kısa bir dönem vardı. Şu anda Evren'deki baryon ve lepton fazlalığını bu sürecin tam tersi bir sürece borçlu olabiliriz! Bazı araştırmacılar bu konuda çalışsalar da, Evren'in başlangıç aşamaları hakkındaki bilgimiz o kadar eksik ki, bu tür fikirlerin ayrıntıları üzerine bir şeyler söylemek (şimdilik?) mümkün görünmüyor!

Bu anormal olayda ilginç olan şey, baryon sayısının mutlak bir şekilde korunduğu bir teori ile başlamış olmamızdır. Her neyse, baryonların ölümsüz olmadığını göstermiş olduk. Daha sonra, baryonların değişik bir şekilde bozunduğu teorilerle karşılaşacağız. Bu demektir ki, her çeşit madde sonunda kararsız hale gelir. Bununla birlikte sizi temin etmek isterim ki, vücudunuzdaki tek bir proton bozunması için bile daha çok uzun yılların geçmesi gerekir (üç protonun birlikte bozunması için çok daha fazla zamana ihtiyaç vardır). Böyle bir bozunma olsa bile, sizin bir şey hissetmeniz söz konusu olmayacaktır.

XVIII. Bölüm

Aldatıcı Kusursuzluk

İşte yolun sonuna geldik! Birkaç küçük teknik ayrıntının dışında teorik fizik bitmiş demektir. Fizik dünyası hakkında bilmek istediğimiz her şeyi açıklayan bir modelimiz var. Peki daha ne istiyoruz?

Evet, Standart Model tam değilse de oldukça mükemmel. Her şeyden önce, yirmi tane hesaplanamayan sabitten şikayet ederek işe başlayabiliriz. Ama bütün şikayetimiz bundan ibaretse, belki de bu konuda yapabileceğimiz fazla bir şey yok. Kuşku yok ki, bu sayıların kökenini açıklamak için birçok görüş ortaya atıldı ve onların değerlerini

öngören teoriler ileri sürüldü. Bütün bu teorilerin sorunu, önerdikleri görüşlerin zorlayıcı olmamasından kaynaklanıyor. Böyle bir formül olmadığı için gerçek bir çelişki ortaya çıkmıyorsa, niçin Doğa böylesine sihirli bir formülü hesaba katsın? Gerçekten ihtiyaç duyulan şey, görelilik ilkesi gibi temel oluşturan yeni ilkeler bulmaktır. Ancak, bugüne kadar bilinen diğer bütün ilkeleri de terk etmek niyetinde değiliz; çünkü bu ilkeler Standart Modeli keşfederken son derece yararlı olmuşlardı. Yeni ilkenin aranacağı en iyi yer, elimizdeki teorinin zayıf olduğu noktalardır.

Parçacık fiziğindeki evrensel bir kural şöyle der: parçacıklar birbirleriyle giderek artan hızlarda çarpıştıkları zaman, çarpışmanın etkisi uzay-zamandaki en küçük yapılar tarafından belirlenir. Elimizde şu andaki enerjinin 1000 katı kadar bir enerji verebilecek bir parçacık hızlandırıcısı olduğunu varsayalım. Meydana gelecek çarpışma, bu parçacıkların içindeki çok daha küçük yapısal ayrıntılar hakkında o zamana kadar bilinenden daha ayrıntılı bilgiler verecektir. Standart Model bu noktada da doğru olacak mı? Gulliver'in yaptığı gibi daha küçükler alemine seyahata devam edelim.

Standart Model matematiksel bir yapıdır. Daha küçük yapılar aleminin nasıl görünmesi gerektiği konusunda kesin hükümler verir. Bu tip öngörülerin tamamen yanlış olabileceğini düşünmek için birkaç nedenimiz var.

Şimdi, hayali süper mikroskopumuzu devreye sokup, bir protonun ya da herhangi bir parçacığın tam merkezine odaklayalım. Orada neşeyle dans eden çıplak temel parçacıklar topluluğunu görürüz. Süper mikroskopla incelenen Standart Model, kuvvetlerin nasıl davrandığını belirleyen yirmi Doğa sabitini içerir. Bununla birlikte, bu kuvvetler çok güçlü olmakla kalmaz, aynı zamanda çok özel bir şekilde birbirlerini yok ederler. Bu işlem öylesine ince bir ayarla yapılır ki, mikroskop yeniden normal büyütme ölçeğine çevrildiğinde, parçacıklar normal parçacıklar gibi davranırlar. Matematiksel denklemlerimizdeki bu sabitlerden herhangi biri biraz farklı bir sayı ile değiştirilirse, parçacıkların çoğu çok yüksek enerjilere karşılık gelen kütleler kazanırlar. Çok daha düşük enerjilere karşılık gelen kütleler ise birdenbire doğallıklarını yitirirler.

Biz buna ince-ayar problemi diyoruz. Mikroskoptan bakıldığında Doğa sabitleri çok dikkatli bir şekilde ayarlanmış gibi görünüyor. Bunun parçacıkları oldukları gibi göstermekten başka bir nedeni yok. Ama yanlış olan bir şey var. Matematiksel açıdan bakıldığında itiraz edilecek hiçbir nokta yok. Çünkü son derece küçük uzaklık ve zaman ölçeğine indiğimizde ya da başka bir deyişle parçacıkları son derece yüksek enerjilerde çarpıştırdığımızda ne olacağını hesaplarsak, Standart Modelin geçerliliğini yitirdiğini görürüz. Model o enerjiler-

de niçin hâlâ geçerli olsun ki? Henüz ulaşılamamış enerjilerde, yaratılmayı bekleyen her cinsten, çok ağır parçacıklar bulunabilir ve Gulliver'in ziyaret etmeyi planladığı dünyayı tamamen değiştirebilir.

Özetle, Doğa'nın ince ayarlanmış sabitlerine duyulan gereksinimden vazgeçmek istersek, ortaya yeni bir problem çıkartmış oluruz: Standart Modeli ne şekilde değiştirelim ki, bundan sonra ince ayara ihtiyaç kalmasın? O zaman değişiklik yapılması gereği ortaya çıkar. Bundan çıkan anlam şu: Büyük bir olasılıkla, model belirli bir yerden sonra geçerliliğini yitirir. Standart Model, yaratabildiğimiz ve halen gözlenen olaylarla uyum halinde bulunan matematiksel bir yaklaşımdan başka bir şey değildir. Ne var ki, daha güçlü bir makineyi devreye soktuğumuz zaman, modelde düzeltmelerin yapılmasına gereksinim duyulabileceğini unutmamalıyız.

Başka türlü düşünebilir miydik? "Son" teoriye ulaştığımızı düşünme "kibirliliği" nereden geliyor? Meseleye böyle bakacak olursak, şu andaki problemimiz belki de Standart Modelin nerede biteceği sorusunun tam tersidir: Standart Model nasıl oluyor da böyle olağanüstü iş görüyor ve biz, örneğin, niçin Standart Modelle uyumlu olmayan yeni bir parçacık nesli ya da başka bir kuvveti hâlâ algılayamıyoruz?

"Standart Modelin ötesinde ne var?" sorusu uzun yıllardan beri fizikçileri meşgul etmektedir.

Bu noktaya kadar, bildiğimiz her şey hakkında konuya hakim biri olarak size bir rapor sundum. Bu andan itibaren bilmediğimiz konular hakkında tahminlerde bulunacağım. Kuşkusuz, şu anda bildiğimiz fiziğin tamamen geçerliliğini yitireceğini ve bunun yerine tamamen farklı bir şeyin konulacağını her zaman düşünebiliriz. Ama buna pek inanmıyoruz. Tarih bize, yeni keşfedilen yasaların, uzun zamandır bilinen yasaların mantıklı genişlemesinden başka bir şey olmadığını öğretti.

XIX. Bölüm

Nötrinoların Tartılması

Elimizdeki Standart Modeli iki şekilde genişletebiliriz:

1) Çok az sayıdaki yeni parçacıklar ve son derece zayıf yeni kuvvetler,

2) Ağır yeni parçacıklar ve çok yüksek enerjide ortaya çıkabilecek yeni yapılar.

Önce birincisini ele alalım. Yaratılmaları ve ölçülmeleri son derece güç olan parçacıklar olabilir ve bu yüzden bu parçacıklar bugüne kadar dikkatimizden kaçmış olabilir. Bilinen herhangi bir parçacık üzerine güçlü kuvvet uygulayan her parça-

cık, hiçbir zaman kendisini bizden gizleyemez. Kuantum parçacık teorisinin kısıtlayıcı yasalarına göre, bu tür parçacıklar sık sık yaratılabilir (tek tek ya da parçacık-antiparçacık çiftleri halinde); kütleleri çok büyükse yaratılmamış olabilirler, ancak böyle bir durum zaten (2). durumda ele alınacak. Parçacıklar bir dedektördeki parçacıklarla çarpışarak varlıklarına son verebilirler. Bizim gözlemlerimizden kaçabilecek hafif parçacıklar, bilinen parçacıkların hepsine ya da birçoğuna son derece küçük kuvvet uygulayan parçacıklardır.

Akla gelebilecek ilk parçacık, "sağ elli" bir nötrino olabilir. VII. Bölüm'den hatırlayacağınız gibi, dönme eksenini hareket doğrultusuna paralel alırsanız nötrinolar sadece sola dönerler (antinötrinolar ise sağa dönerler). Matematiksel açıdan bunda itiraz edilecek bir şey yok ama pek estetik değil. Buna rağmen, her bir parçacık neslinde leptonlar dışında sağa dönen kuarklar da vardır. Nötrinoların da sağ-elli bileşenlerinin olduğunu varsayalım. Dönme hareketi doğrusal hareketten bağımsız olduğundan, bu durumda nötrinonun bir kütlesi olabilir (daha önce bahsettiğim spin ile kütle arasındaki bu ilişkinin matematiksel nedenini açıklamak çok kolay değil).

Nötrinolar daima hiç kütleleri yokmuş gibi davranırlar. Tam ışık hızıyla hareket ediyorlarmış gibi görünürler. Ancak ölçümlerimizin hassasiyetinin bir sınırı var. Örneğin, nötrinolar elektron kütlesi-

nin yüz binde biri kadar hafif olsalardı, böyle nötrinolarla tamamen kütlesiz nötrinolar arasındaki farkı laboratuvarlarda ölçmemiz mümkün olmazdı. Daha önce söylediğim gibi, nötrinonun kütlesinin olması, sağ-elli bir nötrino gerektirir.

Bu noktada astronomlar tartışmaya katılırlar. Astronominin temel parçacıklar hakkında önemli bilgiler sağlaması ilk defa olmuyor. Son defa da olmayacaktır. Örneğin, nötrinolar, yüksüz akım etkileşimleri yüzünden (Z^0 değiş tokuşundan kaynaklanan zayıf kuvvet) bir yıldızın süpernova patlamasında önemli bir etmendir. Yüksüz akım hakkında henüz hiçbir şey bilinmezken, patlama esnasında yaratılan nötrinoların bir engelle karşılaşmadan yıldızdan kaçabileceği sanılıyordu. Oysa şimdi biliyoruz ki, nötrinolar yüksüz akım etkileşimleri nedeniyle yıldızın dış katmanlarında çarpışmalar meydana getirebilirler ve bu katmanları muazzam bir kuvvetle dışarı atabilirler. Bu yeni süpernova teorisi, Z^0 bulunmadan çok önce yüksüz akım hipotezine güçlü bir destek veriyordu.

Yaklaşık yirmi yıldan beri astronomlar kendi "standart modellerindeki" küçük ama inatçı bir çelişkiye dikkat çekiyorlar: Güneş'in iç kısmına ilişkin teori. Güneş dev bir nükleer reaktördür. Diğer yıldızlarla karşılaştırıldığında bize çok yakın olduğu için Güneş üzerinde çok ayrıntılı gözlemler yapmak mümkündür. Bu gözlemler Güneş'in sıcaklığı, kütlesi ve kimyasal bileşimi hakkında bil-

giler verir. Güneş içinde meydana gelen çoğu nükleer tepkime laboratuvarlarda tekrarlanabilir. Eksik kalanlar da büyük bir hassasiyetle hesaplanabilir. Sadece birkaç tepkime daha az bir hassasiyetle bilinir. Örneğin, meteoritler üzerinde yapılan ölçümlerle Güneş'in 4,6 milyar yıl önce hangi maddelerden meydana geldiği anlaşılabilir. Böylece, Güneş'imiz için bir model yapabilmek mümkün olabildi.

Bu Güneş modeli çok güzel işliyor ve Evren'deki diğer yıldızların büyük bir kısmı da aynı yöntem kullanılarak incelenebilir. Güneş modeli, Güneş'in iç derinliklerindeki yoğunluğu ve sıcaklığı çok açık ve hassas bir şekilde vermektedir. Modeli kontrol etmenin en ilginç yöntemlerinden biri de Güneş'teki sarsıntıların ya da "Güneş depremleri"nin kaydedilmesidir. Güneş'in çapındaki çok küçük değişmeler bulunur; bunlar, Güneş'in yüzeyinin titreşmekte olduğunu gösterir. Bu durumda astronomların yaptığı şey, sismologların yer depremlerinde yaptıklarıyla aynı: Ölçümlerinden Güneş'in iç kısmındaki sıcaklığı, yoğunluğu ve kimyasal bileşimi elde ederler.

Astronomlar tüm bu buluşların birbirleriyle çok uyumlu olduğu konusunda bizi ikna ediyor. Ancak teorinin geriye kalan kısmıyla uyuşmayan bir şey var. Güneş'in iç kısmında süregelen çeşitli nükleer tepkimeler nötrinoları da yaratır. Bu nötrinoların daha çok elektron türü (ν_e ve ν_e) olmaları gerekir. Çünkü, diğerleri sadece müon ve tau ile birlikte or-

taya çıkabilirler, ancak Güneş'teki parçacıkların enerjileri bunları yaratmak için yeterli değildir. Son zamanlarda bu Güneş nötrinolarını gözleyebilmek amacıyla çeşitli deneyler yapıldı. Nötrinoların aşırı derecede tepkisiz olmaları yüzünden ölçümler çok zor oluyordu. Büyük çabalardan sonra, sonuçta başarılı olundu ama Güneş'ten gelen nötrino akısı beklenenden biraz daha az bulundu. Bu farkı anlamak ve onu halının altına süpürmek için pek çok girişim yapıldı. Örneğin, nötrino yaratılması sıcaklığa son derece bağlıdır. Acaba Güneş'in sıcaklığı düşünülenden daha mı az? Hesaplardaki hassasiyetin artırılmasına karşın herhangi bir değişiklik olmadı: Sıcaklık doğru olmalıydı, üstelik düşük bir sıcaklık Güneş depremleriyle de uyuşmuyordu. Deneyler daha hassas hale getirildi ve nötrinoları ölçmek için yeni yönteler bulundu. Şimdi, araştırmacıların hepsi bir uyumsuzluk olduğu konusunda aynı görüşü paylaşıyorlar: Güneş'ten beklenenden üç kat daha az nötrino gelmektedir, dolayısıyla modellerimizde yanlış olan bir şey var.

Bunun nötrinonun kütlesiyle ne ilişkisi olabilir? Kütlesi olan bir nötrino, diğer tür nötrinolara geçişler yapabilir. K-mezonu için yaptığım açıklamayla kıyaslanabilir bir durum var ortada, ama biraz daha karışık. Eğer ν_e'ler, ν_μ ya da ν_τ'lara dönüşebilirse ölçüm aletlerimizde iz bırakmazlar, dolayısıyla daha az nötrino varmış gibi görülür. Buna "nötrino tür salınımı" diyoruz. Standart Modelde-

kinin aksine, nötrinolar kütleli iseler nötrino tür salınımı mümkün olabilir.

Uzun bir zaman, Güneş'ten gelen nötrino eksikliği açıklamasının nötrino salınım hipotezine bağlanmasına inanmakta güçlük çektim. Bu yoldan sadece çok az nötrinonun kaybolabileceğini düşünüyordum. Üstelik onlar da tekrar kolayca ν_e'ye dönüşebilirlerdi. 1985'de, Rus fizikçileri S.Mikheyev ile A.Smirnov, *PC* uzmanı Lincoln Wolfenstein'ın daha önceki bir düşüncesinden hareket ederek çok akıllıca bir teori geliştirdiler. MSW mekanizması denen bu teori şu şekilde işlemektedir:

Güneş nötrinoları salınım yaparken Güneş'teki maddeyle son derece zayıf da olsa bir etkileşimde bulunur. Güneşte elektronların bulunması nedeniyle elektron türünden nötrinolar W bozonu yaratır, arkasından bunlar tekrar bozunarak her türlü nötrinonun üretilmesine neden olabilirler. Oysa diğer nötrino çeşitleri sadece Z^0 bozonu aracılığıyla dönüşüme uğrayabilir. Bunun bir sonucu olarak, Güneş'in içindeki elektron nötrinolarının hızı diğer nötrinoların hızlarına göre kısmen farklı değerler alır. Nötrino salınımlarıyla birlikte bu etkileşimlerin birleştirilmiş etkisi hesaplandı ve elektron tipi nötrinoların neredeyse tamamen, örneğin, müon ya da tau nötrinolarına dönüştüğü görüldü.

Bu model kuşkusuz uzun bir hesap zinciri ve hipotezlerden meydana gelmiştir. En zayıf halkası kadar gücü vardır, ancak nötrinoların kütlesi oldu-

ğu hakkında ciddi belirtiler ortaya koymaktadır (bir elektronun kütlesinin milyonda birinden daha küçük ve 0,005 ile 0,5 eV arasında bir kütle). Öyleyse Tablo 1'deki sıfırlar muhtemelen yanlıştır!

Sağ-elli nötrinolar zayıf kuvvet karşısında bile duyarsız. Sadece Higgs parçacığı yardımıyla önce kendilerini sol-elli nötrinolara dönüştürürler, daha sonra bilinen zayıf etkileşime girerler. Bu gizli cisimlerden daha kaç çeşit bulunabilir?

Gravitondan daha önce bahsetmiştim. Bu varsayımsal parçacık yalnız kütleçekimi kuvvetini algılar (kütleçekiminin taşıyıcısıdır) ve bu kütleçekimi kuvveti, zayıf kuvvetten çok daha zayıftır. Her gün algıladığımız yerçekimi kuvveti, kütleçekimi kuvvetini diğerlerinden ayırt eden bir özelliğin sonucudur: Dünya'da bulunan atomların hepsi, vücudumuzdaki atomların hepsini "aynı yönde" yani Dünya'nın merkezine doğru çekmektedir. Vücudumuzda çok sayıda atom bulunduğu için bu kuvveti hissederiz. Serbest düşme yörüngesinde hareket eden ve yerçekiminin hissedilmediği bir uzay aracında olduğumuzu varsayalım. Uzay aracı da, içindeki cismi şu ya da bu yöne çeken bir sürü atoma sahiptir. Tabii bunların sayısı Dünya'daki atomların sayısı kadar çok değildir. İşte bu yüzden, bir uzay aracındaki astronotlar kütleçekimi kuvvetini pek hissetmezler (çok özel bir aletle oradaki çekim kuvveti ölçülebilir).

Kütleçekimi kuvveti etkisini çok çok uzaklara ulaştırır. Çünkü kuvvet taşıyıcısı olan gravitonun

durgun kütlesi sıfırdır. Kendi kendimize şu soruyu sorabiliriz: Çok uzaklara ulaşan böylesine zayıf başka kuvvetler var mı? Örneğin, yalnız elektronlara ya da yalnız baryonlara ya da egzotik kuarklardan birine etki eden kütleçekimi alanının ek bir bileşenini düşünmek mümkündür. Bu durumda bu yeni kuvvet, bu parçacıklara etki eden ve bunları kütlelerinin dışında herhangi bir şekilde ayırt etmeyen normal kütleçekimi kuvvetinden farklıdır. On dokuzuncu yüzyılın sonlarında, Macar baron Roland von Eötvös, kütleçekiminde standart olmayan herhangi bir özelliğin olup olmadığını görmek amacıyla çok dikkatli ve zekice bir deney yaptı. Bundan yarım yüzyıl sonra, Robert Dicke tarafından bu ölçümler geliştirildi. Çok daha modern elektronik aletlere sahip olmasına rağmen Eötvös'den daha hassas sonuç elde etmede büyük güçlük çekti. Kütleçekimi kuvvetinin $1/r^2$ yasasından sapıp sapmadığına dair araştırmalar da var. Böyle bir sapma, örneğin, kütleçekiminin kısa mesafelerde etki eden daha zayıf bir bileşeni olduğu zaman ortaya çıkabilir (bu, yeni alan taşıyıcısının sıfırdan biraz daha fazla kütleye sahip olduğu anlamına gelir).

Bu özel olasılıklar göz önünde tutularak Eötvös'ün deneylerinde elde edilen veriler yeniden incelendi. 1980'lerde, bu değerler kullanılarak, kütleçekimi alanının değişik maddelere biraz farklı bir şekilde tepki gösterdiği iddia edildi. Eötvös'ün kendisi, daima, verilerindeki küçük düzensizlikle-

rin bir anlam taşımadığı görüşünde olmuştu ve şu andaki düşünce de onu doğrular yöndedir. Bununla birlikte, öne sürülen yeni kuvvet için hemen bir isim bulundu: "beşinci kuvvet". Çok hassas ölçümlere rağmen böyle bir kuvvetin varlığı hiçbir zaman doğrulanmadı. Teorik olarak kütleçekimi kuvvetinden farklı, fakat ona benzeyen yeni bir kuvvetin varlığı dışlanamaz. Bana kalırsa, Standart Modele bu tür bir kuvvet eklemek, modeli şu anki görünümünden daha çirkin bir hale sokar. Ben böyle bir kuvvete fazla bir şans tanımıyorum.

Son olarak, çok zayıf bir şekilde etkileşen parçacıklardan oluşan daha pek çok topluluğun bulunabileceği düşünülebilir. Onlar gerçekten var mı? Bugüne kadar yalnız üç tür nötrino bulunduğunu hatırlayın. Başka tür nötrinolar büyük bir olasılıkla mevcut değil. Bunun böyle olduğunu hassas LEP deneylerinden çıkarıyoruz. ν_e, ν_μ ve ν_τ nötrino türlerinden başka nötrinolar olsaydı, o zaman Z^0 parçacığı bunlara da dönüşüyor olabilirdi ve bu etki Z^0'ın ömrünü gözlenebilir bir miktarda kısaltabilirdi. Z^0'ın ölçülen ömrü, tam olarak üç tane nötrino türü olduğunu kanıtlıyor.

Eğer temel parçacıklar âlemi, sadece üç değil de çok sayıda ve son derece zayıf etkileşim yapan parçacık türlerini içeriyorsa (üç nötrino Standart Modelde çok belirgin bir rol oynar), o zaman niçin son derece zayıf etkileşimden biraz daha güçlü bir etkileşime giren herhangi bir parçacık görmüyoruz?

Şahsen ben, son derece zayıf etkileşen parçacıkların (gerçekten var iseler) çok az sayıda olduğuna inanıyorum.

Kuşkusuz cebimde bir mavi boncuk taşımıyorum ve benim "tahminim" tamamen yanlış olabilir. Standart Modelin son derece zayıf etkileşim yapan parçacıklara yer veren birkaç uzantısı icat edildi. Burada da astronomların bize söyleyeceği şeyler var. Onların iddiasına göre, dış uzayda yıldızlarla, gazlarla ve toz bulutlarıyla normal bir şekilde etkileşmeyen bir madde çeşidi olmalı ve kendi varlığını yıldız ve galaksilerle ancak kütleçekimi etkileşimleriyle göstermelidir. Bu "karanlık madde"nin ne cins parçacıkları kapsadığını hiç kimse bilmiyor. Bunlar, nötrinoların bilinmeyen ve Z^0'ın bozunamayacağı kadar ağır kardeşleri ve kuzenleri olabilir. Bunlara WIMP (zayıf etkileşen ağır parçacıklar) denir. Çok sayıda fikir ve teori var (bu parçacıklar hakkında herhangi bir görüşü bulunan fizikçi sayısı kadar teori var).

XX. Bölüm

Büyük Çöl

Gulliver seyahatine cesurca devam eder. Proton ve nötronlar 1000 defa büyütüldükleri zaman, Standart Model Gulliver'e bu parçacıkların çaplarının 1/1000'i kadar küçük ayrıntıları gösterir. Parçacıkların çaplarını daha da büyütecek olursak, bundan sonra ne olacağı pek belli değil. Şimdi, çok kısa mesafelerde geçerli olan kuvvetlerin taşıyıcılarına yani çok ağır parçacıklar dünyasına geliyoruz. İlgimizi; proton çapının 1/1000'i ile 1/10.000.000.000.000.000.000'i (yani 10^{-19}) arasındaki yapılar üzerinde yoğunlaştıracağız.

İlk bakışta tuhaf gelen bu rakam, on altı kat (on altı tane daha fazla sıfır) küçülen bir bölgeye giriyoruz anlamına gelir. Bu, bir ev ile bir atom çekirdeği arasındaki fark kadardır.

Bu yeni âlem kuşku yok ki XIX. Bölüm'de anlatılanlar kadar karışık olabilir. Bununla birlikte, tüm fizik yasaları bu bölgede de geçerli olacak şekilde genişletilebilirse o zaman iş çok basit demektir. Öyle görülüyor ki, XI. Bölüm'de anlattığım kuralların değiştirilmesi olanaklı değil. Belki de yeni parçacıklar ve yeni alanlar bulmaya devam edeceğiz. Hayali mikroskopumuzun büyütme gücünü nasıl ayarlarsak ayarlayalım, spini 1, $\frac{1}{2}$ ve 0 olan cisimler için aynı kuralların geçerli olduğunu göreceğiz (kütleçekimi kuvveti ihmal edildiği sürece). Bu konuda daha sonra bir şeyler söyleyeceğim.

Bu âlem hakkında hemen hemen hiçbir deneysel veri olmadığından, kesin şeyler söylemek mümkün değildir. Bununla birlikte, genel olarak temel kuralların geçerli olacağı varsayılır. Bundan sonraki konular için hayalimizin gücüne başvurabiliriz. Teorisyenler üç farklı "senaryo" ile karşımıza çıkarlar. Raoul Gatto'nın bir konferansta belirttiği gibi, "sıfırıncı senaryo" ile başlayalım.

Sıfırıncı senaryoya göre Standart Model tamamen doğrudur ve yeni bir yapı aramaya gerek yoktur. Yeni dünyamızın fizik yasaları, 10^{-19} proton çapından daha küçük ölçeklerde gerçekleşen olaylar tarafından belirlenir ve Standart Modelin uy-

gulandığı mesafelerden daha büyük mesafelere de uygulanabilir. Böyle bir durumda son derece can sıkıcı bir ince-ayar problemi ile karşılaşırız: 10^{-19} proton çapındaki bir mesafede Doğa sabitleri çok hassas bir şekilde ayarlanmıştır. Sanki birileri bir masanın üzerine bir kurşunkalemi ucunun üzerine öyle yerleştiriyor ki, kalem ancak 19 dakika sonra devriliyor. Bunun nasıl başarıldığını anlamış değiliz, o yüzden de dikkate almıyoruz. Bırakın bunu filozoflar çözsünler.

Matematiksel açıdan hiçbir sorun yok. Fiziğin bu geniş bölgesinde herhangi bir olay meydana gelmeyecek demektir. Bu bölgeyi "Büyük Çöl" diye adlandırıyoruz. Tarihin bir rastlantısı sonucu, bizim neslin fizikçileri, önceki fiziğin ortaya koyduğu dünya büyüklüğünde bir dünyada Doğa'nın neye benzeyeceği konusunda tahminde bulundular. Tahminimize göre "hiçbir şey" yoktur. Bu tahminin doğru olduğuna inananlar lütfen parmak kaldırsın.

Bununla birlikte, çoğu fizikçi başka senaryolar tasarladı; onlar bu çöl bölgesinde her türlü çiçeğin açacağını düşünüyorlar. Peki bu çöl neye benzeyecek? Tek ipucu ince-ayar probleminde yatıyor. Kontrol düğmelerini akla yatkın olmayan bir hassasiyetle ayarlamaya ihtiyaç kalmadan, belki çölün sadece bir kısmında geçerli olacak muhtemel bir modeli, yani bir senaryoyu hayal edebilir miyiz? Bunu yapmanın en kolay yolu, düğmelerin simetrik bir şekilde ayarlanacağı bir simetriyi aramaktır.

Bunun için en uygun olanı "süpersimetri" denilen simetridir. Bruno Zumino, Julius Wess, Peter van Nieuwenhuizen, Sergio Ferrara ve diğer fizikçiler bu konunun öncüleridir. Süpersimetri nedir?

Standart Modelde (hatta ondan önce gelen modellerde de) parçacık cinslerinin çoklular şeklinde düzenlendiğini görmüştük. Bir çokludaki tüm parçacıkların spinleri aynıdır. Bunda şaşılacak bir şey yok: Spin 1, spin $\frac{1}{2}$ ve spin 0 parçacıklarının "el kitapları" birbirlerinden çok farklıdır. Değişik spinli parçacıklar arasında simetri bağıntıları olacağını hayal etmek oldukça zordur. Özellikle spini yarım tam sayı olan fermiyonlar Pauli dışarlama ilkesine uydukları halde, spini tam sayı olan bozonlar ortak davranış gösterirler (bozonlar hep birlikte aynı noktada olmayı ya da aynı harekette bulunmayı tercih ederler). Fermiyonları ve bozonları aynı çoklunun içine koyan matematiksel bir modelin bulunduğunu söylemek bu yüzden çok şaşırtıcıdır. Şimdiye kadar, fermiyonlarla bozonlar birbirinden farklı diyorduk, oysa önerilen modelde birbirine eşdeğer oluyorlar.

"Süper çoklular" için bulunan kurallar çok katı kurallardır. Bir süper çokluda fermiyon sayısı kadar bozon bulunur. Bir süper çokludaki parçacıkların özgün (çıplak) kütleleri birbirine eşittir. Bunların en basitine $N = 1$ süpersimetrisi diyoruz. Burada süper çoklunun bütün üyelerinin spinleri birbirlerinden sadece 1/2 kadar fark eder. $N = 2$ ve N

= 4 süpersimetrisine sahip daha büyük süper çoklular vardır. Buradaki N'nin anlamını açıklamak çok zaman alacaktır (kabaca bir süper çokludaki yarım spin aralıklarının sayısıdır).

Doğada (ve özellikle Standart Modelde) fermiyon kütleleri ile bozonların kütleleri birbirlerine hiç benzemez. Daha kötüsü, Standart Modeldeki herhangi bir fermiyonla bir bozon bir süper çoklu kurabilecek durumda değildir.

Süpersimetride bir parça gerçek varsa, bugün bildiğimiz tüm parçacıkların "süper eşleri" olması gerekir. Öyle görülüyor ki, bu cisimlerin kütleleri makinelerimizde üretemeyeceğimiz kadar büyük değerlere sahipler.

Foton, W, Z, gluon ve Higgs parçacıklarının spini $\frac{1}{2}$ olan süper-eşlerinin olması gerekir. Biz bu süper-eşlere sırayla "fotino", "Wino", "Zino", "gluino" ve "Higgsino" diyoruz. Bu isim "nötrino" sözcüğünden kaynaklanmaktadır, ancak nötrinodaki ino ile bir ilişkisi yoktur. Örneğin nötron, nötrinonun süper-eşi olamaz. Kuark ve leptonların süper-eşlerinin ("squark", "slepton") spinleri tam sayılıdır.

Bir süper-çokludaki süper-eşler arasındaki kütle farkları MeV'in en az milyon katı olmalıdır. Şüphesiz bu süpersimetrinin tam olarak doğru olmayacağını ve mutlaka "bozulması" gerektiğini gösterir. Süpersimetrinin bozulacağı enerji düzeyi bize çok büyük görünebilir, ancak Gulliver'in dolaştığı âlemde milyarlarca MeV'lik enerji hâlâ

küçük gelebilir, bu nedenle simetri bozulması belki de ihmal edilebilir. Dolayısıyla süpersimetri orada büyük bir hassasiyetle çalışıyor olabilir.

Kuşkusuz böyle bir teoride, süpersimetrinin nasıl ve niçin bozulduğunu belirtmemiz gerekir. Güvenilir bir mekanizma icat etmek çok zordur. Higgs mekanizmasına benzer bir çeşit yoğunlaşma süreci düşünmek mümkün olabilir. Unutmayalım ki, bu mekanizma bize W ve Z'nin kütlelerini kazandırmakla kalmaz, elektron ile elektron nötrinosu ya da müon ile müon nötrinosu arasındaki kütle farkını da açıklar.

Higgs mekanizması tüm kütlelerden sorumludur. O zaman niçin süper-çoklulardaki kütle farkını da vermesin? Bu kitapta daha önce belirttiğim gibi, bir teori yalnız sözcüklerden ibaret olmamalı, aynı zamanda hesaplar için gerekli kesin matematiksel kuralları da içermelidir. Öyle görülüyor ki, "kendiliğinden süpersimetri bozulması" fikri süpersimetrilerdeki farklılıkları açıklamaya yeterli değildir. Örneğin, "Goldstino" denen $\frac{1}{2}$ spinli ve tamamen kütlesiz parçacıklar düşünülebilir. Bunlardan biri nötrino olabilir mi? Daniel Freedman ile daha önce öğrencim şimdi ise meslektaşım olan Bernard de Wit, nötrinoların bilinen özelliklerinin goldstino'larla bağdaşmadığını gösterdiler. Başka bir şekilde yapılması gerekir, ama tam olarak nasıl yapılacağını bilmiyoruz. Bu, süpersimetri teorisinde hassas bir konudur.

Yaklaşık bir süpersimetriye sahip olunca Doğa'daki parçacık türlerinin sayısını ikiye katlamış olabiliriz, ama burada asıl kazancımız ince-ayar probleminin bir çözüme kavuşturulmasıdır: Büyük bir çölde birkaç çiçek ve üstelik çölün öbür tarafına kadar uzanan süper bir otoyol.

Süpersimetri teorisindeki diğer bir özellik, kütleçekimi kuvvetinin taşıyıcısı olan gravitonun "gravitino" denen bir süper-eşinin olmasıdır. Gravitino $\frac{3}{2}$ spinli yegâne temel parçacıktır (delta rezonansı, Δ da $\frac{3}{2}$ spinli bir parçacıktır ama $\frac{1}{2}$ spinli kuarklardan meydana gelmiştir). Bu dikkat etmemiz gereken bir konudur: Graviton ve gravitino renormalize edilebilir teorilerin temel kurallarını bozar ve böylece tüm yapıyı tamamen yıkar. Bunun ciddi sonuçlarını daha sonra tartışacağız, ancak bu cisimler çok zayıf bir şekilde etkileştikleri sürece endişe edecek bir şey yoktur. Daha sonra tartışılacak konulardan biri de, süpersimetrinin kütleçekimiyle birleştirildiği zaman elde edilen teorinin ne olacağıdır.

XXI. Bölüm

Teknik-renk

Süpersimetrinin çok güzel bir matematiği var. Bu nedenle mesleki yayınlar bu teoriyle dolu. Daha önceleri, örneğin Yang-Mills teorisi ortaya atıldığında karşılaştığımız gibi, çok parlak bir matematiksel yapı var ama bu yapının Doğa'nın mevcut yasalarıyla nasıl bağdaştırılacağını bilmiyoruz. Belki şu anda Doğa'yla bir ilişkisi yok fakat ileride bir bağlantı kurulması beklenebilir.

Hayallerimize daha çok uyan başka bir senaryo var. Atomların daha küçük yapıtaşlarından, proton, nötron ve elektrondan oluştuğunu biliyorduk.

Daha sonradan anladık ki, bu yapıtaşları daha küçüklerden oluşmuştur: kuarklardan ve gluonlardan. Daha önce de düşünmüş olabilirsiniz; niçin her şey bu şekilde devam etmiyor? Belki de bu kuark ve gluonlar ve hatta elektronlar ve Standart Modele göre hâlâ "temel" diye adlandırılan diğer parçacıklar maddenin daha küçük zerrelerinden meydana geliyor.

Bu düşünceye sahip olan ilk siz değilsiniz. Jonathan Swift'in küçükler âlemini büyüklerin bir karbon kopyası olarak gördüğünü daha önce belirtmiştim. Büyük pireler küçük pireleri sırtlarında taşırlar ve böylece sonsuza dek devam eder. Biyologların pireler topluluğuna biraz farklı bakmak gerektiğini açıklamaya çalışmaları gibi, benim de yapıtaşlarının birbirlerini sonsuz bir şekilde tekrar ettiğine dair yaklaşımın doğru olamayacağını söylemem gerekir.

Bir protondaki kuarklara bakalım. Mikro âlemdeki her şeyi inanılmaz bir hassasiyetle kontrol eden mükemmel kuantum mekaniği teorisi, kütle ile hızın çarpımı olan "momentum"un sisteminizi yerleştirdiğiniz "kutunun" büyüklüğü ile ters orantılı olması gerektiğini söyler. Proton böyle bir kutu olarak düşünülebilir. Kutu öylesine küçük ki, içindeki kuarklar ışık hızına yakın hızlarla hareket ederler. Bu nedenle, *u* ve *d* gibi iki hafif kuarkın etkin kütleleri Tablo 7'de belirtilen değerlerden çok çok büyük olup yaklaşık 300 MeV'dir. Bu bize protonun kütlesinin niçin 900 MeV civarında oldu-

ğunu açıklar. Protonun bu kütlesi kuarkların (ve gluonların) durgun haldeki kütlelerinin toplamından çok büyüktür.

Protonun aksine, kuarkların kendileri, leptonlar ve Standart Modeldeki diğer parçacıklar da "nokta-parçacık"lar gibi görünüyorlar. Bu şu anlama geliyor: Onları protondan bin defa daha küçük bir kutunun içerisine koyduğumuzda bile özellikleri değişmeyecektir. Ama asıl güçlük şimdi başlıyor: Parçacıkların daha küçük yapılardan meydana geldiğini varsayalım. Kuşkusuz o zaman bu küçük yapılar son derece sıkı bir şekilde paketlenmiştir ve bu yüzden çok büyük kinetik enerjileri var demektir (hızlı hareketlerinden kaynaklanan enerji). O halde bu yapıların içinde bulundukları şeyin toplam kütlesine uygun bir şekilde eklenmesi gerekirdi. Öyleyse kuarklar ve elektronlar niçin çok hafif?

Bu çok değişik şekillerde anlatılabilir. Proton içindeki kuarkların üç çeşit "kütlesi" vardır. Birincisi, "serbest kütle" dediğimiz ve cisim serbest hale geldiği zaman sahip olunan kütle. Bir kuarkı bir protondan ayırmak için sonsuz enerjiye gereksinim var. Bu yüzden kuarkın serbest kütlesi sonsuzdur. Bu anlamsız, dolayısıyla işe yaramaz bir kavramdır. İkincisi, kuantum mekaniği yasaları gereği proton içinde çok hızlı bir şekilde hareket etmeye zorlanan kuarkın etkin kütlesidir. "Yapıtaşı kütlesi" denen bu kütle, protonun kütlesinin üçte biri civarında, yani 300 MeV'dir. Üçüncü kütle kavramı

"cebirsel" kütledir. Bu kütle, denklemde "kütle terimi" denen ve cismin özelliklerini belirleyen bir parametredir. Diğer parçacıklar için bu terim parçacıkların kütlelerine karşılık gelir. *u* ve *d* kuarkları için bu değer yaklaşık 10 MeV'dir. Sorunumuz, varsayımsal yeni yapıtaşlarımızın, meydana getirdikleri cismin kütlesinden kesinlikle daha büyük yapıtaşı kütlesine sahip olmasıdır. Sanki sizden, kaya kadar sert metal çubuklardan tüy kadar hafif yarış bisikleti yapmanız istenmektedir.

Durum tamamen umutsuz değil: Doğa bize böyle bir şeyin nasıl başarıldığını göstermiş durumda. Pion da kuarklardan meydana gelmiştir. Pion protondan çok fazla büyük değil. Bu yüzden onun içindeki kuarkların yapıtaşı kütlelerinin de 300 MeV civarında olmasını bekleriz. Bununla birlikte, pion 600 MeV değil sadece 130 MeV ağırlığındadır. Bunun sebebi, pionun kütlesinin bir simetri tarafından korunmasıdır: Pion bir Goldstone bozonuna benzetilebilir (XII. Bölüm'e bakın).

Bu, kendileri elektron kadar hafif, ancak "daha ağır" yapıtaşlarından meydana gelmiş parçacıkları anlamanın bir yolu olabileceği anlamına gelir. Belki de Standart Modeldeki parçacık sayısı kadar simetri bulmamız gerekir. O zaman, bugün bildiğimiz tüm parçacıkların oldukları kadar hafif olmalarının nedenini, kütlelerinin bir simetri tarafından "korunmasıyla" açıklayabiliriz. Bu fikri kesin bir matematiksel ifade haline getirmek zordur. Genel olarak

yapılan şey "renk hapsi" yönteminin tekrarından ibarettir. Renk kuvvetleri, kuarkları proton ve pion içinde bir arada tutmada çok marifetlidir. Böyle bir renk teorisinin yeni bir biçimini, eski renk teorisinden bin defa daha küçük bir ölçekte kurmak belki de mümkün olabilir. Buna göre, şu anda temel parçacık diye bilinen parçacıklar içerisinde bu yeni renk tarafından hapsedilen yapıtaşları bulunmaktadır. Bu yapıların tümden imkânsız gibi gözükmeyen çeşitlemeleri vardır. Bu tür teorilere "teknik-renk" denmektedir: Öyle bir renk ki, kuantum renkdinamiğinden bin defa daha güçlüdür.

Bir zamanlar, kuarkların "dördüncü yapıtaşları" (moleküller atomlardan; atomlar çekirdek-altı parçacıklardan; çekirdek-altı parçacıklar da kuarklardan meydana gelmiştir) olduğunu ileri sürmüştüm. Eğer kuarklar da başka yapıtaşlarından meydana gelmişlerse, onları oluşturan yapıtaşlarına verilecek uygun isim "kuinks" (beşinci) olur. Böyle söylenirse "altıncı", "yedinci" ve benzerlerine açık kapı bırakılmış olur. Yeni şeyleri anlatmak için kullanılan ve üstünlük taslayan "süper" ve "hiper" gibi sözcükleri kullanmaktan hoşlanmam (örneğin, "süpernova", "süperiletkenlik", "süpersimetri", vb.). Böyle abartılı bir dili kullanmaya devam edemeyiz. Bu dili kullanan ciddi araştırmacılar bana, Hollanda'nın tanınmış karikatüristlerinden Marten Toonder'in birbirlerine "süper" ve "hiper" diye seslenen karakterlerini hatırlatıyorlar. Bu karakterler dü-

zenbazdır. Ne yazık ki, yeni cisimler için önerdiğim "beşinci" sözcüğü tutulmadı. Onun yerine daha çok "preonlar" kullanılıyor. Belli ki burada preonların protondan önce geldiği söylenmek isteniyor, ama protonlar zaten ilk gelenlerdi. İnsanlar bir türlü ders almayı öğrenmediler.

Teknik-renk teorisinin bir hayli zorlukları var. Örneğin, elektron ve müon iki su damlasına benzer. Her ikisi de aynı yapıtaşlarından yapılmış olsalardı daha ekonomik ve daha doğal olurdu. Bu durumda, müonun bir foton çıkararak bir elektrona dönüşmesi gerekir. Normal renk teorisindeki hadronlar, yapılan hesaplarla uyumlu olan bu tür geçişler yaparlar. Fakat bir müon hiçbir zaman bir elektron ile bir fotona bozunmaz. Müonun elektrona bozunmasında her zaman nötrinolar vardır.

Teknik-renk teorisinin yapabileceği en önemli şey, ince-ayar konusunda en büyük problemi çıkaran Higgs parçacığının yapıtaşlarını bulmak olmalıdır. Teorik fiziğin öncülerinin bize cesaret vermesinden hoşlanırız. Bileşik bir parçacığın kendiliğinden simetri bozulmasında kullanıldığına ilişkin en az iki örnek vardır. Biri, Gell-Mann ve Lévy'nin eski sigma modeli (aslında sigma kuarklardan meydana gelmiştir), diğeri ise, iki elektronun bağlı durumunun Higgs mekanizmasına benzer bir olayla süperiletkenliğe neden olduğu BCS (Bardeen, Cooper ve Schrieffer) teorisidir (XI. Bölüm'deki Cooper çiftlerine bakınız). Standart Modelde Higgs

parçacığının birçok özelliği kesin olarak bilinmektedir; çünkü onlar bilinen parçacıkların kütlelerinden sorumludur. Teorimiz bu etkileşimleri "öngörebilmeli"dir. Bilinen parçacıkların kütlelerinden sorumlu etkileşimleri verecek yeni ayar teorilerine gereksinim duyulur ve böylece "genişletilmiş teknik-renk teorisi"ne ulaşmış oluruz. Arkasından çok sayıda yeni etkileşimleri yaratma tehlikesi baş gösterir. Bu teorinin çeşitli türleri yüksüz kaonlar arasındaki ince dengeyi bozduğu için geçersizdir (VII. Bölüm'e bakın).

XVII. Bölüm'de bahsedilen anomali hesapları kullanılarak yapılan bir teknik-renk teorisi için bir simetri örgüsü düzenlendiği zaman uyulması gereken kuralları buldum. Bu kurallar teknik-renk düşüncesinin sonunun gelmesine katkıda bulundu. Bu kurallara uyan ve hâlâ geçerli olan bir model bulmak hemen hemen imkânsız gibi görülüyor. Bununla birlikte, gerçek dünya, şu anda bildiklerimizden çıkaramadığımız çok karışık teknik-renk kuvvetleriyle yönetiliyor olabilir. Yirmi birinci yüzyıla başlar başlamaz tamamlanacak olan "büyük hadron çarpıştırıcısı" (LHC) gibi yeni hızlandırıcılar, belki de teknik-renk teorisiyle ilgili yeni olayları meydana çıkaracaktır. Birleşik Devletler hükümetinin (milyarlarca dolar harcadıktan sonra) "Süperiletken Süper Çarpıştırıcı"nın (isim hakkında bir yorumda bulunmayacağım) yapımını durdurması, yüksek enerji fiziğine vurulmuş ciddi bir darbeydi;

birçok fizikçi bütün beklentilerini bu makineden elde edilecek bilgiler üzerine oturtmuştu.

Bu arada süpersimetri ile teknik-rengi birleştirme girişimleri de var. Bu tür teoriler, yalnız çok ağır yeni parçacıkları değil, aynı zamanda son derece zayıf etkileşime giren değişik türde "teknik-pion" parçacıklarını da öngörmüş olduğu için, astrofizikçileri yakından ilgilendirmektedir. Belki de bunlar astrofizikçilerin halen aradıkları kayıp kütleden sorumlu olan ve galaksiler arasındaki boşluğu dolduran WIMP'lerdir.

XXII. Bölüm

Büyük Birleşme

1931'de Paul Dirac, elektron için yazdığı denklemden karşıt elektrik yüklü bir antiparçacık bulunması gerektiği sonucunu çıkardığı zaman çok şaşırmıştı. Böyle bir parçacık henüz bulunmadığı için, Dirac bilim dünyasını böylesine devrimci bir önermeyle sarsmak istemedi. "Belki de bu acayip pozitif yüklü parçacık protondan başkası değildir" diye önerdi. Bundan kısa bir süre sonra, elektronun gerçek antiparçacığı (pozitron) bulunduğunda hayretini şu sözlerle belirtti: "Denklemim, denklemi bulandan daha akıllıymış!"

Bugünlerde fizikçiler artık bu kadar alçakgönüllü değiller. Yüksek enerji fizikçileri kendilerini beğenmişlikle suçlanıyorlar. Tamamen de sebepsiz değil. Zayıf kuvvetin yeni ayar teorisi popüler olduğu zamanlarda Weinberg ve Salam, zayıf kuvvetin elektromanyetik kuvvet ile bir birleşimi olduğunu duyurmakta zorluk çekmediler. Hatta herhangi bir yanlış anlamaya meydan vermemek için tanıtım şu şekilde yapıldı: "Sir James Clerk Maxwell'in birleşik elektrik ve manyetizma teorisinden sonraki en önemli birleşme".

Weinberg-Salam modelinin böyle övgü dolu bir yorumu hak etmediğini hep söyledim. Yeni teori "$SU(2)$" ve "$U(1)$" matematiksel terimleriyle gösterdiğimiz farklı iki ayar alanlarından başlamadı mı? Bu birleşme değildir. Bununla birlikte, her iki kuvvet sisteminin tamamen aynı matematiksel ilke üzerine oturtulduğunu vurgulayabilirsiniz. Üstelik bunlar, bildiğimiz olayları meydana getirmek üzere birbirinin içine girmiş durumdalar. Her anlamlı teoride olduğu gibi, bu teorinin deneylerle doğrulanabilen çok sayıda öngörüsü ortaya çıktı. Daha önceki yaklaşımlarda buna benzer şeylere çok daha az rastlandığı için, bu anlamda birleşmeden bahsedilebilir.

Birleşme, ortalıkta dolaşan çok çekici bir sözcük oldu. Fizikçiler, onlarca yıl önce, her şeyi açıklayan bir "Birleşik Alan Teorisi"ni araştırmaya başladılar. "Birleşme" tam olmasa da, yaklaşık bir

şekilde gerçekleşti. Bunu biraz daha iyi yapamaz mıyız?

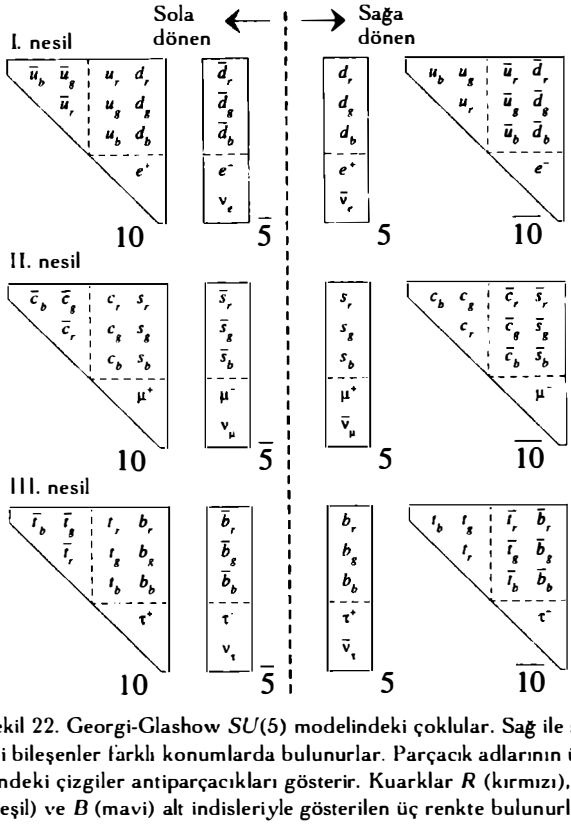
Üç ayar sistemi - $SU(3)$ üzerine oturtulmuş güçlü kuvveti de unutmayın - bir tek sistem içerisinde kaynaştırılabilirse, bu gerçek bir birleşme olur. O zaman, bu kuvvetleri anlatmak için Doğa'nın üç sabiti yerine bir tek sabit gerekecektir. Yirmi hesaplanamaz sabit yerine böyle bir teori muhtemelen daha az sayıda sabit içerecektir.

Maalesef hayat bu kadar basit değil. Standart Modeldeki üç ayar kuvvetini belirten üç sabit, birbirinden çok farklıdır. Özellikle, $SU(3)$ güçlü kuvvetine ait olan sabit, $SU(2)$ zayıf kuvvetinin sabitinden pek çok kez daha büyüktür. $SU(2)$ sabiti de $U(1)$ sabitinden büyüktür. Eğer bütün bu sistemler bir ayar alanı yapısı cinsinden tanımlanacaksa, bu sayıların yaklaşık olarak birbirlerine eşit olması gerekir.

Hayali mikroskopumuzu kullanmaya devam edelim. Standart Modelimizin daha küçük uzaklıklarda geçerli olacağını varsayalım. Böylece parçacıklar bugüne kadar ulaşılan mesafelerden daha küçük uzaklıklarda birbirlerine yaklaştıklarında aradaki kuvvetlerin şiddetlerini hesaplayabiliriz. Bu durumda, XIII. Bölüm'den hatırlayabileceğiniz gibi, güçlü kuvvet daha az güçlü olacaktır. Aynı şey $SU(2)$ kuvveti için de daha az etkili olarak geçerlidir. Sadece $U(1)$ kuvvetinin şiddeti küçük uzaklıklarda artar.

Kuvvetlerin bağıl şiddetlerindeki bu değişiklikler son derece küçüktür. Şimdi, hızlı bir arabayla çöldeki süper otoyolda yola koyulalım. 1000 MeV girişinden yaklaşık 10.000.000.000.000.000.000 (10^{19}) MeV çıkışına kadar devam edelim. Bu yaklaşık 10^{-30} santimetrelik bir uzunluk ölçeğine karşılık gelir. Howard Georgi, Helen Quinn ve Steven Weinberg'in buluşlarına göre, bu enerji bölgesinde her üç ayar bağlanma sabitinin değerleri birbirine eşit olur. Bu üçünün hep birlikte birbirine eşit olması ve bunun otoyolun sonuna yakın bir yerde meydana gelmesi bir rastlantı mıdır? Bundan sonraki bölümlerde tartışılacağı üzere, bir dönüm noktasına ulaşmak için sadece üç sıfıra daha ihtiyaç vardır.

Howard Georgi ve Sheldon Glashow, 10^{19} MeV enerji bölgesindeki gerçek birleşik modelin nasıl yapılması gerektiğini gösterdiler; otoyolda geriye doğru hareket edilirse bildiğimiz üç ayar kuvveti yeniden birbirlerinden ayrılırlar. Gerçekten onlar tam böyle bir model buldular. Eğer bir an için inceayar problemini unutmaya hazırsak, elimizde harika bir teori var demektir. Buna "$SU(5)$" modeli denir. Bu demektir ki, en küçük çokluda beş eleman vardır, ancak on parçacık içeren çoklular da mevcuttur. Fermiyon çokluları ile onların antiparçacıkları Şekil 22'de görülmektedir. Her nesil 5, $\bar{5}$, 10, $\bar{10}$ sembolleriyle gösterilen çoklulara sahiptir. On parçacığı içeren çoklu, iki ayrı 5'li çoklunun kaç



Şekil 22. Georgi-Glashow $SU(5)$ modelindeki çoklular. Sağ ile sol elli bileşenler farklı konumlarda bulunurlar. Parçacık adlarının üstündeki çizgiler antiparçacıkları gösterir. Kuarklar R (kırmızı), G (yeşil) ve B (mavi) alt indisleriyle gösterilen üç renkte bulunurlar.

değişik şekilde birleşmesinden meydana geleceğini gösterir. $\overline{10}$, $\overline{5}$'den hareket ederek aynı yöntemle elde edilir. Bu yeni cisimler, belirli matematiksel yöntemler izlenerek bilinen parçacıklarla özdeşleştirilir. Şimdi, aynı çokludaki bir parçacığı, başka bir parçacığa dönüştürecek yeni kuvvetler ortaya çıkacaktır. Bu teori, zayıf kuvvetin bilinen ayar bozonları W ve Z ile güçlü kuvvetin gluonları dışında

X bozonu denen ve söz konusu dönüşümleri yapacak yeni ayar bozonunun varlığını öngörmektedir.

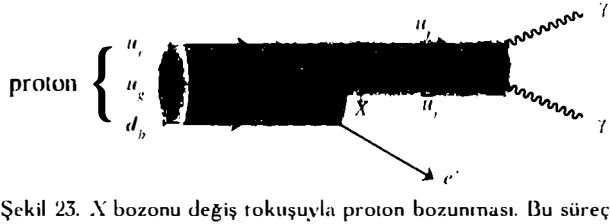
Sağ elli nötrinolar ile sol elli antinötrinoların bulunmadığına dikkat ediniz. Ancak bunlar da modele eklenebilir. Onlar üç ayrı tekli olarak düşünülebilir, bu durumda üzerlerine herhangi bir ayar kuvveti etki etmez.

Alıştığımız ayar kuvvetleri, kesik çizgileri geçmeyecek bir şekilde geçişlere neden olur. Georgi ve Glashow'un öngördüğü Higgs bozonu, kesik çizgiler arasındaki geçişleri sağlar. Kütlesi 10^{19} MeV civarında bir yerde olması gerekir. Higgs bozonunun tipik özelliklerinden biri, kuarkları leptonlara hatta antikuarklara dönüştürebilmesidir. Higgs bozonu değiş tokuş edildiğinde ne olabileceğini gösteren bir Feynman diyagramı Şekil 23'de verilmektedir.

Bu modelin sonuçlarından birine göre proton kesinkes kararlı değildir: iki ya da daha fazla hafif parçacığa bozunabilir. Daha önce XVII. Bölüm'de gördüğümüz gibi, ancak üçü bir arada olmak kaydıyla, eski Standart Modelde de proton bozunabilir. Bu bozunma bugünkü evrende öylesine seyrek ki, bir kez daha meydana gelmeyebilir.* Ancak burada, tek bir protonun daha sık görülecek bozunma sürecinden bahsediyoruz.

İyi bir teori, hassas hesapların yapılmasına ve kesin öngörülerde bulunulmasına izin verir. Gerçek-

* Belki de Büyük Patlama'nın çok erken dönemlerinde meydana gelmiş olabilir.



Şekil 23. X bozonu değiş tokuşuyla proton bozunması. Bu süreç, bu diyagramda peş peşe gelen $u_r u_g d_b \rightarrow u_r X \bar{u}_r d_b \rightarrow u_r \bar{u}_r e^+$ geçişleriyle sağlanır. Buradaki tüm fermiyonlar Şekil 22'de gösterilen ilk onluya ait olanlardır. X bozonu bu çoklunun farklı parçacıklarını birbirine bağlar. Burada $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ bozunmasını görüyoruz. Pion daha sonra iki fotona bozunur.

ten, böyle bir modelde proton bozunmasının ortalama olarak ne kadar zaman alacağı hesaplanabilir. Süre çok uzun olduğu için, bu hesabın çok hassas bir şekilde yapılması zordur: Öngörülen süre 10^{29} ile 10^{30} yıl arasında değişmektedir. Şekil 23'de gösterilen geçişin niçin çok uzun zaman aldığını açıklamak zor değildir. X bozonu öylesine ağırdır ki, onu yaratmak için çok büyük miktarda enerji gerekir. Bu yüzden geçiş son derece olanaksız hale gelir. Belirli bir andaki bozunma olasılığı, X bozonunun kütlesinin dördüncü kuvvetiyle ters orantılıdır.

Böyle bir öngörü deneysel olarak nasıl test edilebilir? Hiç kimse 10^{30} yıl bekleyecek kadar sabırlı değildir (Evren'imiz bile neredeyse 10^{10} yıl yaşındadır). Bununla birlikte, 10^{30} protonu bir araya getirirseniz, bunların ortalama olarak her yıl birkaçının bozunabileceğini bekleyebilirsiniz. Normal ölçülerdeki bir yüzme havuzunda su halinde bulunan 10^{32} tane proton vardır. Bugünlerde, ölçüm aletle-

ri, tek bir protonun bozunmasını ölçebilecek kadar hassas hale getirilmiştir. Yalnız, deneyi kozmik ışınlara karşı mümkün olduğu kadar korumak gerekir (dış uzaydan gelen çok hızlı parçacıklar atmosferimizde enerjik pion ve müon yaratırlar). Bu yüzden, böyle deneylerin yerin birkaç kilometre altında yapılması tercih edilir.

Ölçülebilecek şeyin bir sınırı vardır. Kozmik ışınlar nötrinoları da içerirler ya da onları atmosferimiz içinde yaratabilirler. Bu nötrinoların önlerine kaç kilometre kaya engeli konulursa konulsun durdurulamazlar. Nötrinoların suda neden olduğu etkileşimleri proton bozunmasından ayırt etmek zordur. Ne var ki, deneyciler bütün marifetlerini kullanarak protonun ortalama ömrünün en az 10^{31} yıl olacağını gösterdiler. Bu en düşük değerdir. Bozunan herhangi bir proton gözlenmemiştir.

Bilimin böyle küçük çelişkileri kolaylıkla halletti̇ği dalları vardır. Yapacağınız şey teorinizi bir miktar esnek hale getirmektir. Ancak bu da sorunu çözmez. Georgi-Glashow $SU(5)$ modeli ölmüştür. Deneysel veri ile henüz çelişkili olmayan modelin bir miktar daha karışık biçimlerini düşünmek mümkündür ama yanlış yolda olabileceğimiz hissi vardır. Bana kalırsa asıl problem teorinin kendisinden kaynaklanmaktadır: ince-ayar problemi.

$SU(5)$ türü "Büyük Birleşik Teoriler"in en az iki Higgs parçacığı içermesi gerekir. Bunlardan birinin alanı, X bozonunun kütlesi olan 10^{20} MeV gibi

büyük bir kütleyi verecek ölçüde güçlü olmalıdır. Diğer Higgs alanı çok zayıf olduğu için, W ve Z bozonları sırayla "yalnız" 80.000 ve 90.000 MeV ağırlığındadır. Böylece bir alan diğer alandan 10^{15} kere daha güçlüdür. Problemimiz teorilerimizdeki Higgs alanlarının birbirlerini etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Nasıl oluyor da biri diğerinden 10^{15} kere daha zayıf kalıyor? Bu olağanüstü ölçek farkı nereden geliyor? Burada da bazı kimseler süpersimetrinin rol oynadığını düşünüyorlar. Eğer büyük kütle farklarını süpersimetri ile "önlemeyi" denerseniz o zaman "süper-büyük birleşme" teorilerine ulaşırsınız.

XXIII. Bölüm

Süper-kütleçekimi

Kütleçekimi kuvveti, kuşkusuz temel parçacıklarımıza etki eden en dikkate değer kuvvetlerden biridir. Hatırlarsanız, küçükler dünyasına seyahate başladığımızda, küçük cisimler üzerindeki kütleçekimi etkisinin büyük cisimlere oranla daha az önemli olduğunu görmüştük. Hatta, bir farenin düz bir duvara tırmanabildiğini oysa bunu bir filin yapamadığını buna örnek olarak vermiştik. Kütleçekimi kuvveti, atomlar, moleküller ve şimdiye kadar ele aldığımız bütün parçacıklar için hemen hemen ihmal edilebilir bir olgudur. Ancak, bir atom çekirdeğinden nispeten

daha küçük parçacıklara baktığımız zaman bir dönüm noktasına gelmiş oluruz. Kütleçekimi, parçacıkların kütlesi üzerine etki ettiği halde, bütün diğer kuvvetler "yük" dediğimiz şey üzerine etki eder. Aradaki fark şudur: Yük mikroskopumuzun büyütme gücüne fazla bağlı değildir. Oysa kütle enerjiye bağlıdır. Bir parçacığı daha küçük bir hacime sıkıştırmaya çalışırsak kuantum mekaniği kurallarına göre daha çok hareket olacak, yani hareket enerjisi (kinetik enerji) artacaktır. İşte bu yüzden, küçük uzaklıklar daha yüksek enerjilere, dolayısıyla daha büyük kütlelere karşılık gelir. Mesafeler, hareket göreli (yani ışık hızına yakın) olacak şekilde azaldığı zaman, kütleçekimi kuvvetinin etkisi diğer kuvvetlere oranla yavaş yavaş artar. Bununla birlikte, hâlâ son derece zayıftır ve şiddet bakımından diğerleriyle kıyaslanabilecek bir duruma gelinceye kadar daha bir hayli yol alınması gerekir.

Şimdi yeniden, parçacık başına enerjinin laboratuvarlarımızda şu anda ulaşılan enerjilerden çok fazla olduğu bir parçacık fiziği bölgesine varıncaya dek, Büyük Çölde ilerlemeye devam edelim (Şekil 29). Şunu itiraf etmeliyim ki, Büyük Çöl kuramsal bir alandır ve hakkında hâlâ çok az şey biliyoruz. Ancak parçacık fiziğinin temel kurallarının geçerli kalacağını varsayıyoruz. Bununla birlikte, bir şey çok açık: Yolun mutlaka bir sonu olacak. Kütleçekimi kuvvetinin ne zaman diğerlerinden üstün olacağını hesaplamak gayet kolaydır. İşte orada çöl

son bulur. Bu sınırın nerede bittiğini daha önce belirtmiştim: Kütleler ya da enerjiler 10^{19} proton kütlesini geçtiklerinde. Bu bizim yaklaşık 10^{-33} santimetre boyutunda yapılara baktığımızı gösterir. Bu kütleye Planck kütlesi ve buna karşılık gelen uzaklığa Planck mesafesi diyoruz. Planck kütlesi gram olarak da belirtilebilir: Oldukça küçük bir toz şeker zerresinin kütlesi kadar, yani 22 mikrogram (bu akla yatkın gelen yegâne Planck sayısıdır; bütün diğer sayılar bunun yanında anlamsız kalır!). Buradan şu anlam çıkarılır: eğer bir parçacığı bir Planck mesafesindeki bir bölgeye sıkıştırmaya çalışırsanız, kuantum düzensizlikleri parçacığa öylesine büyük enerji sağlar ki, kütlesi Planck kütlesi kadar büyük olur ve bu tip parçacıklar arasındaki kütleçekimi kuvvetlerinin etkileri, diğer tür kuvvetlerin etkilerini geçer. Bu parçacıklar için kütleçekimi güçlü bir kuvvet olur.

· Kütleçekimi güçlü bir kuvvet olursa bu dünyanın sonu demek değildir. Bu kuvvet kuarklarla etkileştiği zaman, kütleçekimi "kuantum renkdinamiği" kadar zor olacak diye çekip gidemezsiniz. Burada durum çok daha ciddidir. İncelemeyi düşündüğünüz yapılar küçüldükçe, kuvvet daha da güçlü olur. Öyle ki bu olayları anlatmak için yapılan en kaba girişimler bile tehlikeye düşüp tamamen anlamsız sonuçlar verir.

Doğa hakkında şu anda bildiğimizi sandığımız her şey Planck ölçeğinde geçersiz olacaktır. Oysa

Doğa'yı çok kesin bir şekilde bildiğimizi sanıyorduk. Einstein'ın kütleçekimi teorisi mükemmel bir şekilde işliyor. Teori uygulamada doğru olması gereken çok temel bir ilkeden hareket eder: Kütleçekimi uzay ve zamanın bizzat kendisinin bir özelliğidir. Uzay ve zaman "eğrilmiştir". Düz bir kâğıt parçasına ıslandıktan sonra ne oluyorsa, "eğrilmekten" kastım da tamamen odur: Kâğıt kırışır ve bunu ütüleyerek düz hale getirmenin bir yolu yoktur. Kütleçekimi kuvveti uzay-zamanın bu tür kırışıklıklarından oluşmaktadır.

Planck mesafesine ne kadar çok yaklaşırsak, uzay-zamanın kırışıklıklarına kuantum mekaniği yasalarını uygulama ihtiyacını da o denli çok hissederiz. Kırışıklıklar çok fazla olmadığı sürece kuantum mekaniği uygulanabilir ve ortaya çıkan teoriye "kuantum kütleçekimi" denir. Bu teori kütlesi sıfır, spini 2 olan ve graviton denilen temel bir parçacığın varlığını öngörür.

Planck mesafesine yaklaştıkça uzay-zamanın tümsek ve çukurları artar. Çünkü en küçük kırışıklıklar büyüklere oranla daha belirgin hale gelirler. Kuantum mekaniğindeki bilinen belirsizlikler kırışıklıkları kabartır. Planck mesafesinden daha öteye gitmeyi denersek, hiçbir şey çalışmaz. Orada eğrilik ve belirsizlikler o kadar büyür ki, "iki nokta arasındaki uzaklık" kavramının hiçbir anlamı kalmaz. Çünkü bu uzaya hiçbir ölçüm çubuğu sığmaz. Uzay ve zamanın kendisi bile anlamsızlaşır. Uzay

ve zamandan kastedilen şeyin matematiksel tanımı, "noktalar arasındaki uzaklığın" tanımı üzerine oturtulmuştur. Bütün bunlardan belki de şu anlam çıkarılabilir: Bu Planck-altı dünyanın mantıklı bir tanımı bulunmadığı sürece, tüm fizik anlayışımız alt-üst olacaktır.

Böyle bir şey olmadan önce ulaşılan son durağa "süper-kütleçekimi" denir. Süper-kütleçekimi, kütleçekimi kuvveti ile süpersimetriyi birleştirmeyi başaran ve oldukça karışık bir matematiksel yapıya sahip olan bir teoridir. Şu anda bahsettiğim şeyleri basit sözcüklerle açıklama girişiminde bulunmadan yapamayacağım. Süper-kütleçekimi nedir?

XX. Bölüm'de "süper çoklulardan" bahsetmiştim. Spin 0 ya da spin 1 parçacıkları, spin $\frac{1}{2}$ parçacıklarıyla birlikte bir çokluya konulduğu zaman "süpersimetri" var demektir. Normal parçacıklarla bunların süper eşleri arasında geçiş sağlayacak bir çeşit ayar parçacığının bulunduğu bir teori düşünülebilir; bu ayar parçacıkları bir bakıma süper ayar fotonlarıdır.

Böyle bir teori var, ancak daha önce söylediğim gibi oldukça karışık. Bu karışıklığın nedeni şu: Bir parçacığı farklı spinli bir parçacığa dönüştürecek olursanız, sadece elektrik yükü ya da acayiplik gibi "iç" özelliklerini değil, aynı zamanda uzay-zamanın özelliklerini de değiştiriyorsunuz demektir. Çeşitli ülkelerde birçok fizikçi bu fikir üzerinde kafa yordu. Ancak teori o kadar zordu ki, doğru formü-

lü bulmak için yıllarca uğraşmak gerekti. Birkaç satırda sonuçlarını anlatmakla bu konuyla ilgilenen fizikçilere adil davrandığımı söyleyemem: Üzerine bir süper ayar fotonu etki ettiğinde bir parçacığın sadece spini değişmekle kalmaz, parçacık aynı zamanda bir miktar yer de değiştirmiş olur. Bir cismin yerini değiştirmek demek, kütleçekimi teorisinin "ayar dönüşümü"nü yapmak demektir. Elektromanyetizmada olduğu gibi, diğer kuvvetler parçacıkların yerlerini doğrudan değiştirmezler: Parçacığın dalga fonksiyonunu öyle etkilerler ki, parçacık önceki hareketine göre bir miktar başka yöne gider.

Bütün bunların sonucu şunu gösterir: Süper ayar teorisi ancak kütleçekimiyle birleştirildiğinde formüle edilebilir. Bu yüzden ortaya çıkan şeye süper-kütleçekimi diyoruz. Süper ayar parçacığı, gravitino denen ve spini $\frac{3}{2}$ olan bir parçacıktır. XX. Bölüm'de kısaca değindiğimiz gibi bu gravitonun süper eşidir.

"$N = 2$" süper-kütleçekiminde iki çeşit gravitino, "$N = 4$" teorisinde ise dört çeşit gravitino vardır. Ayrıca bunların belki de en ilginç ve en karışık olanı, "$N = 8$" süper-kütleçekimi teorisidir. "$N = 8$" süper-kütleçekimi teorisinde her süper çokludaki parçacıkların spinleri 0'dan 2'ye kadar değişen değerler alır. Kesin olarak söylemek istersek, uzayda sabit bir doğrultudaki bir eksen etrafında dönme hareketini düşündüğümüz zaman, spin, –2'den

+2'ye kadar her adımda yarım birimler halinde olmak üzere sekiz kez değişir. Fakat yalnızca bir graviton olması gerekir (sabit eksene göre spini daima 2 ya da –2'dir). Çünkü Einstein teorisinde ancak bir tür kütleçekimi kuvvetine yer vardır ve bu yüzden sadece bir tane "$N = 8$" süper çoklunun olması gerekir.

Başka parçacık türlerine izin verilmemesi bu teorinin ilginç özelliklerinden biridir. Bu tek süper çoklu, var olan tüm parçacıkları içine alacak şekilde pek çok parçacık türü içerir. Burada da yine genişlemeye ya da başka bir şey eklemeye izin vermeyen bir teori örneği ile karşı karşıyayız. 1980'li yıllarda bu yapıya duyulan ilgi bütün fizik âlemine yayıldı. Diyelim ki teorimiz bu. Fiziğin sonunun geldiğini mi söylüyoruz? O zaman diğer tüm kuvvetler ile parçacık türlerinin çıkarılabileceği her şeyi kapsayan bir teorimiz mi var?

Şimdi tekrar geriye gidelim. 1960'ların başında, Richard Feynman, kütleçekiminin uyumlu bir kuantum teorisini yapmaya çalışan ilk bilim adamlarından biriydi. Feynman, çok sayıda graviton değiş tokuşunun etkisini bulmaya çalışırken, bir hesabın ara durumlarında ortaya çıkan "hayalet parçacıklar" keşfetti. Bu öncü çalışma, Amerikalı Bryce DeWitt ile Stanley Mandelstam, Rus fizikçiler Ludwig Faddeev, Victor Popov, Efim Fradkin, Andrei Slavnov ve birçokları tarafından sürdürüldü. Feynman'ın hayalet parçacıkları, şimdi

tüm parçacık teorilerinin standart malzemelerinden biridir.

Veltman ile birlikte Yang-Mills teorisinin nasıl renormalize edildiğini tam olarak öğrendikten sonra, biz de kütleçekimi hakkındaki tartışmalara katıldık. Bizim bulduğumuz şuydu: Yalnız gravitonlara bakarsanız, çok sayıda graviton değiş tokuşunun ilk etkisi (Şekil 24 (*b*)'de içinde kapalı bir ilmik olan diyagram) çok açık bir şekilde hesaplanabilir. Eğer gravitonun diğer parçacıklarla etkileşmesine izin verilir ya da değiş tokuş edilen parçacıklar iki ya da daha fazla birbirine geçmiş ilmikler meydana getirirse (Şekil 24 (*c*)), ilk zorlukla karşılaşmış oluruz. Hesaplardan sonlu ve dolayısıyla anlamlı kesin sonuçlar elde etmek için, sonsuz sayıda ve giderek artan "karşıt" kuvvetlerin eklenmesi gerekir. Bununla birlikte, bu karşıt kuvvetlerin kendileri ilmiklere dahil edildikleri zaman, daha da kötü sonsuzluklara yol açarlar. Hesap artık kontrolümüzden çıkar. Böyle bir teoriye renormalize edilemeyen teori diyoruz.

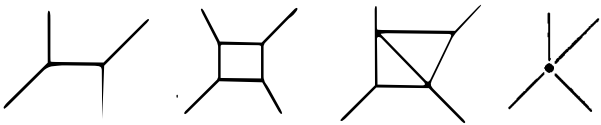
Süper-kütleçekiminden ne haber? Burada başlangıçta işler daha iyi görünüyor. Hatta üç ilmik seviyesinde bile yanlış olan bir şey yok. İyimserler bunun bir rastlantı olamayacağını ve bütün kuvvetlerin son teorisinin ufukta göründüğünü söylediler.

Tüm kuvvetlerin bir teorisi: Böyle bir şey hayal edilebilir mi? Fizik yasalarının tam bir formülü bu-

lunabilir mi ve biz fizikçilerin bu formülü bulabilmesi akla yatkın mı? Bazılarımız "Her Şeyin Teorisi"nin ufukta göründüğü düşüncesinde. Diğer fizikçiler böyle bir şeyin düşüncesinin bile, uzağı göremeyen küçük bir azınlığın kendini beğenmişlik gösterisi olduğunu söylüyor. Biz bu temaya tekrar döneceğiz. Her şeyden önce, görünüşte anlamsız gibi görünen şu "kendini beğenmişliğin" dayandığı düşünceleri ayrıntılarıyla ele alalım.

Benim, Gulliver'i daha da küçük cisimler dünyasına götüren yolu izleyeceğimi düşünebilirsiniz. Korkarım ki, daha ileri gitmek imkânsız. Çünkü bu bölgeden sonra uzay ve zaman varlığını yitirir! İki noktanın birbirine Planck mesafesinden daha yakın olmasından bahsedilemez. Çünkü bu iki nokta arasındaki bölgede eğrilik ve kırışıklıklar ölçülemez. Stephen Hawking, bir seferinde, bu ölçekte uzay ve zaman çok fazla kırıştığı için köpük haline geliyor demişti. Burada parçacıklar tek hücreli hayvanlar gibi köpüklerin içinde yüzmektedir. Bir yerden başka bir yere gitmek için seçecekleri çok sayıda yol vardır. Bu benzetme bile işi son derece basite indirgemektir: Çünkü uzaklıkları ya da büyüklükleri belirtmek imkânsızdır, küçük kabarcıklar büyük kabarcıklardan ayırt edilemez.

En köktenci görüş - birçok fizikçinin kabul etmekte isteksiz davrandığı görüş - uzay ve zamanın birbirlerinden kopmuş noktalar topluluğundan meydana geldiğini ileri süren görüştür. Parçacıklar



Şekil 24. (a) En basit parçacık değiş tokuş süreci. Bu tür bir diyagramda kuantum mekaniği en az etkiyi gösterir. (*b*) Tek bir kapalı halkadaki çoklu parçacık değiş tokuşu. (*c*) İki halka diyagramı. Kuantum kütleçekiminde, (*d*)'de gösterilen sonsuz etkileşim hesaba katıldığında, bu değiş tokuşların etkisi sonlu olur. Ancak (*d*)'deki etkileşim (*b*) ya da (*c*)'deki köşelere konulursa karışıklıklar kontroldan çıkar.

bu noktaların üzerinde bulunabilir, ancak aralarında olamazlar. Varılabilecek en mantıklı sonuç bu olabilir, çünkü "kuantum salınımları" nedeniyle parçacıkların bulunduğu tüm noktalar, en az bir birim Planck uzaklığı kadar birbirlerinden ayrık olmalıdır. Ancak bu görüşten hareket ederek kolayca ilerlemek mümkün değildir. Çünkü o zaman, uzay-zaman denen kumaşı meydana getirecek olan bu noktaların birbirlerine bağlantılarını nasıl açıklarız?

Böyle sorulara nasıl yanıt verileceği konusunda gerçekten hiçbir fikrimiz yok. Peki, uzay-zamanın bu matematiksel özelliklerini anlatan ve matematiksel olarak uyumlu bir formülasyon bulmak niye imkânsız olsun ki? Bana kalırsa insanlığı kuşaklar boyu meşgul edebilecek ilginç bir problem. Ama niçin doğru yanıtı bulmak imkânsız olsun? Belki de tamamen hayal görüyorum. Ancak, öyle görünüyor ki Doğa sanki küçük Lego™ bloklarından yapılmıştır. Öyle bir yapı takımı ki, bu takım arala-

rında süreklilik olmayan Planck mesafesindeki birim büyüklüklerden meydana gelmiştir. Belki de oyunun kuralları bir bilim kitabını doldurabilir. Bu kitabın başında kısaca değindiğim gibi, böylece son evrensel teoriyi elde etmiş olacağız. Eğer böyle bir teori varsa onu eninde sonunda bulacağız. Bu Tüm Kuvvetlerin Teorisidir. Gerçekten her biri değişik sezgisel iddialardan hareketle bu noktaya gelinse de, bu birçok fizikçinin hayal ettiği "Her Şeyin Teorisi" olacaktır.

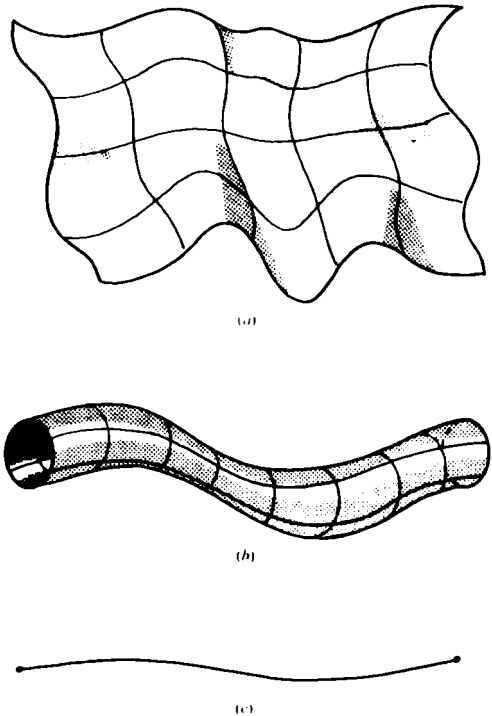
XXIV. Bölüm

On Bir Boyutlu Uzay-Zaman

Süper otoyolda, "süper-kütleçekimi" denen son duraktan bir önceki otobüs durağına geri dönelim. Süper-kütleçekimi teorisi iyi iş gördü ama pek de sanıldığı kadar değil. Bazı noktalarda matematiksel yapılar iyi işlemedi. Üstelik tüm parçacık türleri modelde birbirleriyle uyumlu hale getirilemedi ve tüm sonsuzluklar birbirini götürmedi. Araştırmacılar büyük cesaret ve sabırla aynı teoriyi bu sefer de kendi uzayımızdan çok daha büyük uzaylarda incelemeye çalıştılar.

İkiboyutlu bir uzay, şu anda okuduğunuz sayfadan koparılan bir kâğıt parçasının yüzeyine benze-

tilebilir. Şimdi bir sayfa yırtıp, bunu yuvarlayarak silindir şekline getirdiğimizi varsayalım. Tesadüfen kâğıdımızın üzerinde yürüyen kırmızı bir örümcek için bu yüzeyin silindir olması pek fark etmez. Örümceğin silindir üzerinde bir çember etrafında yürümesi uzun zaman alır. Büyük bir ihtimalle başladığı yere geri dönmüş olduğunun farkına bile varmayacaktır. Örümceğin dünyasının hâlâ ikiboyutlu olduğunu söyleyebiliriz. Ancak belirli bir uzaklıktan bakıldığı zaman, kâğıt boru sadece bir boyutu olan bir çubuk gibi görünecektir. Benzer şekilde, çok küçük parçacıklar dünyası üçten fazla (uzaysal) boyuta sahip olabilir. Bu küçük parçacıkları bizim kırmızı örümceğe benzetebiliriz. Çünkü onlar da bazı boyutlarının "yuvarlanarak kapandıklarının" farkına varamazlar. Bu kapanan boyutlar bizim için görünmez olurlar. Bu fikir 1919'da Theodor Kaluza tarafından ileri sürülmüş ve İsveç, Stockholm'dan Oskar Klein tarafından geliştirilmişti. Böylece onlar ilginç bir şey bulmuş oldular: Kütleçekimi alanının uzayın kapanan boyutu doğrultusundaki bileşeni, elektromanyetizmada Maxwell yasalarının uyduğu yasalara tamamen uymaktadır! Elektromanyetizma, başka bir şey değil de kapanan boyuttaki kütleçekimi mi acaba? Einstein bu düşünceyi öğrendiğinde çok heyecanlanmıştı. Ancak böyle bir teoriyle herhangi bir öngörüde bulunulamayacağı kısa zamanda anlaşılınca bu işten vazgeçildi.



Şekil 25. (*a*) Eğri uzay. İkiboyutlu bir çizim. (*b*) Bir boyutun kapandığı ikiboyutlu uzay. (*c*) Tekboyutlu uzay.

Kaluza ve Klein'a ait olan bu fikri süper-kütleçekimi uzmanları yeniden keşfettiler. Çok sayıda ek boyutu düşünmeye başladığımız zaman, bazı şeylerin değişik şekillerde ele alındığı matematiğin Valhalla'sına* girmiş oluruz. Kütleçekimi kuvvet alanının bu kapanan boyutlar doğrultusundaki bileşenleri, artık çeşitli ayar alanları olarak davranır-

* İskandinav mitolojisinde ölen kahramanların ruhlarının sonsuz mutluluk içinde yaşadığı tanrı Odin'in sarayı.(ç.n.)

lar. Karşılığında bir şey vermeden sadece elektromanyetizmayı değil, diğer ayar kuvvetlerini de elde ederiz. Uzay-zamanın boyutunu gösteren sihirli sayı on bir olarak bulundu. Bunların üç tanesi normal uzay ve biri zaman olup, geriye kalan yedi boyut kapanmıştır. Bu sayılarla ilgili bir dizi hileden yararlanarak, sistemin, bildiğimiz dörtboyutlu uzay-zamanın simetrisinden daha fazla simetriye sahip olduğu keşfedildi. Şimdi, gözlenen alanlar ve parçacıklar bunun içerisine rahatlıkla yerleştirilebilir. Daha büyük simetri demek, istenmeyen sonsuzlukların öncekilere bakarak daha iyi bir şekilde birbirlerini yok etmesi demektir.

Bu görüş, uzay ve zamanın birbirlerinden kopuk olduğunu ileri süren fikrin tam karşıtı gibi görünmektedir. Çünkü bu durumda "boyut" kavramının tümü artık fazla bir anlam taşımamaktadır. Ancak matematikçiler böylesine açık çelişkiden çekinmediler. Onlara göre, kapanan uzaylarla tam sayılar matematiği arasında her çeşit ilişki vardır (kopuk uzay-zaman noktalarını tam sayılarla göstermek mümkündür). Bu, uzay ve zamanımızı tanımlayan ve matematiksel olarak birbirine eşdeğer çeşitli yolların olduğu anlamına mı geliyor? Bu konuda hiçbir şey bilmiyoruz.

Benim kuşkum şu ki; on bir boyutlu kütleçekimi, tüm iyimserliğimle söylüyorum, en iyi durumda mükemmel bir buz dağının tepesi olabilir ya da tamamen yanlış bir şeydir. Bu aşamada, çok acayip fikir-

lerle uğraştığımızı ve bunlara ilişkin teorik irdelemelerin halen son derece zayıf olduğunu unutmamamız gerekiyor. Niçin süpersimetri? Niçin on bir boyut? Niçin her şeyi son derece güzel ve simetrik yapıyor? Üstelik, uzay ve zamanın son derece kısa mesafelerde anlamını yitirdiğini bildiğimiz halde, niçin hâlâ süreklilikten bahsediyoruz? Bu tür bir teorideki kalıcı zorluklardan biri, parçacık yörüngesinin normalde tamamen bir doğru olması gerekirken, parçacıklar arasındaki kuvvetlerin bu yörüngeleri etkileyen pertürbasyonlar olarak ele alınmasıdır. Ancak bu durumda, bu etkilenmiş yörüngeler üzerinde yeni ve farklı pertürbasyonlar olacaktır ve bu pertürbasyonlar üzerinde de yeniden pertürbasyonlar olacak ve böylece devam edecektir. Bunlar hiçbir zaman bir sona ulaşmayacak ve böylece problem formülü bulunamayan bir girişim olarak kalacaktır. Doğrusunu söylemek gerekirse, aynı problem eski "Standart Modeli" de etkilemişti. Ancak orada hiç olmazsa kuvvetlerin küçük tutulduğu söylenebilir, öyle ki pertürbasyon etki serisi hızla yakınsar. Süper-kütleçekimi teorisinde bunu artık hiç göremiyoruz; küçük uzaklıklarda kuvvetler güçlü olmaya başlıyor.

İtiraf edeyim ki, bu teoride ilk ciddi zorluklar baş gösterdiğinde rahatlamıştım. Sonuçta, yedi kapalı halkanın ötesindeki diyagramlarda, sonsuzlukların birbirlerini götürmediği anlaşıldı. "Her Şeyin Teorisi" diye adlandırılan tahmin niteliğindeki teori, ufukta daha ilginç bir şey gözüktüğü için terk edildi.

XXV. Bölüm

Süpersicim

Süpersicim destanının kökleri parçacık fiziğinin tarihöncesine, yani 1960'lara uzanır. XIII. Bölüm'de Gabriele Veneziano'nun yazdığı formülü kuvvetli etkileşen mezonlara nasıl uyguladığını anlatmıştım. Bu sicimlerin, bir ucunda kuark, diğer ucunda antikuark bulunan bir çeşit ipe benzeyen mezonları tasvir ettiği anlaşılıncaya kadar aradan yıllar geçti. İpler sonsuza kadar gerilebilir, çünkü onları germek, enerji eklemek anlamına gelir. Bu enerji maddeye dönüşebilir, yani daha çok ip oluşur.

Veneziano formülü mezonların özelliklerini çok iyi bir şekilde anlatıyor. Çünkü mezonlar gerçek-

ten yaklaşık olarak bu şekildeki sicimler gibi davranırlar. Yalnız küçük bir fark var; ipler son derece ince değil, tersine, kuarklar arasındaki güçlü kuvvet çizgi demetlerinden oluşmuş kalın iplerdir. Yüksek enerjilerde Veneziano formülü hassasiyetini daha da yitirir. Çünkü küçük uzaklık ölçeklerindeki özellikler belirmeye başladığı zaman, güçlü kuvvet tarafından oluşturulan akı tüplerinin artık sicim gibi davranmadığı görülür. Burada Veneziano modeli yerine, "kuantum renkdinamiği", yani $SU(3)$ renk ayar teorisi, mezon ve baryonların yegâne teorisi olarak onurlandırılır.

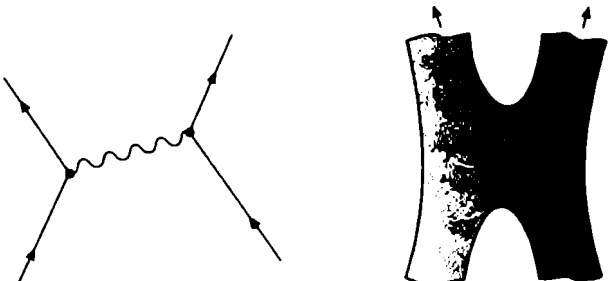
Ancak bu, Veneziano formülünün unutulduğu anlamına gelmez. Acaba gerçekten koparılamaz ideal "sicimlerden" meydana gelen bir kısım parçacık için başka bir teori yapılamaz mı? 1970'lerde fizikçiler, birbirleriyle karşılıklı olarak etkileşen sicimler teorisinin geliştirilip geliştirilemeyeceğini araştırmaya başladılar.

İşin felsefesi ilke olarak basitti. Şimdiye kadar, Standart Modelin herhangi bir türündeki parçacıkların tümü noktasal parçacıklar olarak ele alındı. Bir kuark ya da bir lepton bir nokta gibi davranmıyorsa, bunun nedeni, kuark ya da leptonun, diğer noktasal parçacıklardan meydana gelen ince bir bulut tarafından çevrilmiş olmasıdır. Parçacıkların ilk anda birbirleriyle etkileşebilmeleri için, mutlaka aynı uzay-zaman noktasında bulunmaları gerekir - dolaylı etkileşim iki parçacık arasında, üçüncü bir

parçacığın, örneğin bir ayar fotonunun değiş tokuş edilmesiyle meydana gelir. Hatta, bu parçacıkların kuvvet alanları uzay-zamanın her bir noktasında ayrı ayrı "gözlenebilir" ya da algılanabilir.

Biz probleme daha farklı yaklaşacağız. "Nokta" kavramından sonra gelen matematiksel kavram, "eğri" ya da belirli kurallara göre uzay ve zaman içinde hareket eden herhangi bir kıvrılmış çizgidir. Sezgilerimize dayanarak noktasal cisimler arasındaki etkileşimlerin doğal olmadığı sonucuna varabiliriz; nasıl oluyor da birbirlerini bulabiliyorlar? Sadece iki noktanın tamamen bir araya gelmesiyle etkileşimlerin olmasını istemek, "sıradan" alan teorilerinde görüldüğü üzere, kaçınılmaz bir şekilde sonsuzluklara yol açar. Oysa, eğrilerin bir yerde birbirleriyle buluşması ve sonunda bir çeşit değiş tokuş sürecine girmesi daha kolaydır.

En basit sicim teorisi için bu tür bir görüş pek doğru değil; böyle sicimlerde iki uç birbirleriyle birleştirildiğinde ya da tersine, bir sicim koptuğunda etkileşimler meydana gelir. Daha önceki yaklaşımları tekrar kullanırsak bunun pek doğal olmadığı anlaşılır. Bununla birlikte, noktasal parçacıklar teorisine kıyasla bir gelişme sağlandı. Uzay-zamanda sicimler arasındaki bir etkileşim sürecini izleyerek (bakınız Şekil 26), Feynman diyagramlarının, çok daha güzel olan "sicim diyagramlarıyla" nasıl değiştirildiğini görebiliriz. Normal alan teorilerindeki çoğu zorluğun, parçacıkların uzay-zaman

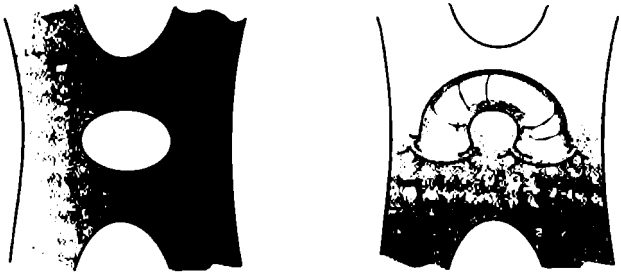


(a) (b)

Şekil 26. (*a*) Feynman diyagramı. (*b*) Sicim diyagramı: Burada sicimin uç noktalarının uzay ve zamanda nasıl hareket ettikleri gösterilmektedir. (*a*)'dakinin aksine "etkileşimin" tam olarak nerede meydana geldiği söylenemez.

içinde özel noktalarda buluşma durumunda kalmalarından ileri geldiği düşünülürse, sicim teorisinin böyle zorluklardan arınmış olabileceğini tahmin edebiliriz. Şekil 26 (*b*)'de görülebileceği gibi, böyle özel noktalar ya da köşeler mevcut değildir.

Sicim teorisinin henüz bittiğini sanmayın. Şekil 24'de gösterildiği üzere, temel parçacıkların "ilmik diyagramlarını" yaratması gibi, sicim diyagramlarının da çok karmaşık örgüler oluşturmasına izin verilmelidir. Bir değiş tokuş esnasında, iki sicim birbiriyle bir kez daha etkileşir. O zaman Şekil 27'deki gibi diyagramlar elde edilir. Böyle diyagramların etkilerini hesaplamak hiç de kolay değildir ve bu hesaplarla ilgili kurallar sıfırdan başlanarak düzenlenmelidir. Richard Feynman, ayar teorilerinde ilmik diyagramları için hesap kuralları nasıl geliştirdiyse, aynı işlemlerin sicim teorisi için de bir kez



Şekil 27. Yüksek mertebeden sicim diyagramları.

daha tekrar edilmesi zorunlu hale geldi. İlk hesaplardan hem iyi hem de kötü haberler var.

Önce iyi haberler. Kuantum alanlar teorisini formüle ederken bizi çok uzun ispatlar ortaya koymak zorunda bırakan o kalıcı sonsuz ifadeler kayboldu: Artık formüllerimizde sağlıklı, "sonlu" matematiksel ifadelerle uğraşıyoruz. Şimdi bu iyi bir haber mi? Alan teorilerinde görünürde sonsuz çıkan ifadelerin nasıl yok edileceğini zaten öğrenmemiş miydik? Yapmamız gereken şey, gayet dikkatli olmak ve zaten iyi tanımlanmamış olan "çıplak yükler" ile "çıplak kütleler" gibi gözlenmeyen şeylerden bahsetmemekti. Ancak, sonuçta, çarpışma olasılıkları gibi deneyle test edilebilir hassas öngörülerde bulunmak tamamen mümkün oldu. Görünürde sicim teorisyenleri için işlerin biraz kolay gittiği anlaşılıyordu ve üstelik teori, Kaluza-Klein yöntemi kullanılarak dört boyuttan daha büyük uzay ve zamanda bile işletilebiliyordu. Dört boyutun üstündeki standart kuantum alanlar teorilerinden

hiçbiri ortaya çıkan sonsuzluklarla baş edemez. Yani bunların hiçbirisi renormalize değildir. Sicim teorileri, Kaluza ve Klein'ın o şık, basit oyunlarıyla uygun bir şekilde birleştirilebilir.

Şimdi de kötü haberler. Hesap kuralları doğru bir şekilde işlemedi. Feynman'ın tıpkı ayar teorilerinde "hayalet parçacıkları"nı keşfetmesi gibi, sicim teorisinde de hayalet çözümlerinin olduğu ortaya çıktı. Bu çözümlerden kurtulmanın tek yolunun sicim parametresini çok özel bir şekilde seçmek olduğu anlaşıldı. O zaman da ışık hızından daha hızlı giden parçacıkların bulunduğu çözümler meydana çıktı. Bu, ayar teorilerinin problemleri kadar kötü bir şey. Işıktan daha hızlı hareket eden parçacıklarla nasıl uğraşılacağını belki de bilimkurgu yazarları daha iyi biliyordur - böyle cisimlerin üstüne (ya da içine) oturarak çok uzak yıldız sistemlerine, çok fazla zaman harcamadan rahatlıkla seyahat edilebilir - ancak ciddi fizikçiler için böyle parçacıklar bir beladır. Daha az titiz yazarlar, bu türden varsayımsal parçacıklar üzerine yapılan hesaplarla kendilerini meşgul ettiler ve bu parçacıklara takyon adını verdiler (Yunanca ταχυς = hızlı). Ancak temel taneciklerin kuantum mekaniği yasasına göre, içinde takyon bulunan bir teori, boş uzayın (vakumun) kararlı olmayacağını gösterir. Böyle bir teori gereksizdir.

İşte bu, sicim teorisini ısrarla destekleyen küçük bir grup için uğraşılması gereken bir problemdi. Ve

bununla uğraşacak kişiler vardı. Bu teorinin matematiği, bir kenara atılmayacak kadar çok güzel görünüyordu ve takyonlar kaybolacak şekilde teoriyi geliştirmek bir hayli çekici geliyordu. Doğru, teori, sicimin küçük bir parçasının takyon gibi hareket eden çözümlerine izin veriyordu, ancak bu şekilde hareket eden sadece spini 0 ve 1 olan parçacıklar vardı. Bunun karşılığında spini 0, 1 ve spini 2 olan kütlesiz sicim çözümleri ortaya çıktı. Bunlar takyon değildi. Sonunda anlaşıldı ki, kütlesiz spin 1 parçacığı tam bir ayar fotonu gibi, bundan daha da önemlisi spin 2 parçacığı bir graviton gibi davranıyordu. Spin 2 parçacığının etkileşimleri tıpkı kütleçekimi kuvvetinin etkisine benziyordu. Fiziksel açıdan bakılırsa bunun nedeni çok basit: Etkileşen kütlesiz spin 2 parçacığı bulunan bir teorinin tek simetri yapısı kütleçekimi teorisiyle aynı olduğu için başka seçenek yoktur! Ama bu sicim teorisinin kütleçekimi kuvvetini kendiliğinden meydana getirdiğini gösterir. Sicim teorisi şimdiye kadar gözlemlediğimiz bütün parçacık türlerini açıklamakla kalmıyor, aynı zamanda kütleçekimi kuvvetimizi de içeriyor ve anlaşılan eğri uzay-zamanımız kaçınılmaz biçimde bu teorinin en temel parçası olarak ortaya çıkıyor.

İşte böylece, sicim teorisi kütleçekimine ait zorlukları halleden olası bir aday teori olmaya başladı ve bu teorideki kütleçekimi kuvveti diğer kuvvetlerle birleştirilmiş oldu. Yalnız, sicim teorisinin bu

çeşidinin, mezonları ve güçlü kuvveti anlatmak için Veneziano'nun kafasında tasarladığı sicim teorisiyle artık hiçbir ilişkisi kalmamıştı. Bunlar proton ve pion büyüklüğünde olmayan sicimlerdir; Planck mesafesi kadar, yani yaklaşık on sekiz basamak daha küçük olmaları gerekir. Bu sicimlerdeki gerilme şiddeti, kuarkları birleştiren "sicim"deki 14 tonluk kuvvet değil, onun yerine çok çok büyük bir rakamdır (fazladan otuz altı sıfır eklemek gerek). Ancak bu şekilde, graviton-sicim yöntemi mümkün olduğunca zayıf bir kütleçekimi kuvveti yaratır!

1978 yılında Pasedena'daki Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde, John Schwarz ile yaptığımız hararetli bir tartışmayı anımsıyorum; John, sicim teorisinin güzel vaatleri konusunda beni ikna etmeye çalışmıştı. Bu tartışma, çoğu teorisyenin süper-kütleçekimi teorisiyle halen meşgul olduğu bir döneme rastlar. Ancak John, o zaman bile, sicim teorisinin HEŞET ("her şeyin teorisi") olacağını hayal ediyordu. "Hayalet çözümleriyle takyonları şu ya da bu şekilde yok ettiğimizi varsayalım" dedikten sonra, "bunun bir son teori olabileceğini düşünmez misin?" diye eklemişti.

Bunu şüpheyle karşılamıştım ancak onu ikna edemedim. Belki de böylesi iyi olmuş. Çünkü 1984'de Amerika Birleşik Devletleri'nden ilginç raporlar gelmeye başladı ve hemen arkasından, buluş hastalığına yakalanmış araştırmacılar tarafından bunlar doğrulandı. John Schwarz, Londra Üniver-

sitesi Queen Mary Koleji'nden Michael Green ile birlikte hayaletleri yok eden yeni bir yöntemi keşfetme onuruna sahip olmuştu. Sorunun yanıtı, iç simetri yapısının çok özel bir seçimine bağlı olmakla birlikte, her şey yirmi altı boyutlu uzayda gerçekleşiyordu. Bu yirmi altı boyutun yirmi ikisi, önceki bölümde açıkladığım Kaluza-Klein teorisindeki gibi kapanıyordu.

Konunun matematiği, Princeton Üniversitesi'nden genç dahi matematiksel fizikçi Edward Witten tarafından çalışıldı. Witten, Schwarz ve Green ile birlikte, sicim teorisini ilgilendiren iki ciltlik kalın bir kitap yazdı. Sicimde süpersimetrinin varlığı da gösterildi. Ancak bu durumda yirmi altı boyutlu teori, yerini on boyutlu bir teoriye bırakıyordu. Kuşkusuz bu durumda altı boyutun kapanması gerekecekti. Süpersimetri, bir kolyeye boncukların dizilmesine benzer bir şekilde sicime takılan fermiyonların bulunması gerçeğinden kaynaklanıyordu. Bu fikir zaten uzun bir süredir ortadaydı - fermiyonların varlığının bir şekilde açıklanması gerekiyordu - ancak tüm zorlukların on boyutlu sicimle birlikte yok edilmesi yeni bir keşifti.

Princeton'da David Gross ve çalışma arkadaşları, sicimdeki tüm fermiyonların yalnız bir yöndeki hareketlerine izin veren bir teori geliştirmişlerdi. Bu teoriye göre, sicimde belirli bir doğrultuda giden dalga hareketi on boyutlu bir uzayda bulunurken, ters yöndeki dalga hareketi yirmi altı boyutlu

bir uzayda meydana gelmektedir. David buna "heterotik sicim" adını verdi. Bu teorinin güzel yanı, sol-sağ asimetrisinin zayıf etkileşimlerde gözlediğimiz sol-sağ asimetrisine son derece benzemesidir.

Heyecanlı süpersicim taraftarları fizikte yeni bir çağdan bahsetmeye başlamışlardı ve hatta 1984'ü sıfırıncı başlangıç yılı kabul eden yeni bir takvim bile başlatmışlardı. Süpercisim teorisinden "kuantum mekaniği buluşundan sonraki en iyi teori" diye söz ediliyordu. Doğrusunu söylemek gerekirse süpersicim teorisi çok şaşırtıcı özellikler ortaya koydu. Birincisi, hiçbir yerde sonsuzluklar ortaya çıkmıyordu, öyle ki, birçokları için kabul edilmesi hâlâ zor da olsa renormalizasyon işlemine gerek kalmıyordu. İkincisi, kütleçekimi kuvveti bu teorinin kaçınılmaz ve ayrılmaz temel bir parçasıydı. Tüm diğer "temel" parçacıklar gibi graviton da sicimde küçük, kapalı bir ilmik şeklinde davranır. Bir kemanın telleri gibi süpersicim de her şekilde titreştirilebilir. Sicimin titreşim (ve dönme) kiplerinden çoğu oldukça ağırdır ve Planck kütlesine yakın değerler alır. Bununla birlikte, "kapanan" birkaç boyutun bulunması nedeniyle çok düşük kütleli parçacıkları temsil eden sicim denkleminin az sayıda çözümleri de vardır. O zaman bunlar Standart Modelde gösterilen çeşitli, mevcut parçacık türleriyle özdeşleştirilebilir.

Süpersicim teorisinin üçüncü ve en önemli özelliği, teoriye daha fazla parçacıkların eklenememesi-

dir. Bir "paket program"dır. Ya tüm teoriyi kabul eder ya da reddedersiniz. Başka parçacık türleri bu sicimle kütleçekimi aracılığı dahil hiçbir şekilde etkileşemezler. Teoride serbest ayarlanabilir hiçbir parametre bulunmadığından, parçacıkların tüm özelliklerinin tamamen hesaplanabileceği öngörülüyordu. İşte burada daha önce de bahsettiğim "holizm"in yeni bir örneğini görüyoruz: Ne Einstein'ın görelilik teorileri kendi ilkelerinin dışında, ne de kuantum mekaniği kendi kurallarının dışında herhangi bir ayrıcalığa izin vermez. Süpersicim teorisinde süpersimetrinin önemli bir rolü vardır. Bu yüzden çoğu araştırmacı, Büyük Çöle ait hesaplar yapıldığında, bunun önceki süper-kütleçekimi teorisi için çok önemli bir rol oynayacağı beklentisi içindedir. Ancak şimdiki durumda, süper-kütleçekimi teorisi temel bir teori olmaktan çıkıp, yararlı bir ara durumunu anlatmaktadır.

Belki şimdi, "her şeyin teorisi"nin şampiyonu olarak niçin süpersicim teorisinin görüldüğünü anlayabilirsiniz. Bu, bize daha fazla konuşacak bir şey bırakmıyor. Bizim küçükler âlemine yaptığımız seyahat burada sona eriyor. Geriye halledilecek sadece birkaç teknik ayrıntı kalıyor.

Bu kitap filme çekilecek olsa tam şimdi müziğin doruk noktasına ulaşması gerekir. Bu "teknik ayrıntılar"ın çok inatçı şeyler olduğu ortaya çıktı. Birincisi, kapanan boyutlar meselesi. Bunların kapanması çok değişik şekillerde olabilir. Eğer katla-

nacak iki boyutunuz varsa, bunları ayrı ayrı borular şeklinde yuvarlayabilir ya da ikisinden tek bir futbol alanı oluşturabilirsiniz. Şimdi heterotik sicimde bir yönde altı, öbür yönde yirmi iki boyut katlanabilir ve bunları birçok şekilde yapma olasılığı vardır. Doğa bunlardan hangisini seçmiştir? "Her şeyi hesaplayabiliriz, bunu da nasıl olsa buluruz" demişlerdi.

Fakat hesaplayamadılar. Elimizdeki matematiksel yöntemlerle her şeyin hesaplanması imkânsızdı. Problem şuradan kaynaklanıyordu: Tıpkı diğer tüm parçacık teorileri gibi sicim teorisi de bir pertürbasyon teorisidir. Sicimlerin hareketlerinden doğan etkileşimler pertürbasyon olarak ele alınmalıdır, aksi halde sicimler düzgün doğrusal yörüngeleri izlerler. Gerçek hareketleri bulmak için sonsuz bir seri oluşturan hesapların yapılması gerekmektedir. Bu seriler giderek zorlaşmakla kalmıyor, aynı zamanda tek bir cevaba doğru yakınsamıyorlar da. Bu şu anlama gelir: Her zaman fazladan bir pertürbatif düzeltme hesabının öncekilerden daha kötü sonuçlar verdiği bir aşama olacaktır.

Doğrusunu söylemek gerekirse elimizde bir teori olduğu söylenemez. Buna benzer bir problem parçacık teorisinde de vardı; fakat orada bu derece bir felaket söz konusu değildi. Çoğu halde, pertürbasyon serisinin daha fazla yakınsamadığı aşama çok uzakta olduğu için, "yaklaşık" sonuçların zaten son derece hassas olduğu gösterilebilir. Doğrusunu

söylemek gerekirse, ünlü "Standart Model" tamamen hassastır denemez! Ancak bu Standart Model için akademik bir problemdir. Hassas hesapların yapılmasındaki pratik zorluklar çoğu hallerde daha ciddidir.

Ne yazık ki, sicim teorileri için bu problem bir felakettir. Hesaplanmak istenen çoğu şey, pertürbasyon serisinden zaten elde edilemiyor. Bu fazladan boyutlar nasıl kapanıyor acaba? Hafif parçacıkların kütleleri nedir? (Bu sayılar yaklaşık 22 mikrogram olan Planck kütlesine kıyasla son derece küçüktür.) Sorular bu şekilde devam eder. Süpersicim teorisyenlerinin bulunduğu kampta fikir kıtlığı diye bir şey yoktu ama bu sorulara güvenilir yanıtlar verilemedi. Bu problemleri by-pass etmek amacıyla bir "sicim-alan teorisi" yapma girişimleri oldu. Bu yöndeki çalışmalardan nasıl bir başarı beklendiğini bilmiyorum. Normal parçacık teorisinde uzun bir zaman alanlarla çalıştık. Bu teoride pertürbasyon açılımı yapma zorunluluğu vardır.

Doğrusunu isterseniz, sicim teorisine bir "teori" demek yerine bir "model" demeyi tercih ederim, hatta model bile değildir: Sadece bir önsezidir. Bir teori, her şeyden önce, tanımlamak istediğimiz şeylere bir kimlik kazandırmak için nelerin yapılması gerektiği doğrultusunda birtakım kurallarla ortaya çıkmalıdır. Temel parçacıklar teorisinde, en azından ilke olarak, bu parçacıkların özelliklerini hesaplamak ve yeni öngörülerde bulunabilmek için

gerekli kuralları formüllere bağlayabilmek zorunludur. Size bir koltuk verdiğimi düşününüz. Bunu yaparken de ayakların eksik olduğunu, oturağın, koltuğun arkasının ve kolluklarının çok kısa bir zaman sonra getirileceğini belirtiyorum; size verdiğim şeyin bir koltuk olduğunu hâlâ söyleyebilir miyim?

Bu kadar düşmanca davranmamalıyım. Eğer çok sayıdaki son derece yetenekli ve enerjik genç teorik fizikçi dikkatini bu umut verici yaklaşım üzerinde yoğunlaştırmasaydı, belki de ben, kendim bu problem üzerinde uğraşıyor olacaktım. Fikir güzel ve umut verici. Fakat bunu yararlı bir şey haline getirmek için yapılması gereken iş miktarını küçümsememek gerekir. Her şey ters gidebilir. Burada benim herhangi bir katkım olmadı. Tüm samimiyetimle kendi şüphelerimi belirterek kapatmak istiyorum: (süper)sicimler (de) bir ara aşamadır. Gerçek Her Şeyin Teorisi tamamen farklı ilkeler üzerine oturtulacaktır. Bununla birlikte, sicimler, süpersicimler ve heterotik sicimler üzerine yapılan araştırmalar amacımıza ulaşmak için yararlı araçlar olmaya devam edecektir.

XXVI. Bölüm

Kara Deliklere Doğru

Süpersicimler son aşama değilse, araştırmamızı bundan sonra hangi doğrultuda sürdürmeliyiz? Yoksa kendimizi bilinmez ve anlaşılmazlar dünyasının derin kuyusuna attık da, saçmalıklar içerisinde boğuluyor muyuz? Kendimizi pek çok çözümü olanaksız sorunun içine gömüp, bilim için kaybolmuş insan durumuna mı sokuyoruz? Planck sayılarının bu acayip dünyasındaki Her Şeyin Teorisi hakkında kestirimde bulunmanın herhangi bir anlamı var mı? Bu bölümün başlığı sizi çok korkutuyor olabilir.

Anlaşılamaz şeyler kadar ilgimizi çeken başka hiçbir şey yoktur. Planck mesafesindeki âlemde il-

ginç olan, böylesine güçlü kütleçekimi kuvvetleriyle birbirini etkileyen ve aynı zamanda kuantum mekaniği yasalarına uyan parçacıkları mantıklı bir şekilde anlatan hiçbir model bulunamayışıdır. Planck enerjisinde birbirleriyle çarpışan parçacıklarla deney yapabilseydik bile, sonuçları bir teoriyle nasıl karşılaştıracağımızı bilemiyecektik. Fizikçilerin burada yapacağı bir şey var: Teori oluşturmak. Böyle bir teorinin kütleçekimi kuvvetini nasıl tasvir edeceğine pek aldırdığımız yok ama listemizde bir aday teorinin gerçekleştirebilmesi son derece zor bazı isteklerimiz var. Bir önceki bölümün sonunda açıkladığım gibi, süpersicim teorisi bunu yapmaya oldukça yaklaştı, ama vaat ettiği şeyleri yerine getirmekte başarısız kalabilir.

Bir teori, her şeyden önce, matematiksel olarak sağlam olmalı ve akla gelebilecek her durumda parçacık davranışları hakkında kesin hesaplar yapmamıza imkân vermelidir. Parlak fikirlerini bana satmaya kalkan amatör fizikçilerden sık sık mektup alırım. Ne yazık ki bu fikirler bizim için çok yararlı değil. Çünkü bunlar kesinlik ve sağlamlık bakımından bizim alışageldiğimiz ve şu anda tüm teorilerimizde doğal olarak aradığımız özellikleri taşımıyorlar.

İkinci olarak, kütleçekimi kuvvetini Einstein'ın genel görelilik teorisinde anlattığı biçimde verecek bir teori istiyoruz. Yıldızlar, gezegenler ve benzeri gökcisimleri arasındaki kütleçekimi kuvvetinin bu

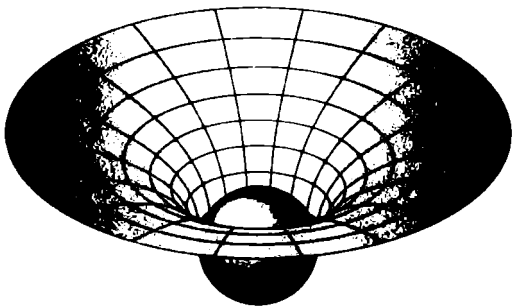
yasaya çok hassas bir şekilde uyduğunu biliyoruz (Bu teori, Russel Hulse ile Joe Taylor'ın çok hızlı dönen kompakt yıldızlar diye bildiğimiz atarcalar (pulsar) üzerine son yirmi yıl içerisinde yaptıkları gözlemlerle kesin bir şekilde doğrulandı). Aranan teori bununla uyumlu olmak zorundadır.

Üçüncü olarak, kuantum mekaniği yasalarının değiştirilemeyeceğini biliyoruz. Bu yüzden teorimizi kuantum mekaniği doktrinleri cinsinden formüle etmek istiyoruz. Hem kuantum mekaniği hem de görelilik teorisi öylesine özelliklere sahip ki, bunların ilkelerinden en küçük sapma bile, bildiğimizi zannettiğimiz yapılara hiçbir şekilde benzemeyen, tamamen farklı bir teori ortaya çıkartır. "Biraz göreli" ya da "biraz kuantum mekaniksel" ifadeleri, "biraz hamile" ifadesi kadar anlamsızdır. Öte yandan, kuantum mekaniğinin ya da genel göreliliğin ayrı ayrı ya da ikisinin birlikte yeni bir teori için çok dar bir çerçeve oluşturabileceğini düşünebiliriz. Bu yüzden bu teorilerin ilkelerini genişletebiliriz, ama bu teorileri hiçbir zaman bir kenara atamayız. Biz fizikçilerin bile anlamadığı teorileri açıklamaya çalışarak canınızı sıkmak istemiyorum. Bununla birlikte, daha sonra izlenebilecek yolları göstermeye çalışabilirim.

Evren'imizde, kütleleri, kendi yıldızımız olan Güneş'in kütlesinden çok daha büyük birçok yıldız var. Bu yıldızların yüzeyindeki kütleçekimi kuvveti Dünya'daki ya da Güneş'tekinden daha

güçlüdür. Böyle bir yıldızdaki muazzam kütle miktarı, yıldız içinde hayal edilemeyecek derecede büyük bir basınca neden olur. Böyle bir yıldızın içindeki sıcaklık genelde çok yüksek olduğu için, yıldızın çökmesine karşı koyan yeterli basınç oluşur, ama yıldız yine de ısı kaybeder. Bir yıldızın yaşamının başlarında, sıcaklığı yüksek tutan ve hatta yükselmesine neden olan çeşitli nükleer tepkimeler olur. Fakat eninde sonunda nükleer yakıt tükenir. Yıldız ne kadar ağır olursa, basınç ve sıcaklık da o derece fazla olur. Bu yüzden yakıtın tükenmesi hızlanır. Karşı basınç durur ve yıldız basınç altında çöker. Yıldız küçüldükçe kütleçekimi kuvveti daha da artar. Ani ve tam bir çöküş artık kaçınılmaz hale gelir.

Böyle bir çökmede çoğu kez o kadar çok ısı açığa çıkar ki, yıldızın dış katmanları radyasyon basıncıyla uzaklara atılır. O zaman çöküş bir noktada durur ve "nükleer maddeden" oluşmuş son derece kompakt bir küre ortaya çıkar: nötron yıldızı. Nötron yıldızları çok hızlı döner (500 devir/saniye'den daha hızlı) ve yıldızın yüzeyindeki düzensizlikler çok hızlı bir şekilde radyo sinyallerinin gönderilmesine neden olur. Bu cisimler ilk olarak böyle bir radyo sinyalinin gözlenmesiyle keşfedildiği için, bunlara "atarca" (pulsar) denildi. Astronomi tablolarında bu yıldızlar "LGM" harfleriyle gösterilirler. Bu tür sinyallerin, yıldızlar arası uygarlıklarda yaşadığı sanılan Küçük Yeşil Adamlardan (LGM=



Şekil 28. Bir ressam gözüyle kara delik.

Little Green Man) geldiği düşüncesiyle böyle bir notasyon kullanıldı.

Yıldızın dış katmanlarından yeteri kadar madde uzaklaştırılamazsa ya da atarcanın üzerine yeni maddeler katılırsa, nükleer maddeden oluşan katı küre bile kütleçekimi basıncına karşı koyamaz. İlk olarak astronom Subrahmanyan Chandrasekhar'ın yaptığı hesaplarla, bu basınca dayanan ve Güneş'in kütlesinin birkaç katına sahip, soğuk ve kompakt cisimler bulunması gerektiği kesin olarak gösterildi. Bu durumda kütleçekimi kuvveti öyle güçlü hale gelir ki, yıldızın başına gelecekleri sadece Einstein'ın genel görelilik teorisi söyleyebilir. Kütleçekimi kuvveti yıldızdaki tüm parçacıklar üzerine toplu olarak etki ettiği için güçlü olabilir ama tek bir parçacık üzerine etkisinin hâlâ çok zayıf olacağını düşünebiliriz. Bu nedenle, bundan sonra meydana gelebilecek olayları kesin bir şekilde hesaplamak için kuantum kütleçekimine ihtiyaç duyacağımız korkusuna kapılmamız (şimdilik) gereksiz. Bu tür

olaylardan ne sonuç çıkacağını ilk kavrayan, herhalde John Archibald Wheeler'di ve onun haklı olduğu konusunda hiç şüphemiz yok.

Wheeler 1967 yılında, bu olayların sonucuna "kara delik" adını verdi. Bir kara delik, içe çöken madde belli bir anda ışık hızına ulaştığı zaman oluşur. Bu durumda dönüşü olmayan matematiksel bir sınır geçilmiş demektir. Çöken madde ile birlikte deliğe giren bir (talihsiz) uzay yolcusu, tam bu noktada ışık hızıyla kaçmaya çalışsa bile artık geriye dönemeyecektir. Kendisiyle birlikte, gönderdiği sinyaller de delik tarafından yutulacak ve bir daha görülmeyecektir.

Olup bitenler güvenilir bir uzaklıktan izlenirse, çöken madde ve kara deliğe doğru uçan astronot tarafından gönderilen sinyallerin ölçülemeyecek kadar zayıf olduğu ortaya çıkar. Cisim kararır ve böylece kendisine uygun olan kara delik ismini alır. Kara delik bir "saf kütleçekimi" topundan başka bir şey olmayacağı için, özellikleri matematiksel bir kesinlikle hesaplanabilir. Kara deliği tam olarak belirlemek için sadece üç parametre yeterlidir: kütlesi, açısal momentumu (dönme hareket miktarı) ve elektrik yükü.

Temel parçacık hüzmelerinin bir kara delik yakınında bulunduğunda nasıl davranacağı da hesaplanabilir. Bu hesap 1974'de Stephen Hawking tarafından yapıldı. Hawking, başlangıçta bir formaliteden ibaret sandığı bir güçlükle karşılaştı: Ne za-

man bir şeye tam olarak parçacık denir ve ne zaman bu parçacık boş uzayın bir öğesi olarak ele alınabilir? Eğer bir şey bir pozitif enerji düzeyini işgal ediyorsa, genelde bu bir parçacık olarak düşünülür. Ancak enerji düzeyi sıfırın altında ve bu düzey işgal edilmek durumunda ise, XVII. Bölüm'de gördüğümüz gibi, böyle bir düzeydeki cismin olmayışı, bir parçacık gibi algılanabilir. Çevre hareket halinde ise enerji düzeyleri tek tek belirlenemez. Kara delik yakınındaki parçacıklar için durum budur. Sonuçta şöyle bir durumla karşılaşırız: Bir kara deliğin içine düşen astronot, etrafındaki uzay-zamanın boş olduğunu zanneder, ancak dış dünyadan bakan biri, kara delik tarafından yakalanmadan kaçan parçacıklar olduğunu düşünür. Bu teorideki bir belirsizlik mi? Hawking ilk olarak bu problem üzerinde durdu; hesaplarını ne kadar kontrol ederse etsin, kara delikten az miktarda bir parçacık kaçışı olduğunu gördü. İşte bu noktada, halen onun en önemli buluşu saydığım çalışmasını yapmış oldu. Bunlar gerçek parçacıklardır! Her kara delik, akla gelebilecek her tür parçacığı içeren sürekli bir ışınım yaymaktadır.

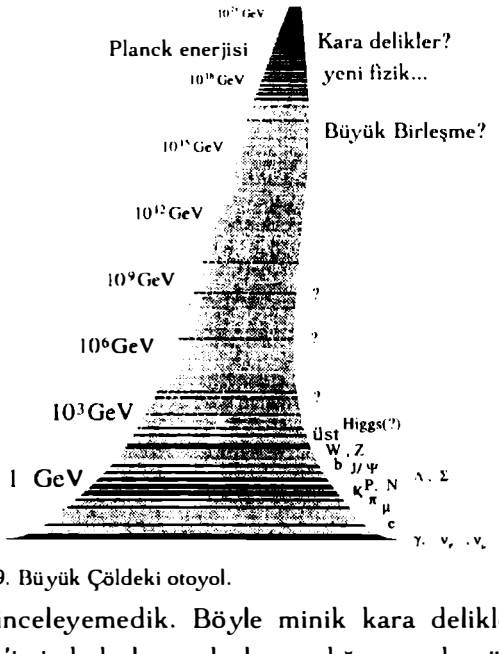
Bu parçacık ışınımının yeğinliği, kara deliğin kütlesinin karesiyle ters orantılıdır. Astronomlar tarafından tartışılan kara deliklerin Hawking ışınımı öylesine zayıftır ki, kara deliğe ne düşerse düşsün, ışınım onun yanında daima küçük kalır. Kara delik diğer yıldız sistemlerinden çok uzakta

bulunsa da söylediğimiz şey geçerlidir. Ama önemli olan şu ilkedir: kara delikten herhangi bir şey kaçabilir ve kaçış kendiliğinden olur.*

Burdan şu anlam çıkıyor: Bir kara delik kütlesini kaybedebilir ve bu nedenle hiç değilse ilke olarak Chandrasekhar tarafından hesaplanan kritik kütleden daha hafif hale gelebilir. Kara delik hafifledikçe, kütle kaybetme hızı da o oranda artar. Çabuk bir hesapla bir kara deliğin oldukça büyük bir dağın kütlesine ulaştığı zaman bütün kütlesini Hawking ışınımı olarak yayması için sadece birkaç saniyeye ihtiyaç olduğu gösterilebilir. Bu, en güçlü nükleer bombadan çok daha yoğun bir patlama meydana getirir. Kara delikler yaydıklarına oranla içlerine daha fazla madde çektikleri için, doğrusu hiçbir zaman bu aşamaya gelemezler. Ama ilke olarak bu süreçler mümkündür ve biz olabileceklerin ayrıntılarıyla ilgileniyoruz. Söylediklerimle, belki de, Hawking'in yaptığı hesaplarda sadece Doğa'nın bilinen yasalarını kullandığını ima etmiş olabilirim. Dolayısıyla bulduğu sonuçlar tartışma götürmeyebilir. Ancak iki nedenden dolayı bu tam olarak doğru değildir.

Birincisi, çok küçük bir kara deliğin Hawking ışınımını ölçemediğimiz gibi, bir şeyin kara delik haline geldikten sonraki durumunu da hiçbir za-

* Bir kara delikten yayılan parçacıklar ısıl ışınımın istatistik kurallarına uyar. Kara deliğin belli bir sıcaklığı vardır ve bir kar tanesi, bir ampul ya da bir yıldız nasıl ışınım yayarsa, kara delik te öyle ışınım yayar. Yayılan parçacıklar arasında kuşkusuz küçük yeşil adamlar ya da astronotlar yoktur!



Şekil 29. Büyük Çöldeki otoyol.

man inceleyemedik. Böyle minik kara deliklerin Evren'imizde bulunup bulunmadığını ya da gökcisimleri arasında son derece küçük bir azınlık meydana getirip getirmediğini bilmiyoruz. Teoriyi bildiğimizi varsaysak bile, öngörülerini şu ya da bu şekilde kontrol edememenin hiçbir zararı olmaz. Hawking'in bulduğu olay kuşkusuz bir kuantum olayıdır. O halde her şey şu anda düşündüğümüz gibi mi olacak?

Şimdi ikinci noktaya geliyorum. Başka bir sonuç veren bir teori tasarlayabilirim. Bu problemle ilk olarak ilgilenmeye ve Hawking olayını tam olarak anlamaya başladığımda, bütün farklı teorileri kurmaya çalıştım. Hawking'in bulduğundan farklı so-

nuç veren bir teori kurmayı başardım: Kara delik, onun bulduğundan daha şiddetli ışınım yaymalıydı. İtiraf edeyim ki, bu sonuçlar sadece, kara delik yakınındaki kuantum mekaniği yasalarını bilinen atomik olayları hesaplarken ele aldığımızdan daha farklı bir şekilde ele aldığımız zaman ortaya çıkıyor. Ancak benim farklı hesabımın "izin verilmediği" mutlak bir ispatın olmadığını iddia ediyorum.

1985 yılına kadar Stephen Hawking'i konferans ve toplantılardan tanıyordum. Ciddi fiziksel engeline nasıl meydan okuduğunu ve günümüz teorik fiziğindeki önemli rolünü nasıl devam ettirdiğini hayretle izliyorum.* Bugün, o, tek parmakla yönlendirdiği, akıllı, konuşan bir bilgisayar aracılığıyla bizimle iletişim kurabiliyor. Bu tek parmakla, teorimin savunulamayacağına beni, tam olmasa da, hemen hemen ikna etti. Şu ana kadar kara delikleri daha ayrıntılı bir şekilde çalıştığım için, onun hesaplarının büyük bir olasılıkla doğru olduğuna inanıyorum, ama hâlâ tam emin değilim.

Hawking ışınımıyla ilgili olarak daha önemli bir özellik var. Parçacık yaydıkça kara deliğin büyüklüğü azalır ve büyüklük azaldıkça ışınımın şiddeti çok hızlı bir şekilde artar. Son aşamaya gelmeden hemen önce, kara deliğin boyutu Planck mesafesiyle karşılaştırılabilir duruma gelir ve kara deliğin kütlesi Planck kütlesinden biraz fazla olur. Yayılan

* Stephen Hawking, *Zamanın Kısa Tarihi* (Milliyet Yayınları, 1989).

parçacıkların enerjileri de Planck kütlesine yakındır. Sadece tam bir kuantum kütleçekimi teorisi o anda kara deliğe ne olacağını söyleyebilir ve öngörebilir!

Bu, Planck mesafesindeki temel parçacık teorisi için kara deliklerin önemini gösteriyor. Planck sayılarının belirlediği enerji düzeyine ulaşmış olan kara delikler, hayali deneyler için ideal bir laboratuvardır. Sağlıklı bir teori bize burada nasıl hesap yapabileceğimizi söyleyebilmelidir. Yaklaşık on yıldır bunu süpersicim teorisine bir karşıt görüş olarak ileri sürüyorum: Süpersicim teorisi, bir kara deliğin, hayatına "astronomik" bir kara delik olarak başlamış olmasını ve ömrünü patlayarak bitirmesini açıklayamadığı gibi, kara delikler hakkında da hiçbir şey söylemiyor. Bununla birlikte, 1994'den beri sicim teorisyenleri çılgınlar gibi bu probleme çare arıyorlar. Her sağlıklı kütleçekimi teorisinde olduğu gibi, sicim teorisi de kara deliklerin varlığını öngörür. Ancak bu satırlar yazıldığında kara deliklerin fiziksel özelliklerini hesaplamak için izlenecek süreçler hakkında hâlâ bir hayli karışıklık vardı.

Üzerinde düşündükçe, kara deliklerin küçükler âleminde ne kadar önemli olduğu anlaşılıyor. Şu andaki çıkış noktamı şu soruyla belirteyim: Kütleçekimi kuvvetinin temel tanecikler üzerindeki etkisi anlaşılmak isteniyorsa, "aklınıza gelebilecek en güçlü kütleçekimi alanından" daha etkin hayali bir

deney seçilebilir mi? Herhangi bir parçacık, birim Planck mesafesindeki bir aralığa yerleştirilmeye çalışılırsa, kuantum belirsizlik bağıntısı, parçacığın enerjisindeki belirsizliğin, en az bir birim Planck enerjisi kadar olacağını söyler. Ancak bu, Planck mesafesinden daha büyük minik kara delikler yaratıyorsunuz demektir. Zaten daha önce gördüğümüz zorluk da buydu: Uzay-zamanın kırışıklıkları, katları ve tümsekleri yüzünden cisimleri bir birim Planck mesafesinden daha hassas bir biçimde yerleştirmek imkânsız hale gelir.

En küçük maddeyi bulmak için yapılan araştırmalar bir sona ulaşırsa, bu mümkün olabilen en küçük cisim olmalıdır: bir minik kara delik. Orada uzay ve zaman esas anlamını yitirir ve bunları nelerle değiştirmek gerektiğini de bilmiyoruz. Araştırmamız hem sözel olarak hem de gerçekten bir kara delikle son bulmuş oluyor.

XXVII. Bölüm

Henüz Var Olmayan Teoriler

Kara delikleri fiziğin son yasalarıyla ilgili düşüncelerimize katmanın bir ilerleme olduğunu söyleyebilirim. Ben araştırmamın çoğunu bu konuya, kendime şu soruyu sorarak yoğunlaştırdım: Hem kuantum mekaniği, hem de kütleçekimi yasalarına uymasında ısrar ettiğimiz çok küçük bir kara deliğin olduğunu varsaydığımızda, bunun davranışını nasıl belirleriz?

Bu sorudaki incelik, bir kara deliğin tamamının, kuantum mekaniği yasalarına uyan bir atom ya da molekül gibi davrandığını kabul ediyor olmamdan kaynaklanmaktadır. Bu noktada herkes benimle

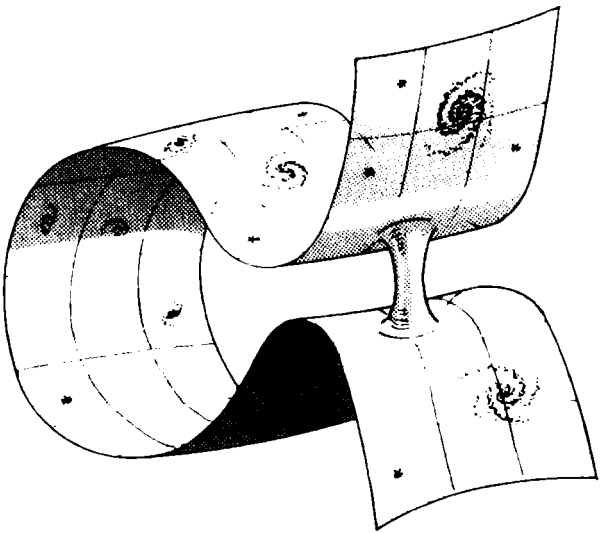
aynı görüşte değil. Bazıları kara deliklerin tamamen farklı şeyler olduğunu söylüyor. Peki, farklılık nedir? Kara delikler tıpkı bazı radyoaktif atomların yaptığı gibi parçacık yayarlar. O zaman bunlar niçin aynı kurallara bağlı kalarak bu ışınımı yapmasınlar? Daha güçlü söylemek gerekirse, Planck mesafesinde bir "yasa ve düzenin" olduğuna inanıyorsak, bana öyle geliyor ki, kara delikler de bu yasalara mutlaka uymak zorundadırlar.

Yaptığım hesaplardan birinin sonucunda büyük bir sürprizle karşılaştım. Pratik olarak sicim teorisindeki matematiksel ifadelere benzeyen şeyler buldum! Bir kara delik tarafından fırlatılan ya da onun tarafından yakalanan parçacıklara ilişkin formüller tıpkı Veneziano'nun formülüne benziyor. Burada sicim söz konusu olmadığı için bu formül oldukça tuhaf. Teori bitirilmediği için sicim teorisinin kara delik teorisiyle nasıl bağdaştırılabileceğini, ya da bunun olup olmayacağını söylemek son derece zor. Her iki halde de teoriler tamamlanmamış durumda; belki her ikisi de daha güzel ve mükemmel bir şeyin başlangıç aşamalarıdır.

Benden farklı düşünen ve bu konuları bir hayli incelemiş olan birkaç araştırmacı var. Stephen Hawking'e inanırsanız, kara delikler uzay ve zamanın daha da ciddi deformasyonlarının bir başlangıcı: Örneğin, daha önce de bahsettiğim gibi "uzay-zaman köpüğü" diye ileri sürdüğü şey. Hepsi bundan ibaret değil. Hawking ile birlikte başkaları,

özellikle Harvard Üniversitesinden Sidney Coleman, "solucan deliklerinin" önemli bir rol oynadığı görüşünü savunuyor. Solucan deliği denen şey, Evren'in birbirinden çok uzak iki bölgesini birleştiren bir uzay-zaman kanalıdır. Solucan deliği, kendi Evren'imizi "farklı evrenlerle" de birleştirebilir. Einstein'in kütleçekimi teorisi ilke olarak böyle tuhaf şeylere izin veriyor. Ancak araştırmacıların öne sürdükleri şey şu: Madem ki Einstein'ın teorisi solucan deliklerine izin veriyor, o halde onlar gerçekte vardır. Bu tür bir yaklaşım, kuantum mekaniği ile uğraşırken karşılaştığımız şeylerle uyumludur: İzin verilen herhangi bir şey var olmaya mecburdur; yani belirli bir konfigürasyon mümkünse, o aslında belirli bir olasılıkla meydana geliyor demektir. Herhangi bir bilim kurgu kitabını okumuş olanlar bu tarz yazarların solucan deliklerini sevdiğini bilirler. Bitmez tükenmez olasılıkları aklınıza getirebilirsiniz: Solucan deliklerinden birine girer ve hiç zaman kaybetmeden hemen kendinizi Andromeda'da bulursunuz.

Solucanlar açtıkları deliklerle toprağa faydalı oldukları için biyologlar açısından işe yararlar, ama kuantum mekaniği açısından bir felakettir. Şükredelim ki, solucan deliği teorisinin bu deliklerin kesinlikle gözlenemeyeceği şeklinde yorumları da vardır. Ben böyle olmasını yeğlerim. En iyimser yaklaşımla, solucan deliklerinin daha iyi bir teoriye geçiş aşamasını meydana getirdiğini düşünebiliriz.



Şekil 30. Bir evrenin uzak bölgelerini birbirine bağlayabilecek bir solucan deliği.

Kurgu bilimini ciddiye almasanız da, arada sırada, bir tek temel parçacığın buradan Andromeda'ya bir solucan deliğinden kayarak gittiğini hâlâ hayal edebilirsiniz. Ne var ki, Hawking ve Coleman'ın yaptığı hesaplar böyle bir olayın temelde hesaplanamaz olduğunu göstermektedir. Yasa ve düzene elveda. Böyle bir sonuçtan ne Hawking ne de Coleman solucan deliklerinin yasaklandığı sonucunu çıkarmıyor. Ama ben böyle bir sonuç çıkarıyorum.

New York eyaletindeki Syracuse Üniversitesi'nden Abhay Ashtekar'ın, formel kuantum kütleçekimi analizi ile başlayan başka bir yaklaşımı var. Ashtekar'ın fikirlerini geliştiren Lee Smolin ile

Carlo Rovelli gibi genç araştırmacılar, uzay-zamanın temel ögelerinin noktalar yerine kapalı ilmikler olduğunu öne sürdüler. Bu, sicim teorisinde gördüğümüz şeye bir miktar benzer ama tamamen farklı bir yaklaşımdır; Smolin ve Rovelli'ye göre bu ilmikler aslında birbirlerine düğümlerle tutturulmuşlardır ve düğümlerin dışında uzay-zaman diye bir şey yoktur.

Bu benim ilgi ile izlediğim yeni bir teori oluşturma girişimidir. Sonunda benim de istediğim bir şeye benzeyeceğini sanıyorum. Bu teoride önemli olan şey, ilmikleri bağlayan "düğümlerin" cinsi ve sayısıdır ve bunlar ilke olarak tamsayı dizileriyle ifade edilebilecek nesnelerdir. Tıpkı uzay-zamandaki gevşek noktalar gibi. Ama bir farkla: Bunlar birbirlerine doğal olarak bağlanmışlardır! Düğüm teorisi modern matematiğin en zor dallarından biridir. Sicim taraftarları, sicim matematiğindeki gezileri sırasında düğüm problemiyle de karşılaşmışlardı. Edward Witten kendisine prestijli Fields Madalyasını kazandıran düğümler hakkında çeşitli yeni matematiksel teoremler keşfetti.

Bu yeni fikirlerin bir gündüz düşünden ve zaman kaybından başka bir şey olmadığını düşünüyorsanız, şunu açıkça belirteyim ki, şimdiye kadar bahsettiğim şeyler yayınlanmış en abartılı girişim ve yaklaşımlar değildir. Bazen cinnet krizi partilerine de dönüşen konferans ve bilimsel toplantılarda, her kafadan bir sesin çıktığı garip bir topluluğa

benzeriz. Bu toplantılarda, bir evrenden diğerine (genellikle solucan delikleriyle) kuantum sıçramaları felsefesi yapanlardan tutun, "kuantum kozmolojisi"nde paralel evrenlerden bahsedenlere ve Doğa sabitleri bizimkilerden farklı ancak bize solucan delikleriyle bağlı olan evrenlerden söz edenlere varıncaya dek pek çok kimse bulunur. Hatta, bir deney tüpü içinde evren yaratılabilir mi sorusunu tartışanlar bile çıkar. Bu tür kavramlar benim boyumu aşar.

XXVIII. Bölüm

En Küçükler Kuralının Egemenliği

Uzay-zamandaki en küçük yapılar, ya "süpersicim"lerden meydana gelmiş gibi düşünülmeli, ya da Ashtekar ile onu izleyenlerin öne sürdükleri gibi birbirlerine bağlanmış ham pamuk parçaları olarak görülmelidir. Belki siz de benim gibi, olası en küçük ölçekteki ana yapının mikroskobik kara delikler olduğuna inanıyorsunuzdur. Her seferinde bir sonuç çıkarmak kaçınılmaz gibi görünüyor: Uzayın en küçük kısmının içine konulabilecek bilgi miktarı sınırlıymış gibi geliyor. Bilgisayarlarla çalışmış herhangi bir kimse, bilginin sıfır ve birlerden meydana ge-

len dizilerle temsil edildiğini bilir. Bir "etkileşim" olduğunda, sıfır ile birlerin yerini, başka sıfır ve birler alır.

Bu, içinde yaşadığımız dünyanın dev bir süper bilgisayardan başka bir şey olmadığı anlamına mı gelir? Kuantum mekaniğinin temellerini anlatan her kitap, size böyle bir şeyin çok basite indirgenmiş olduğunu söyler. Okuduğumuz kuantum mekaniği yasaları, Doğa'da gördüğümüz olayların "mekanik" açıklamasıyla uyuşmaz. Geleceğimiz, geçmişteki belirli, "deterministik" kurallar tarafından tayin edilmez.

Bu ifade Einstein, Podolski ve Rosen'in bulduklarını düşünce deneyi üzerine oturtulmuştur. Çok akıllıca düşünülmüş bu deney hakkında kuantum mekaniğinin öngördüğü sonuçların, deterministik bir teoriyle bağdaştırılması belki de mümkün değildir. Daha sonra, John Bell CERN'de bu savı kesin matematiksel bir teorem haline getirdi. Böylece, gözleyeceğimiz şeyler hakkında, bildiğimiz kuantum mekaniği yasalarının kesin öngörülerde bulunacağı deneyler tasarlayabiliriz. Bell'e göre, bu öngörüyü deterministik herhangi bir teori ile elde etmek imkânsızdır. Bununla birlikte, bir varsayımda bulunmuştu: Hiçbir şey, ışık hızından daha hızlı gidemez.*

Burada da başka bir "karşıt" teorem örneği ile karşı karşıyayız. Bu karşıt teorem, bir teorinin na-

* Daha sonra bu tür deneyler gerçekten yapıldı. Herkesin beklediği gibi, kuantum mekaniği yasaları doğruydu.

sıl kurulmayacağını kesin bir şekilde belirtir. Çünkü kurulacak teori başarılı olmayacaktır.

Fark ettiyseniz, karşıt teoremlere güvenmeyen, aşırı şüpheci bir düşünce yapısına sahibim. Benzer bir teorem bir zamanlar, parçacıkların iç simetrileri ile uzay-zaman simetrilerini birleştirmeye kalkmamamızı söylemişti. Bu yüzden farklı spinli süper-çoklu parçacıkları inşa etmek imkânsız olmalıydı. Peki süpersimetriye ne olacak? Farklı spinleri içeren süper-çoklu yapılar başarılı değil miydi? Eh, bu da teoremin küçük bir kusuru olsun: Bozonlar ile fermiyonların bir araya konulamayacağı varsayımı yapılmıştı. Bazen insan, bir küçük ayrıntıyı çoğu kez atlıyor. Bu yüzden, bu tür teoremler bizi önemli olasılıkları araştırmaktan haksız bir şekilde alıkoyuyor.

John Bell'in teoremi de, çoğu zaman kimsenin dikkat etmediği bir küçük ayrıntı içeriyor. Gördüğüm kadarıyla bundan kurtulmanın bir yolu var: Öyle bir teori yapalım ki, "boş uzay" dediğimiz şey gerçekten boş değil, aksine, curcunalı bir hareketlilik göstersin. Bu konuda meslektaşlarının bana yükleneceklerini biliyorum. "Vakum salınımları" hesaba katılsa bile iyi işleyen ve "kuantum mekaniksel davranışı açıklayan, mekanik bir teori" yapmak hiç de kolay değil. İtiraf edeyim ki, nasıl yapılacağını ben de bilmiyorum. Ama bir çıkış yolu olduğunu tahmin ediyorum.

Bir seferinde, bu görüşlerimi bir yayınımda ihtiyatlı bir şekilde belirtmiştim. Bu yayın, benim fizik-

teki yerleşik görüşlerin dışında ancak Doğa'nın bir bilgi işleme makinesi olduğuna inanan bir grup insanla temas kurmamı sağladı. Bunların bir temsilcisi olan Edward Fredkin, fizikçi değil ama bir bilgisayar uzmanı (hatta dahi bir mucit). Bilgisayar teknolojisinde atmosferdeki hava hareketini, okyanuslardaki balık dağılımını ya da aklınıza gelebilecek herhangi bir şeyi, sanki bunlar sadece sıfır ya da birlerden ibaretmiş gibi anlatan modellerle çalışmak alışılagelmiş bir iştir. Böyle bir bilgisayar modeline hücresel otomaton denir: Sıfır ve birlerden meydana gelmiş sayılar çok sayıda "hücrelere" doldurulur. Sistem çalışmaya başlar başlamaz her bir hücredeki sayılar, bu hücrede daha önce hangi sayıların bulunduğuna ve en yakın komşu hücredeki sayıların ne olduğuna bağlı olarak ve kesin bir şekilde belirtilmiş bir reçeteye uyarak başka sayılarla değiştirilir.

Fredkin, bizim gerçek dünyamızın böyle bir dev hücresel otomatondan başka bir şey olmadığına inanmış durumda. Böyle bir hücresel otomatondaki olaylar bilgisayar ekranından izlenebilir. Güzel bir şekilde renklendirilmiş çizgiler, gözlerimizin önünde hareket eder. Fredkin, bu çizgileri ve onların sistematik hareketlerini inceleyerek şu kanıya vardı: Kuantum mekaniksel olaylar ile kütleçekimi kuvvetine benzer kuvvetler bile bu çizgilerle yeniden yaratılabilir.

Ancak, bu türden iddiaların güçlü kanıtlarla desteklenmesi gerekir. İşte, Fredkin'in bize sağla-

yamadığı şey bu. Çok önemli ve ilginç bir gözlemde bulundu: Otomaton programının tam olarak ne olduğu hiç de önemli değil! Fredkin diyor ki: Programınız yeteri kadar "çok yönlü" ise, herhangi bir otomatonu "taklit etmek" için, başka bir otomaton kullanabilirsiniz. Bir otomaton ile küçük bilgisayarlar kurabilir ve onunla da diğerlerini simüle edebilirsiniz. Fredkin'in bahsettiği şey, bir "evrensel hücresel otomaton"dur. Doğa'yı büyük bir hücresel otomaton olarak temsil eden böyle bir görüşe karşı olmayan pek az fizikçiden biri de benim. Çoğunluk, hücresel otomatonun kuantum mekaniği ile ters düştüğünü iddia etmektedir. Bilgisayarın ürettiği şekilleri izlemeye çalışırsanız, hareketin çok hızlı bir şekilde kaotikleştiğini görürsünüz. Eğer görünüşteki herhangi bir sistematik davranış, daha büyük ölçeklerde (hücrelerin genişliğine bakarak daha büyük) yeniden ortaya çıkarsa, o zaman burada belki de yalnız istatistik yasaları uygulanabilir. Belki de bunlar şu anda "kuantum mekaniği" dediğimiz şeydir.

Bundan sonra "evrensel hücresel otomaton"un "Her Şeyin Teorisi" olduğu iddiasında bulunmak, korkarım ki, bir bebeği içinde yıkandığı banyo suyu ile dışarı fırlatıp atmaya benzer. Temel parçacıkların özellikleri nasıl ortaya çıkartılacak? Yarı karanlık bir ortamda, çok küçükler âlemine gittiğini zannettiğimiz bir yol izliyoruz ama, el yordamıyla gittiğimiz bu yolun daha fazla devam etmeyece-

ğini hissediyoruz. Yolumuzu kaybettik ve araba Büyük Çöl boyunca uzanan otoyolun bir yerinde park edilmiş olarak duruyor.

Doğa bir bilgi işleme makinesi: Bu bir yanılsama mı? Belki de asıl fikir, mevcut kültürümüzün doğal bir ürünü olmasından başka bir şey değil. "Bilgi" modern toplumumuzun temel direğinden başka bir şey mi? Belki de gözümüzün önünü görmemeye başladık. Gelecek bunu gösterecek. Eğer fiziğin son yasası, yalnız sıfır ve birlerden ibaret işlemler ise, insanlık eninde sonunda bunu keşfedecektir. Benim insan zekâsına bu kadar güvenim var.

Böyle olacağını varsayalım. Bu durumda, içinde küçük değişikliklerin, eklemelerin mümkün olmadığı, evrensel ve oldukça basit temel bir yasaya yani kaya gibi sert "Her Şeyin Teorisi"ne bir gün kavuşacağız: Daha önce de belirttiğimiz gibi, bu "holistik" bir yasadır. Maddenin tüm özelikleri, uzay-zamandaki tüm olaylar ve fiziğin bütün diğer yasaları bu evrensel yasadan çıkarılabilmelidir. Bunun fizik üzerinde ve sonuç olarak toplum üzerinde ne etkisi olur?

Aslında, etkisi çok küçük olacaktır. Biri dşında, fiziğin hiçbir dalının HEŞET'i bulmakla bir ilişkisi yoktur. Atomları, molekülleri, malzemeleri, gazları, sıvıları ve maddenin diğer hallerini tanımlamak için, her seferinde matematiğin farklı yöntemleri kullanılır. Bu konuları inceleyen fizikçiler, bu maddelerin yapıtaşlarının uydukları yasaların ilke ola-

rak bilindiğinin farkındadır. Onların ilgilendikleri şey, bu yasaların gözlenen olayları nasıl meydana getirdiği sorunudur. Bu tür bir sorunun cevabını HEŞET'in verebilmesi söz konusu değildir.* Bu nedenle, fiziğin bu dalları oldukları gibi kalacaktır. Hatta temel parçacıklar fiziğinde bile, her düzeyde, eskiden olduğu gibi aynı sorular sorulmaya devam edilecektir. Bir başka deyişle, en küçükler âlemine yönelen yolun son noktası belki de bilinmiş olacak ama biz şu soruyu sormaya devam edeceğiz: Bu yol A ile B arasında tam olarak nasıl ilerler? Bu soruların yanıtları her zamanki gibi zor olacak ve zekice düzenlenmiş deneyler için kurulan dev laboratuvarlara daima gereksinim duyulacak ve bu laboratuvarlar yarar sağlamaya devam edecek. Dolayısıyla bir HEŞET'in fizik üzerindeki etkisi pek az olacaktır.

Topluma etkisi açısından bakıldığında, ilk anda pek bir şey hissedilmeyecek. İnsanlığın, Evren'deki yerini biraz daha iyi, özellikle hiçbir metafizik düşünceye yer bırakmadan anlamaya başlayacağı umudunu ya da hayalini taşıyorum. HEŞET'i bulmak, fizikte benzeri olmayan bir başarı olacak ve böyle bir başarının, bazı diğer bilimlerdeki başarılı işlemlerin kullanımını hızlandıracağı beklenebilir.

* Bundan dolayı, "Her Şeyin Teorisi" yakıştırması oldukça kusurludur. Doğrusunu isterseniz, bundan sorumlu tutulmak istemem; bu ismi ilk defa süper-kütleçekimi ve süpersicim taraftarları kullanmaya başlayıp, yaygınlaştırdılar ve daha sonra popüler basın bunu kapıp, yeri geldiğinde onların aleyhine kullanmaya başladı.

Yanlış anlaşılan pek çok örneklerini gördüğümüz için, bunu biraz çekinerek söylüyorum. Psikologlar ya da sosyologlar enerji ya da entropiden söz etmeye başlarlarsa, kendi alanlarında böyle kavramların fiziktekine benzer yasalara uyduklarını haksız bir şekilde iddia edebilirler. Daha da kötüsü, bu kavramlar fizikte alışageldiğimiz kesin ifadelerle benzer şekilde tanımlanabilir.

Her şeyin teorisinden ne beklendiği sorusuna en gerçekçi yanıtı, belki de Richard Feynman vermişti. Feynman, her şeyin teorisi diye bir şeyin olabileceğine inanmadığını söylemiş, ama şunu da eklemişti: "Cesur ve profesyonel dağcılar bir dağın zirvesine ulaştığı zaman ne oluyorsa, ona benzer bir şey olacağını tahmin ediyorum". Bu dağcılar orada, bozulmamış Doğa'nın eşsiz güzelliğinden zevk alan belki de son kişiler ve zirveye ulaşılabileceğini kanıtlayan ilk kişiler olacaklardır. Önce kolay yollar yapılacak ve arkasından teleferik ve derken turistler gelecektir. Bu yeni "kâşifler", zirvedeki yeni bitmiş lüks lokantanın rahatlığı içinde dağ hakkındaki fikirlerini söyleyeceklerdir. Dağcı, dağın tepesindeki çöplük yüzünden kendi keşfini tanımakta zorluk çekecektir.

Belki de hiç kimse, buradan Evren'deki en küçük yapıya giden yol hakkında tam bir görüşe sahip olamayacak. İnsanlık, Evren hakkında tam bir görüşe sahip oluncaya kadar belki de çok zaman geçecek. Belki de aranan yol vardır ama sınırlı ze-

kâmız yüzünden onu hiçbir zaman bulamayacağız. Daha önce söylediğim gibi, bu son görüşe şans tanımıyorum.

En küçük yapıya giden yol sonsuz uzunlukta olabilir mi? "Sonsuz küçük yapıların olmayacağı düşünülebilir mi?" Tarihte fiziğin sonunun geldiği defalarca düşünüldü. Bunun yanlış olduğu her zaman ortaya çıkarıldığı için, temel, evrensel bir teorinin hiçbir zaman mümkün olmayacağı genel olarak kabul edildi. Böyle bir "sihirli taşın" ulaşabilecek bir yerde olduğunu düşünmek genellikle yararsızdır.

Önce şu sihirli taş fikrinden uzaklaşalım. Bir evrensel teori, tüm doğal olayların açıklanabileceğini söyleyemez. Bildiğimizin tamamı, tüm olayların uyduğu oldukça formel (ama kesin) denklemler serisidir. Bu olayların açıklamasına ilişkin sorular, şu anda matematiksel, teknik-hesap soruları haline gelmiş durumda. Bu tür sorular hiçbir şekilde daha basite indirgenemeyecektir. Soruların çoğu zaten böyle olduğu için daha da basit bir şekle dönüşmeyecektir.

Şu izlenimi de ortadan kaldırmayı istiyorum: Doğa'nın kesin yasaları dünyamızı öylesine "küçültecek" ki, "heyecan", "özgür irade", "yaşam" ya da "korku" gibi şeylere ve Evren'imizdeki eşsiz yapılara duyulan saygıya yer kalmayacaktır. Tüm Evren'imizin büyüklüğü 10^{61} Planck mesafesi cinsinden ifade edilmelidir. Hacmi ise bu sayının üçüncü

kuvveti olan 10^{183}'tür. Yaşı, yaklaşık olarak 10^{61} kere Planck zamanıdır. Bu sayı elli dört hane rakam içerir ve ilk bakışta küçükmüş gibi görülse de aslında bu öylesine büyük bir sayıdır ki, insanın bildiği ve bilmediği harika özelliklerin hepsine yeteri kadar yer vardır.

"Her Şeyin Teorisine" karşı yegâne direnme dinsel kökenli olabilir. O zaman tarihi* bir kere daha şu şekilde okuyalım: İnsanlık daha önce imkânsız gibi görünen şeyleri birbiri arkasından keşfetmeye devam ediyor. Örneğin bir zamanlar, hastalıklar, haklarında bir şeylerin yapılabileceği keşfedilinceye kadar Tanrı'nın bir gazabı olarak düşünülüyordu. Büyük keşiflerin yapıldığı çağlarda, insanlar, okyanusların, kıtaların ve uygarlıkların hâlâ keşfedileceği düşünü görmeye devam ediyordu ve yerküremizin her metrekaresinin ayrıntılarıyla bilineceği bir zamanın geleceği akla yatkın görünmüyordu. Bu nedenle, gökcisimlerinin hareketlerinin, bu cisimlerin gerçekten Dünya'mızla aynı maddeden yapıldığı iyice anlaşılıncaya kadar, Tanrı'ların (ya da tek bir Tanrı'nın) etki alanında olduğu düşünülmüştü. Benzer biçimde, tüm doğal olayların evrensel yasası bugün de kâhinlerin ellerindedir. Ne kadar süre? Kim bilebilir?

* Daima hatırlayınız: Kuşkusuz tarih kendisini tekrar edecektir, ama önceden tahmin etmek hiçbir zaman mümkün değildir.

Sözlük

Acayiplik (S) Hadronlar için tanımlanmış kuantum sayısı. Çarpışma öncesi toplamı, çarpışma sonrası toplamıyla aynıdır. Aynı zamanda "acayip" antikuark sayısı eksi acayip kuark sayısına eşit.

Açısal momentum Bir ya da bir grup parçacığın dönme hareket miktarı. $h/2\pi$ biriminin (h, Planck sabitidir) tam sayı ya da tam sayı artı yarım katları cinsinden ölçülür.

Alan Uzay ve zamanda nerede ölçüldüğüne bağlı büyüklük. Örnek olarak hava basıncı ve sıcaklık dağılımı verilebilir. Suyun yüksekliği de bir alan olarak düşünülebilir. Bir alandaki salınımlara "dalga" denir.

Alan denklemleri Bir alanın zamana bağımlılığını belirleyen yasalar.

Alt Bazen "güzellik" de denen ve kaç tane "alt kuark" bulunduğunu belirten kuantum sayısı.

Angstrom 10^{-10} metreye eşit bir uzunluk birimi.

Antiparçacık Verilen bir parçacık türünü tamamlayan parçacık türü. Bir antiparçacık karşılık gelen parçacıkla aynı spin ve kütleye sahiptir. Ancak elektrik yükü ve S, L ve B gibi kuantum sayıları zıttır.

Atom Proton ve nötronlardan yapılmış bir çekirdeği bulunan ve çekirdek etrafında dönen elektronlardan oluşan kimyasal elementlerin yapıtaşı.

Ayar alanı Bir "ayar bozonu" alanı; elektromanyetik kuvvete benzer bir kuvveti taşıyan spin 1 parçacığı. Burada ayar değişmezliğinin önemli bir rolü vardır.

Ayar değişmezliği Her cinsten ayar dönüşümü altında herhangi bir değişmenin olmayışı.

Ayar dönüşümü Anlatmak istediğimiz fiziksel gözlenebilir olayları etkilemeyen bazı durumların anlatımındaki değişim.

Ayna simetrisi (P) Bir fiziksel olayın ya da bir parçacığın ayna görüntüsüne benzemesi.

B Bakınız baryon sayısı.

Bağlanma sabiti Bir kuvvetin ya da etkileşimin şiddetini belirleyen Doğa sabiti.

Baryon Güçlü kuvveti hisseden ve tam sayı artı yarım spinli parçacıklara verilen ortak ad. Üç kuarktan oluşurlar.

Baryon sayısı (B) Baryon sayısı eksi antibaryon sayısı. Aynı zamanda kuark sayısı eksi antikuark sayısı bölü üç.

Bose yoğunlaşması Çok sayıda bozonun birbirlerini çekmeleri durumunda oluşur ve bunu yaparken her birinin serbest haldeki enerjilerinin toplamından daha az bir toplam enerjiye ulaşır.

Bozon Tam sayı spinli parçacıklara verilen ortak ad.

C Bakınız yük eşlenikliği.

CERN İsviçre'de Cenevre yakınlarında Avrupa çekirdek-altı araştırma merkezi.

Coulomb kuvveti Elektrik yükleri arasındaki statik kuvvet. Yüklerin çarpımıyla doğru, aralarındaki uzaklığın karesi ile ters orantılıdır.

Çekirdek Proton ve nötronlardan meydana gelmiş atomun merkezi kısmı.

Çıplak parçacık Etrafını çeviren parçacık bulutunun bulunmadığı noktasal parçacık.

Çoklu Özellikleri birbirine benzer parçacık topluluğu. Örneğin, proton ile nötron bir ikili (dublet) ve üç pion bir üçlü (triplet) meydana getirir.

Dirac denizi Dirac'ın orijinal teorisine göre boş uzayı dolduran negatif enerjili parçacıkların sonsuz kaynağı. Bu parçacıkların kendileri gözlenemez. Ancak bunlardan biri eksik olduğunda bu bir antiparçacık gibi gözlenir.

Durgun kütle Hareketsiz bir parçacığın kütlesi. Bir parçacık ışık hızına yakın bir hızla hareket ederse, kütlesinin arttığı görülür.

Düğüm teorisi Bağ ve düğümlerin matematiksel teorisi. Sicimin kapalı bir parçası değişik türden düğümlere sahiptir; çeşitli kapalı sicimler birbirlerine bağlarla bağlanırlar. Bir düğüm ya da bağın diğer düğüm ya da bağdan farklı olması için, sicimlerin hareket ettirilmesi ya da gerilmesi suretiyle birinin diğerine dönüştürülmesi gerekir.

Elektrik alanı Elektrik yükünün yarattığı kuvvet alanı. Elektrik yüklü parçacıkların hareketini etkiler.

Elektrik yükü Elektromanyetik kuvvetten etkilenen parçacığın bir özelliği.

Elektromanyetik dalgalar Maxwell denklemlerine göre birçok ışınım çeşidini tanımlayan manyetik ve elektrik alan çizgilerinin görünümü.

Elektron Tüm atomlarda bol miktarda bulunan hafif, negatif elektrik yüklü parçacık. Elektron, yüklü leptonların en hafifidir.

Enerji (durgun kütlesi M, hızı v olan bir parçacık için) "kinetik" kısım (hareket enerjisi) yaklaşık olarak $\frac{1}{2}$ Mv^2'ye eşit, durgun kütleye karşılık gelen kısım Mc^2'ye eşit ve alanların bulunmasından ileri gelen potansiyel enerji.

Eta (η) Bir kuark ile antikuarktan oluşan, spini 0 mezon. Güçlü kuvvet, bozunmasına neden olsa da oldukça kararlıdır.

Fermi 10^{-15} metreye eşit uzunluk birimi.

Fermiyon Spinleri yarım-tam sayı, yani doğal birimde $\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$,... olan tüm parçacıklara verilen ortak ad.

Feynman kuralları Parçacık yörüngelerinin diyagramlarla gösterildiği hesap yöntemi.

Fonon Sesin enerji kuantumu. Düşük sıcaklıklarda katı maddelerle ilişkili.

Foton Spini 1 olan, elektromagnetik ışınımın (ışık) enerji kuantumu.

GIM mekanizması Düşük enerjili hadronlarda bir Z^0 yaratılmasını içeren zayıf etkileşim süreçlerinin bulunmayışını açıklamak için, "tılsım" adlı dördüncü bir kuarkın varlığını ileri süren ve ilk kez Glashow, Iliopoulos ile Maiani tarafından ortaya atılan fikir.

Girişim Özellikle kuantum mekaniğindeki dalgalar ile titreşimlerde görülen olay. Bazı süreçler değişik hatlar boyunca meydana gelebiliyorsa, çeşitli olasılıklar ya birbirlerini güçlendirir (pozitif girişim) ya da birbirlerini yok ederler (negatif girişim).

Gluon Güçlü kuvvetin enerji kuantumu; kuarklar arasında güçlü kuvvetin geçişini sağlayan spin 1 değerine sahip bir parçacık. Sekiz çeşit renkli durumu vardır.

Görelilik (genel) 1915'de Einstein tarafından bulunan, kütleçekimi kuvvetini anlamamıza yarayan, eğri uzay ve zamanın ayrıntılı geometrik tasviri.

Görelilik (özel) Einstein tarafından 1905'de bulunan ve ışık hızının tüm gözlemcilere göre aynı olduğunu gösteren uzay ve zamanın geometrik teorisi.

Gravitino Süper-kütleçekimi teorisinin ayar parçacığı; $\frac{3}{2}$ spini.

Graviton Kütleçekimi dalgalarının enerji kuantası. Kütleçekimi kuvvetini taşır ve spini 2'dir.

Güçlü kuvvet Hadronlar arasında etki eden ve onlara kendi şekillerini veren kuvvet.

Hadron Güçlü kuvvetten etkilenen baryon ve mezonların da dahil olduğu parçacıklara verilen ortak ad.

HEŞET Bakınız TOE.

Higgs mekanizması (Higgs-Kibble mekanizması) Sonunda, tüm ya da tüme yakın parçacıkların kütle kazandığı boş uzayın simetrik olmayan yapısı. XI. Bölüm'e bakın.

Higgs parçacığı Higgs mekanizmasına neden olan, boş uzayı büyük miktarlarda dolduran, henüz gözlenmemiş, spini 0 olan bozon.

Izospin (I_3) Çarpışma olaylarında korunan kuantum sayısı.

J/ψ 1974'de keşfedilen tılsımlı c kuarkı ile birlikte antiparçacığı c 'yi ihtiva eden ilk hadronik parçacık.

Jet Çoğunlukla çok yüksek enerji çarpışma olaylarında ortaya çıkan, aynı doğrultuda hareket eden birkaç pion ve nükleondan meydana gelen küçük bulut. Yüksek enerjili bir kuark daima bir jet oluşturur.

Kaluza-Klein teorisi Sıkı bir şekilde içine kapanmış uzay ve zamanın yeni boyutlarını anlatan teori.

Kaon Acayip bir *s* kuarkını ya da antikuarkını içeren en hafif mezon. Elektrik yüklü ya da yüksüz olabilir.

Koordinatlar Uzayda bir noktanın konumunu ya da bir vektörün yönü ve büyüklüğünü belirleyen sayılar.

Kopenhag yorumu Kuantum mekaniğini olasılık dağılımları üzerine oturtan görüş. Parçacık ve dalgalar birbirlerinin "tamamlayıcısıdırlar".

Korunum yasası Enerji ya da elektrik yükü gibi bazı büyüklüklerin tüm toplamlarının herhangi bir etkileşim sürecinde değişmeyeceğini söyleyen fizik yasası.

Kuantum elektrodinamiği Elektronlarla fotonlar arasındaki elektromanyetik etkileşmeyi anlatan teori.

Kuantum mekaniği Olasılıkların temel bir rol oynadığı, küçük ve hafif parçacıkların hareketini belirleyen teori. Parçacıkların enerjisi, spini ve diğer bazı özellikleri "kuantize" olur.

Kuantum renkdinamiği SU(3) diye bilinen matematiksel "grup" üzerine oturtulmuş, bir hadron içindeki kuarklar arası güçlü "renk" kuvvetlerini anlatan teori.

Kuark Hadronların yapıtaşları. Kuark, spini olan bir fermiyondur. Üçlü gruplar halinde ya da kuark-antikuark durumunda bulunurlar. Altı tür kuark olduğu bilinmektedir: *u, d, c, s, t, b.*

Kütle Bir parçacığın hareket halinde iken koruduğu büyüklük. Gram (g), kilogram (kg) ya da MeV/c^2 x 1 MeV/c^2 = 1,78268 x 10^{-27} gram) şeklinde ifade edilebilir.

Kütleçekimi kuvveti Ağır cisimlerin birbirlerini çektiği kuvvet. Cisimlerin kütlelerinin çarpımı ile doğru, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılıdır.

L Bakınız lepton sayısı.

Lepton Güçlü kuvvetten etkilenmeyen ve spinleri $\frac{1}{2}$ olan parçacıkların genel adı.

Lepton sayısı (L) Lepton sayısı eksi antilepton sayısı.

Manyetik alan Çok hızlı hareket eden elektrik yüklerinin neden olduğu kuvvet alanı. Hızlı hareket eden diğer elektrik yüklü parçacıkların yörüngelerini etkiler.

Manyetik dipol momenti Elektrik yüklü bir parçacığın bir mıknatıs gibi davranmasını belirleyen bir büyüklük. Hafif parçacıklar, örneğin elektronlar daha ağır parçacıklardan, örneğin protonlardan çok daha güçlü bir mıknatıs gibi davranırlar.

Manyetik tekkutup Manyetik bir "güney" yüküne bağlanmamış manyetik bir kuzey yükü taşıyan parçacık ya da tersi olay.

Maxwell teorisi Elektrik ve manyetik alanların sağladığı denklemler.

Mezon Güçlü kuvveti algılayan tam sayı spinli parçacık. Bir kuark ile bir antikuarkdan meydana gelir.

Mikron 10^{-6} metreye eşit uzunluk birimi.

Molekül Kimyasal bir maddenin en küçük birimi. Çeşitli atomlardan meydana gelmiştir.

Momentum Kütle çarpı hız.

Müon Elektrondan yaklaşık 200 defa daha ağır, spinli, negatif ya da pozitif yüklü parçacık. Elektronun da dahil olduğu lepton ailesine aittir.

Nötrino $\frac{1}{2}$ spinli, elektrik yükü olmayan, muhtemelen kütlesiz, son derece hafif parçacık. Güçlü kuvveti hissetmediği için normal madde ile etkileşmesi son derece az. Lepton ailesinin bir üyesi.

Nükleon Proton, nötron ve bu parçacıkların ağır uyarılmış durumlarına karşılık gelen rezonansların ortak adı.

Olasılık Bir şeyin olabilmesini belirten sıfır ile bir arasında bir sayı.

Parite (P) Bakınız ayna simetrisi.

Pauli dışarlama ilkesi Bu ilkeye göre iki fermiyon aynı noktada bulunamaz ya da daha genel bir ifadeyle birbirlerinden özellikleri farklı olmadığı (örneğin farklı spin yönü ya da farklı renk) sürece aynı kuantum durumunda bulunamazlar. Fermiyonlar birbirlerinden uzak durmak zorundadırlar.

PC simetrisi Bir parçacığın, antiparçacığının (C) ayna görüntüsüne (P) benzemesi.

Pion Kütlesi elektron kütlesi ile proton kütlesi arasında olan parçacık. Hadronlar arasındaki güçlü kuvvetin taşıyıcısı. Spini 0, elektrik yüklü veya yüksüz olabilir.

Planck ölçeği $1{,}6 \times 10^{-33}$ santimetreye eşit uzunluk, 22 mikrograma eşit kütle ve $5{,}4 \times 10^{-44}$ saniyeye eşit zaman birimleri. Bu birimlerde ifade edildiğinde, ışık hızı c ve Newton kütleçekim sabiti G bire ve Planck sabiti h ise 2π'ye eşittir.

Planck sabiti Fiziksel bir sistemin ν frekansını, E enerji kuantumuna bağlayan Doğa sabiti: $E = h\nu$ değeri $h = 6{,}6075 \times 10^{-34}$ jul saniye.

Pozitron Elektronun antiparçacığı.

Proton Atom çekirdeğinin pozitif elektrik yüklü yapıtaşı. En hafif baryon ve bu yüzden tek kararlı parçacık.

Renk kuvveti Kuarkların birbirlerini çektiği kuvvet.

Renormalizasyon Gerçekten ölçülmüş sayıların yeniden elde edilebilmesi için Doğa sabitlerini yeniden tanımlayan işlem. Çoğunlukla bir teoriye konulması gereken başlangıçtaki sayıların sonsuz olduğunu ima eder.

Rezonans Çok kararsız parçacık. Böyle bir parçacık herhangi bir etkileşimde geçici olarak yaratılırsa, belirli bir enerjideki çarpışma sayısı bir zirveye ulaşır. Bu bir rezonans eğrisine benzer.

Rho parçacığı (ρ) Spini 1 ve kütlesi 770 MeV olan kararsız mezon. Elektrik yüklü ya da yüksüz olabilir.

S Bakınız acayiplik.

Sekiz katlı yol Kuark teorisinde mezon ve baryonların sekizli ve onlu demetler şeklinde sınıflandırılmasını anlatan matematiksel yöntem.

Sicim teorisi Parçacıkları küçük sicim parçaları olarak gösterir -ya uçları açık ya da kapalı halka şeklinde olurlar. Değişik parçacık türleri bir sicimin farklı titreşim kiplerine ve dönmelerine karşılık gelir.

Sigma (σ) modeli Nükleonlar ile pionlar arasındaki etkileşimi anlatmak için ortaya atılan bir model. Burada pionlara ek olarak sigma parçacığı da bulunur. Daha sonra diğer sistemleri anlatmak için de kullanılmıştır.

S-matrisi Bir çarpışma ("saçılma") olayından sonra parçacık dağılım olasılığını belirten sayılar ya da formül.

Spin Bir parçacığın dönme hareket miktarı. Daha kesin olarak söylenirse, açısal momentum. $h/2\pi$'nin (h Planck sabiti) katları olarak ifade edildiğinde değeri ya tam sayı (0, 1, 2,...) ya da yarım-tam sayı ($\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$,...) olabilir.

Tau (τ) Elektron ve müona benzer. Ancak onlardan daha ağırdır.

Temel parçacıklar nesli Standart Modelde her bir temel fermiyon üç nesilden birine aittir. Üç nesil kütleleri dışında birbirlerinin birer kopyasıdır.

Tılsım Bir cisimde kaç tane "tılsımlı kuark" bulunduğunu belirten kuantum sayısı.

TOE "Her Şeyin Teorisi". İlke olarak sonsuz hassasiyetle uzay-zamanı, maddeyi ve tüm hareketleri yöneten kuvvetleri tanımlayan denklem takımı. Bu kitabın yazarı da dahil, birçok fizikçi bu tür denklemlerin bulunacağına inansa da, kısa bir süre içerisinde çözülebileceği sanılmıyor. Bu yüzden, bu denklemler için kullanılan her şeyin teorisi adı, aslında gereksiz.

Üst "Hakikat" da denen, altıncı ve bilinen en ağır kuark. Alt kuarkın eşi olan üst kuark, Chicago yakınlarında, FERMILAB'da deneysel olarak yakın zamanda bulundu.

Vakum Boş uzay.

Vakum polarizasyonu Boş uzayın, yakınında bulunan bir parçacığın şiddetli alanının etkisi sonucunda özelliklerinin değişmesi. Alanlar, Dirac denizindeki parçacık ve antiparçacıklara etki eder.

Van der Waals kuvveti Atom ve moleküller arasında, elektrik alanlarının kuantum mekaniksel düzensizliklerinin neden olduğu evrensel çekim kuvveti.

Vektör Uzayda bir yönü ve boyutu bulunan fiziksel büyüklük. Bir sayı dizisi (koordinatlar) olarak tanımlanabilir.

Vektör potansiyel alanı İlk kez elektrik ve manyetik alanları tasvir etmek üzere elektrodinamik teoride tanımlanan yardımcı alan. Bileşenleri (biri

elektrik potansiyeli) ancak dolaylı bir şekilde gözlenebilir.

W parçacığı "Ara vektör bozonu" da denen elektrik yüklü zayıf kuvvet taşıyıcısı.

WIMP Zayıf etkileşen ağır parçacık. Henüz bilinmeyen bir parçacık cinsi olup, galaksiler arasında büyük miktarlarda olduğu ve orada kütleçekimi alanları yarattığı sanılmaktadır.

Yang-Mills alanı Bakınız ayar alanı.

Yang-Mills teorisi Elektromanyetizmanın Maxwell teorisinin genelleştirilmesi. En az üç cins elektrik ve manyetik alan ve bir ayar ilkesi vardır.

Yük eşlenikliği (C) Bir parçacığı, antiparçacığı (elektrik yükü zıt) ile değiştirme.

Z^0 parçacığı Zayıf etkileşimin elektrik yükü bulunmayan taşıyıcısı. Tüm zayıf "yüksüz akım" etkileşimlerine neden olur.

Zayıf kuvvet Bilinen tüm parçacıklar arasında etki eden kuvvet. Çok zayıf ve çok kısa menzilli.

Dizin

Alan, 14, 128, 162
Alt (güzellik) kuark, 195
Anderson, C.D., 87
Anomali, 197, 213-226
Antikuark, 159, 163, 263, 264
Antiparçacık, 41, 46, 220, 222
Ashtekar, A., 316
Asimptotik özgürlük, 157, 169, 185
Atom, 7
Atom çekirdeği, 27

Bardeen J., 123
Bardeen W.A., 218
Baryon, 47, 49, 80, 162
Baryon sayısı, 49
Belavin A.A., 223
Bell J.S., 25, 100, 109, 320
Bjorken J.D., 99, 153
Bohr, N., 16, 17
Bose yoğunlaşması, 123, 144
Bozon, 45, 124
Broglie, L.V. de, 15
Brout, R., 125

Cabibbo, N., 110
Cargèse, 136, 166
Casimir, H.B.G., 7
CERN, 43, 99, 149, 203
Chandrasekhar, 305
Charmonyum, 186
Christenson, J., 70
Coleman, S., 315
Cooper çifti, 123, 256
Cooper, L.N., 123
Coulomb kuvveti, 12
Crease, R.P., 111
Cronin, J., 71, 72

Delta rezonansı (Δ), 61, 76, 77
DeWitt, B.S., 114, 139, 275
Dicke, R., 240
Dirac alanı, 86
Dirac, P.A.M., 20, 85, 87, 175, 220, 259
Dyson, 87

Einstein, A., 15, 21, 33, 34
Elektromanyetik kuvvet, 32, 84, 282
Elektron, 11, 16, 47, 208, 263
Englert, F., 123
Eötvös, R. von, 240
Eta (η) parçacığı, 40, 190, 220
Eta problemi, 222, 223

Faddeev, L.D., 115, 139, 275
Faissner, H., 149
Fermi, E., 41, 96
Fermilab, 203
Fermiyon, 45, 143
Ferrara, S., 246
Feynman, R.P., 52, 77, 87, 96, 112, 115, 153, 275, 290, 326
Fitch, V., 71, 72
Fitzgerald, G.F., 29
Foton, 32, 39, 40
Fradkin, E.S., 275
Fredkin, E., 322
Freedman, D.Z., 248
Fritzsch, H., 158

Gargamelle, 148
Gatto, R., 244
Gell-Mann, M., 44, 52, 53, 75, 76, 96, 109, 136, 158
Genel görelilik teorisi, 34, 302
Genişletilmiş teknik-renk, 257
Georgi, H., 175, 262
Georgi-Glashow modeli, 176
GIM mekanizması, 99, 146, 150, 189, 195
Glashow, S.L., 99, 146, 175, 195, 262
Glumdalclitch, 3
Gluon, 53, 187
Goldstone parçacığı (bozon), 128, 137, 254
Goldstone teoremi, 128
Goldstone, J., 128
Goudsmit, S., 45

Graviton, 209, 239, 294
Gravitino, 249, 274
Gulliver, 2, 228, 243, 277
Güçlü kuvvet, 49, 151

Hadron, 47, 49, 152
Hawking, S.W., 277, 306, 310
Heisenberg, W., 20
Her Şeyin Teorisi (HEŞET), 24, 294, 324
Hey, A.J.G., IV
Higgs parçacığı, 125, 204, 208, 266
Higgs, F.W., 125
Higgs-Kibble mekanizması, 125-133, 159, 256
Hulse, R., 303

Iliopoulos, J., 99, 146, 157, 195

İkizler paradoksu, 30
İnce-ayar problemi, 229
İnstanton, 225
izospin (I_3), 41, 53

J/Ψ (çingene) parçacığı, 181-192
Jarlskog, C., 69
Joyce, J., 78

Kabarcık odası, 56
Kaluza, T., 282
Kampen N.G. van., V, 93
Kaon, 40, 64
Kibble, T.W.B., 127
$K_{Kısa}$, 40, 64
Klein, O., 282, 291
Koba, Z., 161
Kobayashi, M., 196
Kopenhag yorumu, 17
Korunum yasası, 94
Kramers H.A., 93
Kronig, R., 93
Ksi (Ξ) parçacığı, 41
Kuantum elektrodinamiği, 85, 106
Kuantum kromodinamiği, 166, 189
Kuantum mekaniği, 12-25, 319-322
Kuarklar, 75-76, 79, 158-159, 162-163, 208, 255, 263

Kuinks, 255
K_{Uzun}, 40, 64, 131, 146, 193, 205
Kütleçekimi kuvveti, 33, 106, 269, 294, 302, 311

Lambda (λ) parçacığı, 41, 198
Lederman, L.M., IV
Lee, B.W., 138, 139, 176
Lee, T.D., 68
LEP, 202, 205, 241
Lepton, 40, 47, 132, 199, 208
Les Houches, 136
Lévy, M., 110, 136
LGM, 304
LHC, 257
Lignac, W.P.J., V
Lorentz, H.A., 29

Maiani, L., 99, 146, 195
Mandelstam, S, 115, 139, 275
Mann, C.C., 111
Manyetik çift-kutup momenti, 85
Marshak, R., 52, 96
Maskawa, K., 196
Maxwell, J.C., 7, 32, 84
Meer, S. van der, 201
Mendeleyev, D.I., 75
Mezon, 40, 42, 47, 49, 79
Mikheyev, S., 238
Mills, R.L., 106
Mize, R., V
Musset, P., 148
Müon (μ), 40, 44, 95
Nambu, Y., 158
Newton, I., 16
Nielsen, H.B., 161, 172
Nieuwenhuizen, P. van, 246
Noether, E., 94
Nötrino, 40, 43, 52, 208, 233-239, 247, 264
Nötron, 38, 41

Okun, L., 175
Olesen, P., 172
Omega-eksi (Ω^-) parçacığı, 40, 76

Pais, A., 111, 44
Pauli dışarlama ilkesi, 46, 124, 158
PC simetrisi, 71, 193, 205
PCT, 72
Perl, M.L., 199
Pion, 39, 40, 213-220
Planck, M., 13
Planck kütlesi, 271, 299
Planck mesafesi, 271, 279, 301
Podolsky, B., 25
Politzer, H.D., 157
Polyakov, A.M., 175, 223
Popov, V.N., 115, 139, 275
Pozitron, 87

Quinn, H.R., 262

Rabi, I.I., 43
Renk manyetik tekkutup, 179
Rezonans, 60, 152
Rho-rezonansı (ρ), 108, 140
Richter, B., 183
Rosen, N., 25
Rovelli, C., 317

Salam, A., 106, 129, 260
Schramm, D.N., IV
Schrieffer, J.R., 123
Schrödinger, E., 16, 20
Schwartz, A.S., 223
Schwarz, J.M., 294
Schwinger, J., 85, 87
Sekiz Katlı Yol, 76
Shaw, R., 106
Sicim teorisi, 163, 288-300, 314
Sigma (Σ) parçacığı, 40
Sigma (σ) parçacığı, 137, 256
Simetri, 94, 127, 246, 254
Sis odası, 42
SLAC, 182
Slavnov, A.A., 275
Smirnov, A., 238
Smolin, L., 316
Spin, 45, 143

Steinberger, J., 215
Sterman, G.,168
Sudarshan, G., 52, 96
Süpernova, 235
Süpersimetri, 246, 251, 295, 321
Swift, J., 2, 252
Symanzik, K., 138-142, 156

Tau (τ) parçacığı, 197, 225
Taylor, J., 303
Teknik-renk, 256
Ting, S., 181
Tomonaga, S.I., 87
Toonder, M., 255
Turlay, R., 71
Tyupkin, Y.S., 223

Uhlenbeck, G., 45
Upsilon (γ) parçacığı, 196, 198
Utretcht, 38, 99, 139

Üst ('hakikat') kuark, 196

Vakum polarizasyonu, 88
Veltman, M.J.G., V, 99, 109, 111, 189, 214, 276
Veneziano, formülü, 152, 160, 162, 287
Veneziano, G., 152, 160

W parçacığı, 52, 111, 130, 200
Waals, J.D. van der, 6
Walters, P., IV
Ward. J.C., 129
Weinberg, S, 130, 168, 200, 260, 261
Wess, J., 246
Wheeler, J.A., 306
WIMP, 242, 258
Wilczek, F.,157
Wit B. de, 248
Witten, E., 293, 317
Wolfenstein, L., 238

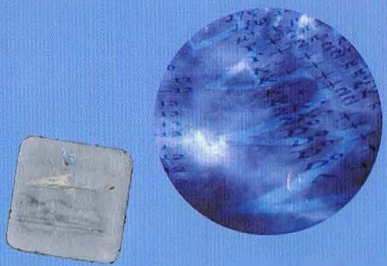
X bozonu, 265

Yang, C.N., 68, 106

Yang-Mills alanı, 107, 145, 214, 224
Yarı-ömür, 55
Yukawa, H., 39, 43

Z^0 parçacığı, 52, 132, 147, 199-203, 205, 208, 241
Zayıf kuvvet, 52
Zichichi, A., 197
Zumino, B., 172, 246
Zweig, G., 80

"Niyetim son yirmi beş yılda maddenin en küçük tanecikleri üzerine yapılmış olan araştırmaları bir öykü diliyle anlatmak. Bu yirmi beş yılda anladım ki, Doğa insanlığın başvurduğu bir zekâ testidir; oynamamız için yapılmış bir bozyaptır. Sık sık, elimizdeki parçalara çok iyi uyan, büyük ya da küçük, yeni parçalara rastlarız. Bu durumlarda hissettiğim coşkuyu, beni dinlemek isteyen herkesle paylaşmak istiyorum..." 1999'da Nobel Fizik Ödülü'nü alan Gerard 't Hooft, *Maddenin Son Yapıtaşları*'nda, fizik tarihinin en yaratıcı ve heyecan verici dönemlerinden birini anlatırken, bir yandan da parçacık fiziğinin temel kavram ve ilkelerini ele alıyor.



ISBN 975-403-193-2



Fiyatı: 2.750.000 TL (KDV DAHİL)

Basılı fiyatından farklı satılamaz