GAVIN HESKETH

Atomaltı Parçacıkların Şaşırtıcı Dünyası

Çeviren: Ilgın Yıldız

Fermiyonlar ve Bozonlar

Standart Model ve Ötesi

SAY

GAVIN HESKETH

Atomaltı Parçacıkların Şaşırtıcı Dünyası

SAY

Atomaltı Parçacıkların Şaşırtıcı Dünyası

Gavin Hesketh

Deneysel parçacık fizikçisidir. Royal Society'nin desteğiyle, University College London ve İsviçre'deki CERN'de çalışmaktadır. Şu an, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda yürütülen büyük projelerden biri olan ATLAS deneyini yapan ekip içerisinde yer almakta, dolayısıyla da evreni daha iyi anlamayı hedefleyen araştırmalara katılmaktadır. BBC ve Radio 5 gibi televizyon ve radyo kanallarında yayınlanan programlara sıkça davet edilmekte ve parçacık fiziğinde kaydedilen en son gelişmeler hakkında kitleleri aydınlatmaktadır.

Ilgın Yıldız

1980 yılında Ankara'da doğdu. Lisans eğitimini Halkla İlişkiler, lisansüstü eğitimini İngiliz Edebiyatı, ardından da Yazarlık ve Edebiyat bölümlerinde tamamladı. Öykü, çeviri, röportaj ve makaleleri 2003'ten itibaren çeşitli dergi ve gazetelerde yer buldu. 2014'ten beri kitap çevirmenliği yapıyor. Melbourne, Avustralya'da yaşıyor.

GAVIN HESKETH

Atomaltı Parçacıkların Şaşırtıcı Dünyası

Fermiyonlar ve Bozonlar
Standart Model ve Ötesi

İngilizceden çeviren:
Ilgın Yıldız

say

Say Yayınları
Popüler Bilim

Atomaltı Parçacıkların Şaşırtıcı Dünyası: Fermiyonlar ve Bozonlar, Standart Model ve Ötesi / Gavin Hesketh
Özgün adı: *The Particle Zoo: The Search for the Fundamental Nature of Reality*

© 2016 Gavin Hesketh
Bu kitap ilk kez 2016 yılında İngilizce olarak Büyük Britanya'da yayımlanmıştır.

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

ISBN 978-605-02-0664-7
Sertifika no: 10962

İngilizceden çeviren: Ilgın Yıldız
Yayın koordinatörü: Levent Çeviker
Editör: Sinan Köseoğlu
Son okuma: Eda Okuyucu
Sayfa düzeni: Mehmet İlhan Kaya
Kapak tasarımı: Artemis İren

Baskı: Lord Matbaacılık ve Kâğıtçılık
Topkapı-İstanbul
Tel.: (0212) 674 93 54
Matbaa sertifika no: 22858

1. baskı: Say Yayınları, 2018

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

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

İÇİNDEKİLER

Yazarın Notu ve Teşekkür 7
Parçacık Tablosu 11

1 Gerçekliğin Temel Doğası 13
2 Parçacık Bahçesinde Bir Gezinti 25
3 Maddenin Kalbine Yolculuk 51
4 Aldatıcı Kuark 79
5 Kuvvet Zayıflıyor 99
6 Higgs Bozonu 117
7 En Büyük Deney 141
8 Her Nötrinonun Parlak Bir Dönemi Olur 171
9 Karanlığa Yolculuk 197
10 Devrim Burada Başlıyor 219
11 Güzellik Arayışı 239
12 Yeni Fizik 259

Ek 1 - Sayı Gösterimleri 265
Ek 2 - Standart Model'in Simetrileri 267

Sözlük 271
Dizin 281

Aileme

YAZARIN NOTU VE TEŞEKKÜR

Bu kitap, evreni oluşturan en küçük yapıtaşlarını konu alıyor. Bu yapıtaşlarına baktığımızda, her şeyin temelinde aynı malzemenin, bildiğimiz en temel şeylerin, yani atomaltı parçacıkların bulunduğunu görürüz. Bu kitabın amacı, okura bu parçacıkların neler olduğuna, nasıl hareket ettiğine, nereden geliyor olabileceğine ve tüm bunları nasıl bildiğimize ilişkin bir fikir vermektir. Parçacıklar hakkında bilmemiz gereken ilk şey, evrende gözlemlediğimiz diğer şeyler gibi, özellikle de gündelik hayatta karşımıza çıkan şeyler gibi hareket *etmedikleridir*. Bu durum, atomaltı parçacıkların dünyasını fazlasıyla ilginç kılan niteliklerden biri olsa da, parçacıkları tanımlarken karşımıza bazı güçlükler çıkarır.

Söz konusu güçlüklerin başında, parçacık alanında kullanılan en iyi dilin matematik olması gelir. Parçacıkları gerçekten anlamak istiyorsanız, onların dilini, yani matematiği öğrenmelisiniz. Bununla beraber, kanımca büyük fikirler, ilginç kavramlar denklemlerden çıkartılarak gündelik terimlerle ifade edilebilir; zaten bu kitapla da bunu yapmayı, yani atomaltı

parçacıkların dünyasını, bu dünya ile gündelik hayat arasında benzerlikler kurarak ifade etmeyi hedefliyorum. Ne var ki, analojiler simgeseldir, sınırları olur ve bu kitapta gözünüze çarpacak her türlü başarısızlık şahsıma aittir. Matematik hemen her zaman haklıdır!

Kitabı yazarken yapmak zorunda kaldığım bir diğer seçim de, dahil edeceğim şeyleri belirlemek oldu. Parçacık fiziğinin nerdeyse bir yüzyılı aşan bir tarihi vardır ve bu zaman zarfı boyunca, binlerce parlak zekâlı isim onunla meşgul olmuştur. Bu da üstünde durulacak ciddi miktarda malzeme sunar. Bu kitap, tarihin kısa bir özetini, günümüzdeki en heyecan verici bazı araştırma alanlarını içerirken, çok da kapsamlı olamıyor. Her şeyin yanında, insanların da hikâyesini sunuyor fakat bu noktada da bir seçim yapmak zorundaydım: Net olarak tarihsel bir konu ele alınıyorsa ve mevzu Nobel ödüllerinde yansımasını bulmuşsa, genellikle belirli bir fikirle özdeşleştirilen kişilerin isimlerini sunmayı tercih ettim. Fakat güncel çalışmalar söz konusu olduğunda tablo o kadar da net değildir. Bana kalırsa, Higgs bozonunun veya bildiğimiz haliyle Süpersimetri Teorisi'nin keşfinden yalnızca birkaç kişiyi sorumlu tutmak haksızlık olurdu. Bilim daima ortak çalışmaya dayalı olmuştur ve bu en çok hem deneysel hem de teorik alanlarda parçacık fiziği için geçerlidir. O yüzden isim listelerine saplanmak yerine, aktif araştırma alanlarında serpilmeyi sürdüren büyük fikirlere odaklanmaya karar verdim.

Bu kitaba katkısı olan herkese teşekkür etmem imkânsız. Aslında bu fikirleri araştırma kariyerim süresince geliştirdim; dolayısıyla birlikte çalıştığım ve Higgs bozonu hakkında lafladığım herkesin buna bir katkısı oldu. Yazmanın büsbütün farklı bir beceri olduğunu da eklemeliyim; bu nedenle bana

kitap yazma fikrini önerdiği için editörüm Wayne Davies ile sevgisi ve desteği olmaksızın bunu asla başaramayacağım Erica'ya teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Nesil
I
II
III
Kuark
Leptonlar
u
c
t
d
s
b
ν_e
ν_μ
ν_τ
e
μ
τ
Madde
(fermiyonlar)



EM kuvvet

Güçlü kuvvet

Zayıf kuvvet

Kuvvetler (bozonlar)

Keşif tarihi 1968

u

yukarı

Yük +⅔

Kütle ~0.2 MeV

BİRİNCİ BÖLÜM

GERÇEKLİĞİN TEMEL DOĞASI

Güzellik sözcüğünü bilimi betimlerken kullanmak kulağa tuhaf gelebilir. Bunun nedeni yalnızca güzelliği ifade etmenin çok zor olması değildir. Onu gördüğümüzde tanırız; ben fizikteki güzelliği ilk kez on yedi yaşındayken gördüm. Güzellik, belirli fikirlerin yüzeyde çok farklı görünen iki konu arasında beklenmedik bir bağ oluşturmasıydı. Kimi kavramların tekrar tekrar karşınıza çıkması ve tüm bunların, birkaç basit fakat güçlü denklemle ifade edilebilmesiydi. Bu fikirler üstünde çalışırken, bir anlığına da olsa etrafımızdaki dünyayla ilgili derin bir gerçeğe dokunduğumuzu hissetmek işten bile değildir.

Bu fikirlerin tarihi, onları keşfeden insanların yaratıcılığı ve hayal gücünün yanı sıra, kültür ve politikaların, hatalar ve şansın, çıkmaz sokaklar ve atılımların tarihidir. Fakat bilimin güzelliği, aynı zamanda bugünün bile ötesine geçebilmesinde yatar: Tek bir denklem, bize evrenle ilgili, bugün de milyarlarca yıl önce olduğu kadar doğru olan bir şey söyleyebilir; aynı zamanda milyarlarca yıl sonra ne olacağını da söyleyebilir.

Gelgelelim, hikâye henüz tamamlanmamıştır ve bilimin geleceği etrafımızdaki dünyayı anlamayı sürdürmekte yatar.

Parçacık fiziği, bu arayışın belki en aşırı biçimi olarak, evreni içindeki en minik şeyleri, yani temel parçacıkları inceleyerek anlamaya çalışır. Temel parçacıklar, maddenin en küçük parçalarıdır. Sizi, beni ve tüm dünyayı oluşturan temel yapıtaşlarıdır. Bu parçacıklar, aynı zamanda Güneş'i, tüm galaksimizi, milyarlarca başka galaksiyi oluşturur ve evrenin neredeyse tüm tarihi boyunca var olmuştur.

Bu kitap, bu parçacıkların nasıl davrandıklarını, nasıl davranabileceklerini, davranış olasılıklarını ele alıyor. Aynı zamanda tüm bu parçacıkların nereden geldiğine, her şeyin nasıl başladığına ve nasıl sona erebileceğine de değiniyor. Bunlar, sorabileceğimiz en büyük sorular arasındadır ve cevap arayışımız, akla hayale sığmayacak denli tuhaf bir evreni gözler önüne sermiştir. Bu, bildiklerimizin ve bilmediklerimizin, daha fazlasını öğrenme arayışımızın hikâyesidir. Kuark ve leptonların, bozon ve simetrilerin, şimdiye dek keşfettiğimiz en mink şeyleri inceleyen, tarihin en büyük deneylerinden birinin hikâyesidir.

Deneyler, bu hikâyede gerçekten çok önemli bir rol oynar. Evreni, yalnızca onu ölçerek anlayabiliriz; bahsedeceğim deneyler en büyüğünden, bir laboratuvarda oluşturulmuş en aşırı koşulları inceleyen 27 kilometrelik devasa bir parçacık hızlandırıcısından, yani Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndan, en küçüğüne, onun kadar meşhur olmayan, Güney Dakota'da Güneş'in kalbini inceleyen, kuru temizleme sıvısı dolu kocaman bir tanka kadar uzanıyor. Bir yüzyılı aşkın araştırma, egzotik parçacıklardan oluşan kocaman bir dünyayı ve şimdiye dek geliştirilmiş en başarılı bilimsel teoriyi ortaya çıkarmıştır. Bu teori, Standart Model'dir. Standart Model, parçacıkların nasıl davrandığını, etkileştiğini açıklar ve atomlardan tutun Güneş'in nasıl yaktığına, bu parçacıkların etrafımızdaki dünyayı nasıl biçimlendirdiğine varıncaya dek her şeyi açıklar. Standart Model aynı zamanda şimdiye kadar geliştirmeyi ba-

şardığımız her deneysel testin sonucunu da öngörmüştür; bu bilimsel başarının gerçek izidir.

Bana gelince, fiziğe tutkum baş gösterdikten sonra, enerji alanında bir araştırma kariyerine atıldım, dünyadaki en yüksek enerjili parçacık hızlandırıcılarında çalıştım ve gitgide daha da aşırılaşan koşullar altında Standart Model'i test etmenin yeni yollarını bulmakla uğraştım. Daha sonra, Londra Üniversitesi'nde Deneysel Parçacık Fiziği okutmanı olarak 2012'de Standart Model'le ilgili son soruyu cevapladığımız Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki ATLAS deneyinde çalışma şansı elde ettim. Neredeyse kırk yıl önce öngörülen ve o gün bugündür peşinde olduğumuz kayıp parça, yani Higgs bozonu, en sonunda keşfedilmişti. Bu parçacık, bir matematiksel hile olarak doğmuş fakat en sonunda bütün teorinin anahtarı haline gelmişti; gerçekten de, Standart Model'i bir arada tutan şey odur ve keşfi, bize evrenin davranışını yöneten daha derin kurallar hakkında bilgi verir.

Gerçekten de parçacık fiziğinin altın çağını yaşıyoruz: İnsan bilgisinin sınırlarını gittikçe genişleten, bugüne dek kurulmuş en büyük deney düzeneğini inşa ettik. Fakat en heyecan verici olan, büsbütün yeni bir keşfin eşiğinde olma ihtimalimizdir; bu şey, Higgs bozonundan çok daha önemlidir ve evren ile onun içindeki yerimiz hakkındaki düşünme biçimimizde yeni bir devrime yol verebilir.

Atomik dünya

Fizikte devrim yapmadan önce, şovumuzun oyuncularını, yani evrenin temel yapıtaşlarını ve onları hareket ettiren kuvvetleri size tanıtmam gerek. Hikâyemiz, atomlarla başlıyor.

Okulda bizlere her şeyin atomlardan meydana geldiği öğretilmiştir. Bir an durup düşündüğünüzde, bu hâlâ şaşkınlık vericidir. Etrafımızdaki baş döndürücü çeşitlilikteki cisimler,

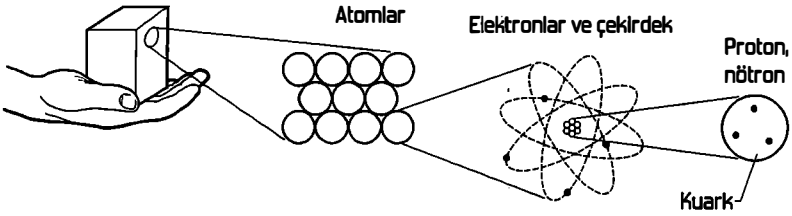
şimdi elinizde tuttuğunuz kitap gibi somut nesneler, su gibi sıvılar, dünyadaki tüm yaratıklar, soluduğumuz hava, her şey atomlardan meydana gelir; yalnızca çok minik oldukları için onları fark edemeyiz. Bir kâğıt parçası gibi sıradan bir nesneyi alın ve onu kesmeye başlayın. Elinizde boyutları bir santimetre, sonra bir milimetre, hatta bir milimetreden de küçük kâğıt parçaları kalır. Eğer elimizde hiç durmadan kesebilecek büyülü bir makas olsaydı, en sonunda kâğıdı moleküllerine ayırırdık ve o molekülleri de parçaladığımızda, geriye atomlar kalırdı. Atomlar miniciktir; öyle miniklerdir ki, tek bir kılın genişliğine yaklaşık bir milyon atom sığabilir.

Modern atom kavramı, Brown Hareketi'nden (mikroskopla incelenen minik polen tanelerinin su molekülleri tarafından hareket ettirilmesi), gazların davranışı ile farklı kimyasalların birleşerek yeni bileşimler oluşturmasına varıncaya dek pek çok somut deneysel kanıtın toplandığı 19. yüzyıla dayanır. Tüm bu deneylerde, atomlar minik sert misketler gibi davranmıştır. Bu, Yunanca bölünemez anlamı taşıyan "atom" sözcüğüne yansır; evrendeki temel yapıtaşları fikrini içeren pek çok antik felsefe geleneğinden birine selam gönderir. Farklı atom türleri vardır ve bunlar birbirine yapışarak molekülleri oluşturur; iki hidrojen ve bir oksijen atomunun H_2O veya su meydana getirmesi gibi. Moleküller birbirine yapışarak, su moleküllerinin buz meydana getirmesi gibi, farklı maddeler oluşturur. Atomlar ve moleküller aynı zamanda birbirlerinin etrafında hareket edebilir, birbirine çapıp sekebilir ve biz bu hareketi basınç ve sıcaklık olarak gözlemleriz: Ne kadar çok sekme olursa o kadar basınç olur ve daha hızlı sekme ise daha yüksek sıcaklık anlamına gelir.

Eğer atomlar minik misketler gibi hareket ediyorsa, o halde katı bir şeyden yapılmış olmalıdırlar ve o şeyin ne olduğunu sormak gayet makuldür. İşte bu, gerçekliğin temel doğasını aramaktır! Bununla birlikte, atomlar doğrudan görüle-

meyecek kadar küçük olduğundan, daha fazlasını öğrenmeyi ancak 20. yüzyılın başındaki bazı deneylerle başarabildik. Artık atomun bölünemez olmadığını, proton ve nötronlardan oluşan küçük, ağır bir çekirdeğin etrafında dönen bir elektron bulutundan oluştuğunu biliyoruz. Bu proton ve nötronlar, biraz güneş sisteminde Güneş'in etrafında dönen gezegenleri andırır. Bu benzetmeden devam edersek, bizim güneş sistemimizde sekiz gezegen vardır; yani onu sekiz elektronlu bir atomla, bir oksijen atomuyla kıyaslayabiliriz. Bir oksijen atomunu alıp neredeyse milyon çarpı milyar çarpı milyar kez büyütebilseydik, çekirdeği kabaca bizim Güneş'imizin boyutunda olurdu ve atomun geri kalanı da güneş sistemimize epey benzer, belki birazcık daha büyük olurdu. En yakın elektronlar Jüpiter'in biraz ötesinde; en uzak elektronlar da Neptün'ün çok ötesinde olurdu. Güneş sistemi nasıl milyonlarca kilometrelik boş alanda birkaç küçük gezegenden meydana geliyorsa, bir atom da yalnızca minicik bir atom çekirdeğinin etrafında dönen birkaç elektrondan ibarettir. Bu, atomlarla ilgili en şaşkınlık verici şeylerden biridir: Nerdeyse tamamen boş olmalarına karşın, birbirlerine yapışarak etrafımızdaki tüm katı nesneleri oluşturabilirler. Bu, civardaki atomlarda bulunan elektronların etkileşimi sayesinde olur ve parçacıkların önemli olduğunun ilk ipucudur fakat asıl önemli olan, onların etkileşimidir.

Tıpkı bir atomun nelerden meydana geldiğini sorduğumuz gibi, atomların içindeki parçacıkların da içeriğini sorabiliriz. Artık protonların ve nötronların kuark denen daha küçük parçacıklardan oluştuğunu biliyoruz. "Yukarı" ve "aşağı" kuarklar olarak ikiye ayırdığımız kuarklar, farklı biçimlerde birleşir: yukarı-yukarı-aşağı bir proton, aşağı-aşağı-yukarı ise bir nötron meydana getirir. Her şey atomlardan meydana gelir ve atomlar da sadece şu üç parçacıktan meydana gelir: Elektronlar, yukarı kuarklar ve aşağı kuarklar.



Atomlardan parçacıklara, maddenin yapısı.

Bildiğimiz kadarıyla bu kuarklar ve elektronlar gerçekten de temeldir: Yani görünüşe göre daha küçük bir şeyden meydana gelmemektedirler. Onlar, gerçekten de evrenin en temel yapıtaşları olabilir.

Atomlardan parçacıklara

Bir temel parçacık, epey tuhaf bir şeydir. Bir elektronu ele alalım: Bir elektron, küçük bir madde yumrusu değildir çünkü eğer öyle olsaydı söz konusu maddenin ne olduğunu sorardık ve bir elektron bir başka şeyden meydana geliyorsa zaten "temel" olmazdı. Elektron, yalnızca kendisidir. Onun gerçekte ne kadar büyük olduğunu bilmeyiz ve parçacık fiziğinin matematiğinde, tüm temel parçacıklar son derece küçükmüş gibi ele alınır. Onlar kütle, elektrik yükü ve benzeri özelliklerin toplamıdır fakat belirli bir fiziksel boyuta sahip değillerdir.

Onların böylesi tuhaf cisimler olduğu düşünüldüğünde, tuhaf davranmaları elbette şaşırtıcı değildir: Onlar kuantum mekaniğinin şaşkınlık verici dünyasında yaşar. Kuantum teorisi, 1920'lerde geliştirilmiştir ve evreni algılayışımızda gerçek bir devrim niteliğindedir. Dünyayı, bu parçacıklar boyutunda betimler ve bu deneyimlediğimiz dünyadan çok farklıdır. İkinci Bölüm'de, kuantum mekaniğinden ve atomaltı dünyasının rastlantısallığı ile belirsizliğinden biraz bahsedeceğiz.

Temel parçacıkların gerçek doğası, esrarengizliğini hâlâ korumaktadır. Bazen sert küçük yumrular gibi hareket eder,

bazen de dur durak bilmeden vızıldayan minik bir sinek gibi, bulanık bir bulutu andırırlar. Bir atomun etrafında dönen bir elektronu yakalamak, bir sineği bir şişeye sokmaya benzer; muntazam, düzgün yörüngelerde dönen güneş sistemindeki gezegenlerin aksine, sinek bir oraya, bir buraya gidip gelecektir. Gelgelelim, güneş sistemi biçimindeki atom modelinin yanlış çıkması, zamanda geriye yolculuk edebilen, fizik yasalarını bükebilen, bir var olup bir yok olan ve farklı parçacıklara dönüşebilen temel parçacıklarla ilgili pek çok sürprizden yalnızca biridir.

Temel parçacıklar tuhaf davransa da, en azından benzer şekilde davranır ve onları ortak noktalarına göre gruplara ayırabiliriz. Elektron, ismi aynı zamanda bir uzay teleskobuna, bir parçacık fiziği laboratuvarına, bir kimyasal elemente, birkaç caddeye ve pek çok nükleer reaktöre verilen Enrico Fermi'nin onuruna, "fermiyon" olarak adlandırılan bir parçacıktır. Aralarında yukarı ve aşağı kuarklar ile elektronun da bulunduğu 12 farklı fermiyon biliyoruz ve bunlar, evrendeki katı şeyleri oluşturan parçacıklar, yani "madde parçacıkları"dır. Fermiyonların temel niteliği, oluşturdukları bulanık bulutların kümelenmek yerine plastik oyun blokları gibi üst üste yığılmasıdır; atomlarda elektronların yığılması, farklı elementlere farklı kimyasal özellikler verir ve etrafımızdaki dünyayı yapılandırır.

Bu büsbütün tuhaf parçacıklar, etrafımızdaki her şeyi meydana getirse de onları saptamak çok güçtür. Boyutsuz nesneler olmalarına karşın, belirli bir yer kaplarlar. Nasıl davrandıklarını incelemek için onları parçacık hızlandırıcılarda birbirleriyle çarpıştırırız fakat biz daha yakından baktıkça, daha da tuhaf görünürler. İlerleyen sayfalarda, bu tuhaflığı ve bize en temel ölçeklerde doğayla ilgili ne söylediğini mercek altına alacağım.

Her parçacık büyüleyicidir fakat dünyayı canlandıran şey, aslında kuvvetlerdir. Tıpkı her gün deneyimlediğimiz yerçekimi gibi, pek çok açıdan kuvvetlere çok daha aşinayızdır. Bir şey düşürdüğümüzde, yere ineceğini net bir gerçek olarak kabul ederiz. Isaac Newton, bir elmanın bir ağaçtan düşmesini sağlayan kuvvetin, Ay'ın Dünya'nın etrafında, gezegenlerin de Güneş'in etrafında dönmesini sağlayan kuvvet, yani kütleçekimi (yerçekimi) kuvveti olduğunu fark etmiştir.

Dünyamızı biçimlendiren bir diğer ana kuvvet, elektromanyetizmadır. Bu genellikle ayrı şeyler, elektrik ile manyetizma olarak belirir fakat bunlar esasen aynı demir paranın iki yüzü, altta yatan tek bir kuvvetin yol açtığı iki etkidir. Modern dünyamızı işleten elektrik, pusula iğnelerinin kuzeyi göstermesini sağlayan manyetizmayla ilişkilidir. Hatta ikisi arasındaki bağ olmasaydı, elektrik üretemez, elektrik şebekelerimizi besleyemezdik. Hareket eden mıknatıslar elektrik akımı üretir ve kullandığımız elektrik enerjisinin büyük kısmı da bu sayede üretilir. Tek fark, mıknatısları hareket ettirmekte kullanılan yöntemdir. Bu yöntemler rüzgâr, su, nükleer reaktör veya bir buhar türbinini çalıştırmak için kömür yakmak olabilir. Tıpkı kütleçekiminin güneş sisteminde gezegenleri yörüngede tutması gibi, elektronları da atomda yörüngede tutan şey elektromanyetik kuvvettir. O olmasaydı, madde olmazdı.

Kuvvetler tanıdık olabilir fakat işleme biçimleri esasen epey esrarengizdir. Kütleçekimi, elmaları ağaçlardan nasıl çeker? Elektromanyetizma, elektronları nasıl atomların içinde tutar? 20. yüzyılda bu kuvvetlere dair anlayışımız en baştan yazılarak bu soruya daha derin cevaplar verildi. 1915'te Einstein'ın Genel Görelilik Teorisi, kütleçekimini uzay ve zamanın eğilmesi olarak yorumladı. 1920'ler ve 1930'larda, kuantum mekaniğiyle ve temel parçacıkların dünyasıyla uyumlu yeni

bir elektromanyetizma teorisi geliştirildi. Bilimsel ilerleyişin doğası böyledir: Eski fikirler yanlış değil, sınırlıdır ve daha derin açıklamalar onları hükümsüz kılar. Genel Görelilik ile kuantum mekaniği şu anda fizikteki iki büyük teoridir fakat kuvvetlerin işleme biçimine dair iki çok farklı fikir sunarlar. Bu iki fikri tüm kuvvetler için ortak bir teoride birleştirmek, ilerleyen sayfalarda dünyanın kuantum manzarasını keşfettikten sonra döneceğim en mühim cevaplanmamış sorulardan biri olarak kalmıştır.

Atomaltı dünyasını keşfetmek

Parçacık fiziğinin amacı etrafımızdaki dünyanın basit bir betimlemesini sunmaksa, bu noktada durabiliriz demektir. Çünkü pek çok şey, yalnızca biraz elektron, yukarı kuark, aşağı kuark, elektromanyetizma ve kütleçekimiyle açıklanabilir. Gelgelelim, doğanın bir kenarda tuttuğu başka bir sürü sürprizi vardır ve 20. yüzyılda atomu inceledikten sonra, deneyler kocaman bir atomaltı dünyasını ortaya çıkarmıştır: yeni kuarklar, doğrudan deneyimlemediğimiz kuvvetler, fazla ağır elektronlara benzeyen parçacıklar, hayaletimsi nötrinolar. Bunları bir mantığa oturtmak için evrene karşı yeni bir yaklaşım gerekiyordu ve ancak 1960'lar ve 1970'lerde net bir tablo ortaya çıktı: parçacık fiziğinde Standart Model.

Standart Model'in tutunmayı başarmasının nedeni, gerçekten de işe yaramış olmasıdır ve onun tahminleri için en büyük test alanı, İsviçre'nin Cenevre kentindeki CERN'de (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire yani Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi) bulunan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'dır (LHC). LHC, yerin yaklaşık 100 metre altında dairesel bir tünelde yer alır ve dış uzaydan daha soğuk ve boş olan bir boruda atomaltı parçacık ışınlarını ışık hızının yaklaşık %99,999999'u kadar hızlandırır. Bu parçacıklar, devrenin

dört farklı noktasında kafa kafaya çarpıştırılır ve bu dört konumda dört farklı deney yürütülür: ATLAS, CMS, LHCb ve ALICE. Her saniye 40 milyondan fazla kez meydana gelen bu çarpışmalar, bir trilyon dereceyi aşan sıcaklıklara erişir ve saniyenin binde birinde, evrenin Büyük Patlama'yı izleyen saniyenin milyarda birinden az bir zaman dilimi içindeki koşullarını yeniden oluşturur.

13,8 milyar yıl önceki Büyük Patlama'da neler olduğunu hayal etmek neredeyse imkânsızdır fakat o sıralarda tüm evrenin minik, hızla genişleyen bir uzaya sığıştığını biliyoruz. Parçacıklar öyle sıkı sıkıştırılmıştır ki, yüksek enerjili çarpışmalar tüm evreni doldurmuştur. O yüzden, eğer daha önce Büyük Patlama'nın neye benzediğini merak ettiyseniz, şimdilik ona en çok LHC sayesinde yaklaştığımızı bilmelisiniz. Oradaki çarpışmalarda, yeni, egzotik parçacıklar meydana getiriyoruz; yalnızca saniyenin binde birinde hayatta kalan bir parçacıklar, Büyük Patlama'dan hemen sonra, tüm evreni doldurmuş olmalıdır. Bu parçacıklar, bize yalnızca evrenin en erken hali hakkında değil, bugün gördüğümüz biçimine nasıl dönüştüğüne dair de bilgi verir.

Bunu yapabiliyor olmamızı şahsen inanılmaz buluyorum. LHC ve tüm deneylerin işe yaramasını sağlamak, büyük bir teknolojik başarıdır. Ben, ATLAS Deneyi'nde (A Toroidal LHC Apparatus, Toroidal LHC Aparatı) çalışan, altı kıtadan gelen ve sayıları 3000'i aşan insanlardan biriyim; CMS (Compact Muon Solenoid) için de benzeri rakamlar geçerlidir. Bu ikisi, en büyük deneylerdir. Bu kadar çok insanın çalıştığı her projenin iyi ve kötü yanları olsa da (ardı arkası kesilmeyen toplantılar gibi), CERN'de bulunmak son derece heyecan verici bir deneyim. Yaptığımız şeyi yapmamızın altında bin bir türlü hikâye ve güdü yatıyor fakat hepimizi birleştiren şey merak. Etrafımızdaki dünyayı ve nasıl işlediğini merak ediyoruz. Gündelik hayatımızın ötesine uzanan şeyleri merak

ediyoruz. LHC, tarihte böylesine yüksek enerjiye erişen ilk laboratuvar ve neler olduğunu inceleyen tek yer. Hepimiz keşiflerde yer almak istiyoruz ve şimdiye kadarki en büyük keşif, bu kitapta daha sonra göreceğimiz gibi, Standart Model'in son kayıp parçası olan Higgs bozonunun bulunmasıyla, 2012'de gelmiştir.

Arayış

Higgs bozonunun keşfi, gerçekten de parçacık fiziğinin hikâyesinde bir bölüm sonunu simgeliyordu. Şimdi ise yeni bir bölüm yazıyoruz. 2015'te LHC iki yıl süren iyileştirmelerden sonra yeniden çalışmaya başladı ve şu anda öncekinden de yüksek enerjili parçacıkları çarpıştırarak, bizi evrenin en başına ve daha önce bilinmeyen parçacıkları keşfetmeye bir adım daha yaklaştırıyor. Fakat dünyanın dört bir yanında, yeni fikirler ve yeni kesinlik seviyeleri ortaya koyan, LHC'de erişilmesi imkânsız şeyleri test eden pek çok küçük deney de yapılıyor. Tüm bu deneyler, yeni bir şeyin arayışı içindedir. Standart Model ne kadar başarılı olursa olsun, hepimiz onun kırıldığı noktayı bulmak istiyoruz.

Kimi sorular, Standart Model'in cevaplayamadığı büyük sorular olduğu için, bunun bir noktada gerçekleşmesi gerektiğini biliyoruz. Uzak galaksileri ölçen teleskoplar, bize Standart Model'in her nasılsa oralardaki şeylerin %95'ini gözden kaçırdığını söylüyor. Atomaltı dünyası için çizdiğimiz tabloya kütleçekiminin ne şekilde uyduğu konusunda en ufak fikrimiz yok. Veya içinde bulunduğumuz dünyayı meydana getirmek için yalnızca 3 tanesi yeterliyken, neden Standart Model'de 12 fermiyon parçacığı olduğu konusunda. Eldeki teoriler bizi olabildiğince ileri bir noktaya taşıdı fakat bir sonraki adımda karşımıza çıkacak şeyi işaret eden belirli bir yön tabelası yok. İlerleyen sayfalarda, aralarında Süpersimet-

ri, ekstra boyutlar, Sicim Teorisi ve kuantum kütleçekiminin bulunduğu kimi fikirlerden bahsedeceğim. Bunlardan biri, Standart Model'in tüm farklı parçalarını "Büyük Birleşik Teori"nin çatısı altında toplamayı başarabilir. Hatta resmin tüm eksik parçalarını tamamlayarak, bize bütün evrenin kullanma kılavuzunu da verebilir. Bu, gerçek bir "Her Şeyin Teorisi" olur.

Gelecek, pek çok şeye gebe olabilir. Her Şeyin Teorisi'ne yaklaşmış olabiliriz veya doğanın hâlâ bizim için kenarda beklettiği pek çok sürprizi olabilir. Bunun cevabını bize ancak deneylerin verebileceğine inanıyorum. Bir sonraki dönüm noktasına ulaşmak için, dışarı çıkıp keşfetmeliyiz. Tarihin eşsiz bir noktasında, katıksız arayışın, yeni verilerin, yeni ölçümlerin ve yeni yönlerin günündeyiz. Önümüzdeki yıllar çok önemli: Eğer bir dönüm noktasına erişemezsek, en başa dönme vakti gelmiş olabilir ve bu evreni kavrayışımızı geliştirmek için yine bir teknolojik sıçrayış gerektirebilir. Öte yandan, LHC'de bir dizi yeni parçacık, Fransız Alpleri'nin altındaki SuperNEMO Deneyi sayesinde nötrinolara dair yeni bir kavrayış, Amerika, Güney Dakota'daki madenin derinliklerinde süren LZ Deneyi sayesinde karanlık maddenin gerçek doğasını keşfedebiliriz.

Her halükârda, büyük bir sürpriz, düşünme biçimimizde radikal bir değişim gerektirecek bir şey bulmamızı umuyorum. Tıpkı 20. yüzyılın başında kuantum mekaniğinin veya ondan kırk yıl sonra Standart Model'in geliştirilmesi gibi. Artık evreni anlama biçimimizde bir devrimin yapmanın ve gerçekliğin temel doğasını tekrar aramaya çıkmanın vakti geldi.

İKİNCİ BÖLÜM

PARÇACIK BAHÇESİNDE BİR GEZİNTİ

Parçacık fiziğinin en cazip yanlarından biri, dünyayı en basit biçiminde, en temel yapıtaşları, yani tüm maddenin sahip olduğu şeyler seviyesinde inceliyor olmamızdır. Eğer temel parçacıkları anlayabilirsek, evrendeki her şeyi anlamamız mümkün olabilir. Fakat elbette bu basit bir iş değildir çünkü bu parçacıklar etrafımızda olsalar da, esrarengizliklerini korurlar. Henüz onların tam olarak ne olduğunu bilmiyoruz ve bunu bulmaya çalışmak, bir yapbozu tamamlamaya çalışmaya benziyor. Onların farklı koşullarda nasıl hareket ettiğini inceleyebilir, özelliklerini öğrenir, gerçek doğalarına dair ipuçları ararız. Dolayısıyla yapılacak ilk şey, bazı parçacıkları biraz daha tanımaya çalışmaktır ve bunu yapmak için de onlarla biraz zaman geçirmemiz gerekir. Bu bölümde, bildiğimiz bazı şeyleri, evreni meydana getiren ve kuantum mekaniğiyle tanımlanan tüm temel parçacıklar için geçerli olan ilginç bilgileri size aktaracağım.

1920'ler, evreni anlayışımızda bir devrime sahne oldu. Bu, Avrupa'nın çeşitli bölgelerinden genç ve parlak bir neslin yeni kuantum mekaniği teorisini keşfettiği, bilim tarihinde büyüleyici bir dönemdi. Bu kişilerin isimleri, geliştirdikleri fikirler ve teorilerle aynıdır: Niels Bohr (Bohr Atom Modeli),

Werner Heisenberg (Heisenberg Belirsizlik İlkesi), Wolfgang Pauli (Pauli Dışlama İlkesi), Erwin Schrödinger (Schrödinger Denklemi) Enrico Fermi (fermiyonlar), Louis de Broglie (de Broglie Dalgaları) ve son olarak, 1928'de bir denklem keşfeden münzevi bir İngiliz, Paul Dirac vardır. Bir elektronun hareketini tarif eden bu denklemde yalnızca 6 sembol vardır. Gerçi yalnızca tek bir elektronun hareketini tarif etmez; Dirac Denklemi, tüm "fermiyonları" tarif eder. Bunlar madde parçacıkları, atomları meydana getiren elektron ve kuarklardır. Denklem şöyledir:

$$i\gamma.\partial\psi = m\psi$$

Yani, parçacığın (ψ) kütlesi (m), onun nasıl hareket ettiğini etkiler ($i\gamma.\partial\psi$). Böylesine zarif ve basit bir şeyin, bir atomda bulduğumuz her parçacığın, evrendeki her fermiyonun, şimdiye dek var olmuş ve var olacak her fermiyonun davranışını tarif edebilmesini büyüleyici buluyorum. Bu çok güçlü bir denklemdir. En küçük ölçeklerde doğanın dili veya en azından şimdiye kadar öğrenmeyi başardığımız en iyi dildir. Bu denklem, Westminster Abbey'de Isaac Newton ile Charles Darwin'in mezarlarının yanında bulunan Dirac anıtında yer alır.

Ancak elbette görüntü yanıltıcı olabilir; Dirac Denklemi, büyük bir hızla fazlasıyla karmaşıklaşabilir ve parçacıkların davranış biçimlerine ilişkin şaşırtıcı öngörüler üretebilir. Bir parçacığı hayal ettiğimde, bir denklem hayal etmem; o parçacığın yapıyor olabileceği şeye, nasıl davranıyor olabileceğine ilişkin kimi sezgiler ve tabloların bir bileşimini kullanırım. Bu nedenle bu bölümde, bir parçacık fizikçisinin parçacıkları düşünürken ne düşündüğünü anlatmaya çalışacağım. Şimdilik bunun ortak cevabı Feynman Diyagramları olduğundan, ku-

antum dünyasındaki yolculuğumuzda bize onlar kılavuzluk edecek.

Karikatür fiziği

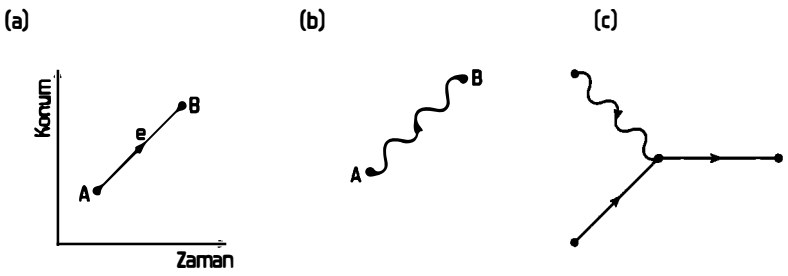
Konu parçacık fiziği olduğunda, sürekli Richard Feynman ismine rastlamanız işten bile değildir. Feynman matematiksel sezgisi sayesinde 20. yüzyılın en büyük fizikçilerinden biri oldu fakat kendisi aynı zamanda bilim iletişimi, bongo çalma merakı, kasa şifrelerini kırması ve başka eksantrik yanlarıyla da tanınır. Çağdaşı Freeman Dyson tanışmalarından sonra ondan "yarı dahi, yarı soytarı" olarak bahsetmiş, sonradan bu tarifi "tam dahi, tam soytarı" olarak değiştirmiştir. Ancak 20. yüzyılın ortasındaki diğer müthiş fizikçilerin aksine, Feynman'ın ismi bugün Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki bilimsel toplantılarda hâlâ sıklıkla zikredilir çünkü Feynman, günümüzde de kullanmaya devam ettiğimiz parçacık teorisini geliştirmede temel bir rol üstlenmiştir. Bu teorinin aslında üç versiyonu vardır ve 1940'larda Richard Feynman, Julian Schwinger ve Shin-Itiro Tomonaga tarafından birbirinden bağımsız olarak geliştirilmiştir. Bu isimler, yürüttükleri çalışmalar için 1965'te Nobel Ödülü'nü paylaşmıştır. Bu üç teorinin esasen eşit olduğunu, altta yatan aynı gerçeğin birbirine çok yakın betimlemeleri olduğunu fark etmek ise dördüncü bir isme, Freeman Dyson'a düşmüştür. Bugün Feynman'ın yöntemini kullanmamızın nedeni, daha yalın ve sezgisel olmasıdır; üstelik de resimlidir. Feynman Diyagramları, basit bir kural dizisini takip eder ve bize, karmaşık hesaplamalar yapmaya gerek kalmaksızın, bir parçacığın nasıl hareket ettiğine ve etkileşimde bulunduğuna dair alabildiğine gerçekçi bir tablo sunar. LHC'den gelen sonuçların neredeyse tüm sunumlarında Feynman Diyagramları yer alır ve her parçacık fizikçisinin en azından bazen bu resimlerin diliyle düşündüğünü söylemek abartılı kaçmayacaktır.

Bu bölümde, Feynman Diyagramlarının basit bir soruyu incelemekte nasıl kullanıldığını göstereceğim: İki elektron çarpıştığında ne olur? Bu LHC'de Higgs bozonu yapmak kadar ilginç gelmeyebilir fakat bunun nasıl mümkün olabildiğine dair bize çok şey söyleyecektir. LHC protonları neredeyse ışık hızıyla çarpıştırır ve bu süreç içinde onları tamamen yok eder. Bu çarpışmalar, ilerleyen sayfalarda göreceğimiz gibi, karmaşıktır fakat iki elektronu içeren en basit çarpışma türüne bakarak neler olduğuna dair bir tablo oluşturmaya başlayabiliriz. Bu, kuantum mekaniğinin Rosetta Taşı* gibidir: Onu deneysel olarak incelemek görece kolaydır ve bulgular kuantum teorisinin gizemlerini gözler önüne sererek ve fikirler ile tahminlerin test edilmesini sağlayarak, teorinin geliştirilmesini sağlamıştır. Aynı zamanda, bu kitabın geri kalanında karşımıza çıkacak hemen her parçacık ve etkileşimi anlama biçimimiz için bize temel bir şablon sağlar.

Her şeyden önce, elektronun ne olduğuna dair bir fikir edinmeliyiz. Birinci Bölüm'de, parçacıkların bazı tuhaf şeyler yapabildiklerinden bahsetmiştim fakat şimdilik en başa dönelim; her parçacığın en basit resmi, minik bir misket gibi, küçük bir madde parçasıdır. Minik misketler gibi nesnelerin nasıl hareket ettiğini, yani genellikle düz bir hat üzerinde yuvarlandıklarını zaten biliyoruz. Birinci Feynman Diyagramı, A noktasından B noktasına ilerleyen bir elektronu betimler ve iki nokta arasında düz bir çizgiden ibarettir. Bu diyagramlarda, zaman soldan sağa doğru akarken, dikey çizgi, farklı konumlara denk gelir. Şimdilik iyi gidiyoruz (a).

---

* 1799'da Mısır'da gün ışığına çıkarılan, ilkçağdan kalma bir dikilitaş; diğer ismiyle Reşid Taşı. Üzerine, aşağı yukarı aynı metin hem Eski Mısır dilinde (iki farklı yazı sistemi, Demotik yazı ve Hiyeroglif ile) hem de Eski Yunanca hakkedildiği için, hiyeroglif yazısının en sonunda çözülmesini sağlamıştır. (çev.)



(a) A'dan B'ye hareket eden bir elektron için Feynman Diyagramı.
(b) A'dan B'ye hareket eden bir foton için Feynman Diyagramı.
(c) Bir fotonu yutan ve yön değiştiren bir elektron için Feynman Diyagramı.

Elektronlar sadece hareket etmez, aynı zamanda temel doğal kuvvetleri de hissederler. Bunların ilki, elektrik yükü taşıyan her şeyin hissettiği bir kuvvet olan elektromanyetizmadır. Pozitif ve negatif olmak üzere iki tür elektrik yükü bulunur. Nesneler aynı tür yük taşıyorsa birbirini iter, zıt yükler taşıyorsa birbirini çeker. İki elektron çarpıştığında, ikisi de negatif yüklü olduğundan birbirini iter.

Elektromanyetik kuvvetin kuantum versiyonu, kuantum elektrodinamiği (QED) olarak bilinir ve QED'de elektromanyetik kuvvet iki elektron arasında bozonlar olarak bilinen "elçi parçacıklar"la iletilir ve elektromanyetik kuvvetle özdeşleştirilen bozon, ışık parçacığı olan fotondur. Feynman Diyagramları diliyle, A noktasından B noktasına ilerleyen bir foton da bir çizgiyle betimlenir ve bir elektrondan ayrıştırılması için, ortadaki diyagramda (b) görüldüğü gibi, dalgalı bir çizgiyle ve γ simgesiyle gösterilir. (Bunun Dirac Denklemi'nde görülen γ olmadığını belirtmeliyiz; Yunan harfleri fizikte çok sık kullanıldığından, geridönüşüme tabi tutularak kullanılmalarına şaşmamalı!)

Fotonların bir kuvveti nasıl iletebildiğine bir örnek olarak, kaykay üstünde duran iki insanı verelim. Eğer biri, elindeki topu ileri doğru atarsa, kaykayı geriye doğru gidecektir; bu

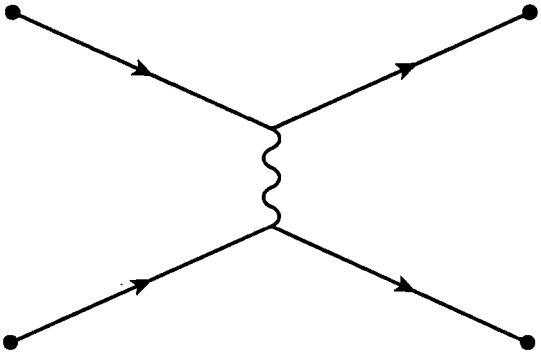
momentumun korunumudur. Eğer diğer kişi topu yakalarsa, kaykayın üstünde topun seyahat ettiği yöne hareket edecektir. Dolayısıyla bu iki kişi, aralarında topu atarak, en sonunda birbirlerinden gitgide uzaklaşacaktır. İki elektron çarpıştığında bu meydana gelir: Bir foton değiştokuşunda bulunabilir ve birbirlerinden uzaklaşabilirler.

İki parçacığın foton değiştokuşunda bulunarak birbirlerine doğru hareket etmesi de mümkündür. Eğer birinci kaykaycı ters yöne bir bumerang fırlatırsa, ikinci kaykaycıya doğru gidecektir. Bumerang ikinci kaykaycının arkasında dönecektir, böylece onu yakaladığında, o da birinci kaykaycıya doğru gidecektir. Dolayısıyla, bir top atarak kaykaycılarımız birbirlerini itecek, bumerang atarak da çekecektir. QED'de fotonlar zıt yüklü parçacıkları birbirine iten bumeranglar ve aynı yüklü parçacıkları birbirinden uzaklaştıran toplar gibidir.

Bu tabloyu tamamlamak için Feynman Diyagramlarına bir bileşen daha eklememiz gerekir: Foton emen veya salan elektronlar, üçüncü diyagramda (c) gösterildiği gibi, bir elektron çizgisi ile bir foton çizgisinin birleştiği bir "verteks"le betimlenir.

Artık iki elektron çarpıştığında neler olduğunu açıklamak için ihtiyacımız olan her şeye sahibiz. İki elektron çarpıştığında, bir foton değiştokuşunda bulunur ve bunu bir Feynman Diyagramı halinde çizebiliriz. Soldan sağa doğru okuyarak, sırayla neler olduğunu görebiliriz: Düz çizgiler birbirine doğru hareket eden elektronları, fotonun salınmasını, hareket eden fotonu, fotonun emilmesini, elektronların geri tepmesini gösterir.

Her bileşen parça, gerçek bir matematik sunar ve onları birleştirerek bir etkileşimi betimleyen eksiksiz bir denklem oluşturabiliriz. Bu hesaplamayı yapmak, işin çetrefilli kısmıdır fakat hangi hesaplamayı yapacağımızı bize söyleyen bir Feynman Diyagramı çizmek kolaydır.



İki elektronun bir foton değiştokuş ederek sekmesi.

Bu elektronlarla ilgili bir örnek olsa da, her türlü elektrik yüklü parçacık tıpkı bir elektron gibi, yani bir Feynman Diyagramında düz bir çizgi olarak sunulabilir. Sadece bu üç basit bileşenle (hareket eden parçacık, hareket eden foton, verteks) bütün QED teorisini inşa etmek mümkündür. Bunlar her şekilde birleştirilebilir ve onlardan yola çıkarak her elektromanyetik etkileşimin tablosunu çıkarmak mümkündür. Tüm bu etkileşimler, foton değiştokuşu yapan elektronları içerir. Fotonlar gerçekten de tüm dünyayı bir arada tutan şeylerdir: Elektromanyetik çekim, elektronların atomdaki protonların etrafında dönmesini sağlar ve atomlar neredeyse tamamen boş olsa da, çevredeki atomlarda bulunan elektronlar arasındaki elektromanyetik geri tepme, atomların basitçe birbirlerinin içinden geçmesini engeller. Fotonlar olmasaydı dünyanın nasıl bir yer olacağını hayal etmek güçtür; ellerimi çırpmaya çalışsam, hiç ses çıkarmadan birbirlerinin içinden geçiverirlerdi! Fakat fotonlar olmasaydı, zaten atom diye bir şey olmazdı; yani gözlerimizin önündeki şu dünya var olmazdı.

Çoğu elektromanyetik etkileşim, aslında sayısız foton içerir ve çok karmaşıktır: Ben el çırparken trilyonlarca elektron birbirini iter. Bunun Feynman Diyagramını çizmek epey

uzun sürer! Dolayısıyla kuantum elektrodinamiği, yani QED teorisinin en temel biçimi, çarpışan iki elektron gibi, görece basit vakalar için kullanılır. Daha karmaşık durumlar için, elektrik alanları gibi kestirimler kullanılır fakat iş dönüp dolaşıp QED'e varır. Bu teori, ışığın aynalardan nasıl yansıdığını, elektriğin nasıl üretildiğini ve evlerimize ulaştırıldığını, modern elektronik eşyalarımızın nasıl çalıştığını açıklar. QED'in öngörüleri aşağı yukarı trilyonda bir kesinlikte test edilmiştir ve bu onu belki de bilim tarihinin en etraflıca test edilmiş teorisi kılar. Ve işin sonunda şunun daima doğru olduğu görülür: Bilimin en güçlü teorilerinden biri, karikatürlerden bile inşa edilebilir!

Zar atmak

Eğer daha önce bovling oynamaya gittiyseniz farklı çarpışma türleri olduğunu bilirsiniz. Belirli bir açıyla yapılarak bir lobutu düşüren bir atış veya direkt yapılarak tüm lobutları deviren bir vuruş gibi. İki elektronu çarpıştırdığımızda, ikisi birbirini biraz sıyırarak çok az yön mü değiştirir, yoksa sert bir duvara çarpmış gibi geriye doğru mu sıçrarlar? Feynman Diyagramı yalnızca bir çizimden ibaret olduğu için, bu noktada pek net değildir: Ortadaki foton, az açılı bir çarpışma durumunda biraz, kafa kafaya bir çarpışma durumunda ise epey enerji taşıyor olabilir. Cevap, altta yatan matematikten gelmelidir.

Bu, kuantum mekaniğiyle ilgili sıra dışı kimi şeylerin belirmeye başladığı noktadır. Gerçekte hesaplayabileceğimiz tek şey olasılıklardır: İki elektronun birbirini sıyırması, "sert" bir çarpışmadan sonra yön değiştirmesi veya bu ikisi arasındaki herhangi bir durumun olasılığı. İki elektron karşılaştığında bunlardan hangisinin olacağını kesin olarak söyleye-

meyiz. Belki matematik bize, %80 sıyıran çarpışma, %20 sert çarpışma olasılığı olduğunu söyler. Elektronları tekrar tekrar çarpıştırdığımız bir deney yaptığımızda, kesin olarak şunun olacağını görürüz: Bu çarpışmaların 10'da 2'si sert çarpışma olacaktır. Keşke bovlingde o kadar sık tam sayı alabilsem. Sorun, tıpkı benim tam sayı almamda olduğu gibi, bu sert çarpışmanın ne zaman meydana geleceğini de önceden söyleyememizdir. Her çarpışmanın sonucu rastlantısaldır fakat en azından elektronlar için, kesin olarak hesaplayabildiğimiz olasılıklar söz konusudur.

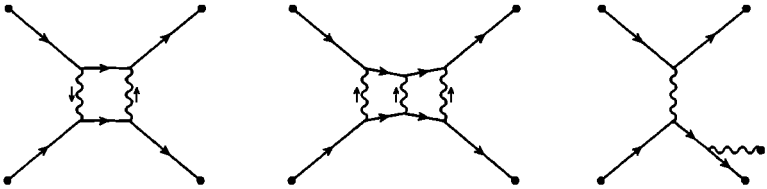
Ne var ki, parçacıkların çarpışmasındaki rastlantısallık, benim bovling atışımdaki rastlantısallıkla aynı değildir. Eğer topun yoldaki yörüngesini ölçebilseydim, atışımın tüm lobutları devirip devirmeyeceğini epey kesin olarak hesaplamam mümkün olurdu. Parçacık etkileşimlerindeki rastlantısallık farklıdır: Elektronlar hakkında her şeyi bildiğimiz bir deney yürütmeyi başarsaydık bile, bunun sonucu rastlantısal olurdu. Top adeta tam puan alıp almayacağına ancak lobutlara gelince karar veriyormuş gibidir. Topun şeritte gidişini ne kadar kesin olarak ölçersek ölçelim, o ana dek bilmenin hiçbir yolu yoktur. Bu rastlantısallık, tüm kuantum mekaniğinin kalbinde yatar. Örneğin, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki her yüksek enerjili çarpışmada kesin olarak ne olacağını önceden bilmenin yolu yoktur. Neyin olasılıklı olduğunu ve farklı olasılıkların meydana gelme ihtimalini inanılmaz isabetli şekilde hesaplayabiliriz fakat sonra kenara çekilip bunlardan hangisinin meydana geleceğini izlemek dışında yapabileceğimiz hiçbir şey yoktur. Bu, parçacık fiziğini bir sayı oyununa dönüştürür. LHC'de Higgs bozonu gibi bir şey üstüne çalışmak istiyorsak, onu oluşturması garanti bir çarpışma oluşturmanın imkânı yoktur. Bunun yerine pek çok, bir sürü çarpışma üretmemiz ve Higgs bozonunun ortaya çıktığı birkaç

rastlantısal çarpışmayı beklememiz gerekir. Üstelik, milyarlarca çarpışma arasında bize gerekenleri kaçırmadığımızdan da emin olmalıyız.

Bu rastlantısallık, kuantum teorisinin geliştirildiği ilk zamanlarda pek çok kişiyi düşündürmüştür çünkü bizim evreni karayışımızda devasa bir geriye adım gibi görülmüştür. Bize neler olacağını asla tam anlamıyla bilemeyeceğimizi söyler; denklemleri kesin olarak çözemediğimiz veya teoriyi tam anlamıyla kavramadığımızdan değil, evren her deneyin olası sonuçlarından oluşturduğu özel listeden rasgele bir tanesini seçtiğinden. Evren bunu nasıl yapmaktadır? Bu, Einstein'ın ünlü "Tanrı zar atmaz" sözünü söylemesine yol açmıştır. Herhalde evren, bir zar atışına bağlıymış gibi, her defasında rastlantısal biçimde karar veriyor olamaz, öyle değil mi? Niels Bohr'un Einstein'a karşılık olarak söylediği, onunki kadar meşhur olmayan sözünü kullanmak gerekirse, "Tanrı'ya ne yapacağını söylemekten vazgeç!" Kuantum mekaniği beklenmediktir ve pek çok açıdan tatmin edici sayılmaz fakat doğanın gerçekçi bir tanımlaması olduğu muhakkaktır. Doğaya nasıl davranacağını söyleyemeyiz, yalnızca nasıl davrandığını öğrenebiliriz. Ve doğa, görünüşe bakılırsa, rastlantısal davranmaktadır.

Öyle veya böyle

Çarpışan iki elektron örneğine geri dönecek olursak, bir foton değiştokuşunda bulunarak geri tepmelerinde bir miktar rastlantısallık vardır. Bu sıyıran çarpışma da olabilir, sert çarpışma da. Fakat bunların yanında bir olasılık daha bulunur. QED kurallarını kullanarak, iki elektronun bir foton değil, iki foton değiştokuşu yaparak etkileşimde bulunduğu bir başka Feynman Diyagramı çizebiliriz.



İki elektron çarpıştığı zaman olabilecek başka şeyler.

Çok basit bir yaklaşım izlenirse, iki foton değiştokuşu yapmak büyük ihtimalle daha güçlü bir etkileşime yol verecektir. Kaykaycılar örneğine geri dönecek olursak, kaykaycılar bir top "değiştokuş ederse" birbirlerinden uzaklaşmaya başlarlar. Bir başka top daha değiştokuş ederlerse, daha da hızlı uzaklaşırlar. Ne kadar çok foton değiştokuşu olursa, iki elektron birbirini o kadar güçlü itecektir. Başka bir olasılık daha var: Elektronlar bir foton değiştokuşu yaparak etkileşimde bulunabilir fakat sonradan başka bir foton saçabilir; bu foton tıpkı bir ampulden çıkan ışık gibi, dışarıya doğru yolculuk edebilir. Çarpışmadan sonra enerji artık iki elektron ve bir foton arasında paylaşılmaktadır ve böylece elektronlar biraz daha yavaş hareket edecektir.

Elektronların bir foton mu, iki foton mu, hatta daha fazla sayıda foton mu değiştokuş edeceğini veya çarpışmadan önce veya sonra fazladan fotonlar üretip üretmeyeceklerini önceden bilmenin imkânı yoktur. Yapabileceğimiz tek şey, tüm bu sonuçların olasılığını hesaplamaktır ve olasılıklar eşit değildir. Bir top fırlatmanın veya bir foton değiştokuş etmenin ya da üretmenin bir bedeli vardır ve bu, "eşleşme sabiti" olarak bilinen bir nicelikle belirlenir.

Eşleşme sabiti, bir parçacığın bir fotonla "eşleşme" veya etkileşimde bulunma olasılığını bize söyler ve α simgesiyle belirtilir. Bu bir Feynman Diyagramında bir elektron çizgisi ile bir foton çizgisi ne zaman buluşsa, her vertekste belirir ve bize elektronun bu fazladan fotonu üretme olasılığını söyler.

Bu biraz bir demir paranın tura gelme ihtimalini söylemeye benzer (bu ihtimal 1/2'dir). Eşleşme sabitinin (α) değeri, hesaplayabileceğimiz bir şey değildir, sadece onu ölçmemiz gerekir ve neredeyse kesin olarak 1/137 olduğu gözlemlenir. Başka bir tabirle, bir demir paranın tura gelmesi 1/2 olasılığa sahipken, bir elektronun bir foton yaymasının olasılığı kabaca 1/137'dir. Arka arkaya iki kez tura gelmesinin olasılığı 1/4'tür (yani 1/2x1/2) ve iki foton yayılmasının olasılığı da kabaca 1/19.000'dir (yani 1/137x1/137).

Eşleşme sabitinin (α) değeri, elektromanyetik kuvvetin gücüyle yakından ilgilidir: Eğer α daha büyük olursa, bir elektronun foton yayması daha yüksek bir olasılık olur ve daha fazla foton da iki elektronu iten daha güçlü bir kuvvet anlamına gelir. Fakat sonradan α'nın epey küçük, fazladan fotonların epey ender olduğu anlaşılır ve bu da QED'le çalışmayı daha çok kolaylaştırır. "Baskın mertebe" veya LO ("leading order") kısmı olarak bilinen her süreç için mümkün olan en basit Feynman Diyagramı bizi doğru cevaba çok yaklaştırır. Aynı zamanda bir fazladan fotona sahip, "yakın baskın mertebe" veya NLO ("next-to-leading order") olarak bilinen olası tüm diyagramları da hesaplayarak daha kesin bir cevap bulabiliriz. Pek çok foton içeren çok karmaşık etkileşimler son derece düşük olasılıklı olduğundan genellikle göz ardı edilebilirler; bu tıpkı bir demir paranın yazı veya tura gelmek yerine kenarı üstüne düşmesi gibi, olası olmayan bir sonucu hesaba katmamamıza benzer. Fakat bu ender olasılıkları dahil etmek, bize gerçekten de çok kesin cevaplar sağlar: Bir elektronun manyetik özellikleri NNNNLO olarak hesaplanmıştır (evet, "next-to-next-to-next-to-next-to-next-to-leading order") ve 12.000 olası Feynman Diyagramı, 12.000'in üstünde farklı hesaplama içerir. Sonuç, trilyonda birden daha iyi bir kesinliğe sahiptir: Dünya ile Ay arasındaki mesafeyi, bir insan kılının genişliği cinsinden hesaplamaya eşit.

Fakat bir soru: α neden 1/2, 1/150 veya herhangi başka bir şey değil de, 1/137 değerine sahiptir? Bunun bir nedeni olmalıdır. Bazı saygın isimler bunu açıklamaya çalışmak için numeroloji alanında amatörce uğraş vermiştir. 20. yüzyılın ilk yarısındaki teorik fizik devi, Nobel Ödüllü Wolfgang Pauli, psikanalist Carl Jung'la alışılmadık bir işbirliğinde bulunarak 137 sayısının anlamını aramıştır. Pauli 1958'de pankreas kanserine yenik düşerek Zürih'teki bir hastanenin 137 numaralı odasında ölünceye dek, bu sayının gizemine kapılmıştır.

Bu parçacık fiziğinde "serbest parametre" olarak bilinen şeyle ilk karşılaşmamızdır ve α'nın neden 1/137 değerine sahip olduğunu henüz bilmediğimiz fakat onu ölçtüğümüzde sayıyı denklemlere yerleştirerek parçacıkların nasıl davrandığına dair isabetli öngörüler hesaplayabileceğimiz anlamına gelir. Evreni daha derinlemesine kavradığımız zaman 1/137'yi de daha iyi anlayabiliriz, fakat şimdilik bunu bilmiyoruz. Parçacık fiziğinde bu serbest parametrelerden 26 tane vardır; henüz açıklayamadığımız 26 sayı. Başka bir tabirle, şimdiki parçacık fiziği kavrayışımızın eksik olduğunu düşünmemiz için en az 26 neden bulunuyor.

"Ona, 'Sen delisin,' demiştim. Meğer yanılmışım."

Şimdiye kadar her şey size biraz sıra dışı gelmiş olabilir fakat aslında tuhaf görünen çok da fazla bir şey olmamalı. Görünüşe göre elektronlar ve fotonlar düz hatlar izleyerek yolculuk eder ve elektrik yüklü parçacıklar da birbirlerine fotonlar ateşleyerek etkileşir. Bazı Feynman Diyagramları çizmeye başlayarak, meydana gelebilecek çeşitli etkileşim türlerini yüksek kesinlikle hesaplayabiliriz. Bunda bir rastlantısallık unsuru vardır çünkü bir veya iki foton değiştokuşu olması gibi, her şey çok çeşitli biçimlerde meydana gelebilir ve tam

olarak ne olacağını bilmenin hiçbir yolu yoktur, yalnızca olasılıkları hesaplayabiliriz.

Şimdi sıra kuantum mekaniğinde gerçekten tuhaf olan şeylere geldi. Bu Feynman Diyagramları yalnızca meydana gelebilecek olası şeyleri değil, meydana gelen olası şeyleri de temsil eder. Üstelik bunların hepsi de aynı anda meydana gelir. İki elektron çarpıştığında bir foton değiştokuş ederler. İki foton da değiştokuş ederler. Üç foton da. Dört de. Daha fazla da. Neden böyle bir belirsizlik söz konusu olduğunu anlamak için bir parçacığın ne olduğuna dair kavrayışımızı büsbütün değiştirmemiz gerekir. Şimdiye dek parçacıklar etrafta yuvarlanan, foton yayan ve emen minik misketler olarak düşünülmüştür. Aslında parçacıklar çok daha tuhaftır ve çoğu zaman onların neyle uğraştığını bilmeyiz. Çünkü görünüşe göre aynı anda pek çok şeyle uğraşırlar.

Bunu irdelemeye, elektronların kendilerinin pek çok kopyasına ayrılmalarından başlayabiliriz. Her kopya, biraz farklı bir şey yapar: Farklı şekilde hareket edebilir, bir foton yerine iki foton ateşleyebilir, farklı bir yönde geri tepebilir. Bir parçacığın A'dan B noktasına yolculuk ederken izleyebileceği her olası yol ve ateşleyebileceği ya da emebileceği her olası foton sayısı kadar kopyası vardır. En sonunda tüm bu kopyalar bir araya gelebilir, böylece bir dahaki sefer her elektronun ölçümünü yaptığımızda, yine sadece tek bir parçacık bulabiliriz. Fakat ölçümler arasında, biz onlara bakmazken, öyle görünüyor ki parçacıklar pek çok farklı kopyaya bölünür ve olası tüm davranış biçimlerini keşfeder. Bir çarpışmada ne olabileceğini doğru hesaplayabilmek için tüm bu kopyaları birbirine eklemeli ve elektronlara bütün bunları hep beraber aynı anda yapıyorlarmış gibi yaklaşmak zorundayız. Ancak bunu yaparak evrenin gerçekçi bir betimlemesine ulaşabiliriz. Bu bir analoji değil, gerçek matematiğin tanımıdır! Kuantum mekaniğinin

"yol integrali" versiyonu olarak bilinir çünkü matematiğin yaptığı şey budur: Matematik, bir parçacığın izleyebileceği her olası yolu, bir parçacığın yapabileceği her olası etkileşimi toplar. Bu, Feynman'ın parçacıkların doğasını ne kadar iyi kavradığını gösterir. Freeman Dyson işte bu nedenle, "Ona, 'Sen delisin,' demiştim. Meğer yanılmışım," sözlerini sarf etmiştir.

Bu konu gündelik yaşamda deneyimlediğimiz hiçbir şeye benzemediğinden, biraz daha incelemeye değerdir. Örneğin işe giderken otobüse ya da trene binebilirim. Önceden hangisine bineceğimi bilmemem mümkündür; bu önce hangisinin geleceğine bağlı olabilir. İşe vardığımda, iş arkadaşlarım da bunlardan hangisine bindiğimi bilmeyebilir fakat bu ikisine de bindiğim anlamına gelmez! Elbette yalnızca birine bindim, yalnızca onlar hangisine bindiğimi bilmiyor, o kadar. Fakat kuantum mekaniği farklıdır. Ben bir elektron olsaydım gerçekten de iki kopyaya bölünür ve hem otobüse hem de trene binerdim. Otobüse binen kopyam da defalarca kez bölünür, o otobüsün binlerce kopyası her yöne dağılır, kentte mümkün olan her rotayı izlerdi. Tüm bu farklı rotalar ofisimde birleşirdi ve ancak hepsini hesaba katarak bir elektronun nasıl davrandığını doğru biçimde açıklayabilirdik.

Yeri gelmişken, kuantum mekaniğini, tıpkı kente yayılan pek çok farklı otobüs güzergâhının yanı sıra, parçacıkları bir gölde daireler şeklinde yayılan dalgacıklar olarak tarif ederek de formüle etmenin mümkün olduğunu belirtmeliyiz. Bu, teori "dalga-parçacık ikiliği"dir ve bir atomdaki elektronlar gibi uygulamalar için kullanımı daha kolaydır. Fakat yüksek enerjili parçacık fiziği için Feynman'ın yol integrali yaklaşımı, kavramsal açıdan olmasa da matematiksel olarak çok daha basittir ve kuantum mekaniğinin bu versiyonu, "kuantum alan teorisi" olarak bilinir.

Kuantum mekaniğinin rastlantısallığı Einstein için en başından itibaren bir sorun olmuşsa, bu fikir ondan da beterdi. Artık yalnızca tam olarak ne meydana geleceğini hesaplayamamakla kalmıyor, aynı zamanda ne meydana geldiğini de tam olarak bilemiyorduk çünkü her şey aynı anda meydana geliyordu. En azından matematik bize bunu söylüyordu. Peki, elektronların herhangi bir rotada ilerleyebilmesi ve bir, iki veya çok daha fazla foton yaymasının mümkün olması, bütün bunları gerçekten aynı anda yapıyor oldukları anlamına mı gelir? Parçacıklar o kadar ufaktırlar ki, biz yaptıklarını doğrudan göremeyiz, dolayısıyla belki de elektronlar aslında bunlardan sadece birini yapıyordur ve tıpkı ofisimdeki iş arkadaşlarının otobüse mi, yoksa trene mi bindiğimi bilmemeleri gibi, biz de elektronların hangisini yaptığını bilmiyoruzdur. Böylesi bir açıklama, "gizli değişkenler" teorisine uygundur. Parçacıkların ne yaptığına dair son derece normal bir açıklama vardır; sadece biz onu bulamamışızdır.

Kuantum teorisinin ilk dönemiyle özdeşleştirilen Erwin Schrödinger, bu "her şey aynı anda meydana gelir" fikrine katiyen karşı çıkıyordu ve bunun parodisini, o meşhur kutudaki kedi deneyiyle yapmıştı. Deney şöyleydi: Bir kedi, yanında bir parça uranyum ve bir şişe zehirle beraber bir kutuya konmuştur. Uranyum radyoaktiftir ve kutuya bağlı olan bir cihaz radyasyon tespit ettiği takdirde şişenin kırılıp zehrin salınmasını sağlayacak, böylece kedi de ölecektir. Radyoaktif bozunma, kuantum mekaniği yaslarına göre ve nadiren meydana gelir. Eğer kuantum mekaniğini gözeteceksek, her şey aynı anda meydana gelmelidir: Uranyum biraz radyasyon yayar ve kedi ölür; uranyum radyasyon yaymaz ve kedi ölmez. Kuantum mekaniğine göre, kedi aynı anda hem canlı hem de ölüdür ve biz kutuyu açtığımızda bu olasılıklardan biri rasgele seçilmiştir. "Daha makul" bir gizli değişkenler teorisine

göre, kedi başından beri canlı veya ölüdür fakat biz kutuyu açana dek hangisi olduğunu bilmeyiz, o kadar. (Bu elbette sadece bir düşünce deneyidir; kuantum mekaniğinin sınanması esnasında kimse hiçbir kediye zarar vermemiştir.)

1964'te John Bell, "gizli değişkenler" ve "her şey aynı anda meydana gelir" teorilerinin sonuçlarını (kedi değil, parçacıklar kullanarak) karşılaştıran bir deney tasarladı. Çünkü bir fark olabilir: Kentte kuantum otobüs yolculuğu örneğimde, otobüs her olası rotayı keşfeden çeşitli kopyalara ayrılır, bu rotaların bazıları en sonunda birbirini iptal edebilir. Eğer iki otobüs dar bir sokakta kafa kafaya gelirse birbirlerini engelleyebilirler. Bu, yolda bir tek otobüsün olduğu gizli değişken senaryosunda olamaz: Bu senaryoda engelleme meydana gelemez.

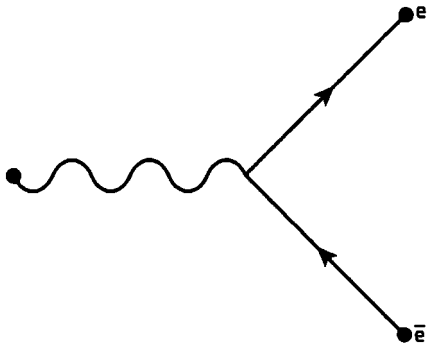
Bell'in fikri, bu olası engellemeyi test etmenin bir yolunu bulmak, eşzamanlı olasılıkların yalnızca kuantum dünyasında meydana gelebilecek şekilde birbirlerine engel olabilmesini incelemekti. Bu fikir birçok kez test edilmiştir ve 2015'in sonlarında yeni bir deneyin sonuçları en sonunda olası bütün boşlukları ortadan kaldırmıştır. Sonuç mu? Kuantum teorisi haklı çıkmıştır. Gizli değişken diye bir şey yoktur. Parçacıklar gerçekten de her olasılığın aynı anda var olduğu ve bazen birbirini iptal ettiği tuhaf kuantum evrelerde var olur. Pratikte, bu tuhaf evreler genellikle yalnızca saniyenin binde birinde ve genelde çok küçük bir mesafede var olur. Asla aynı anda hem canlı hem de ölü olmayacak Schrödinger'in kedisinde olduğundan çok daha küçük bir mesafede. LHC'deki gibi hem çok küçük hem de çok hızlı çarpışmalarda, parçacıklar en tuhaf şekillerde davranır. Örneğin, iki protonun çarpışmasının ve iki elektron üretmesinin pek çok yolu olabilir fakat belirli bir çarpışmada bu olası olaylardan hangisinin meydana geldiğini bilmemizin imkânı yoktur çünkü aslında hepsi her çar-

pışmada meydana gelir. Evren yalnızca rastlantısal olmakla kalmaz, her şeyi aynı anda yapar.

Zamanda yolculuk ve antimadde

Artık elektronların birbirini itebildiğini biliyoruz ve birbirlerine sıyırarak veya sert çarpma olasılıklarını kesin olarak hesaplayabiliyoruz. Bunu, elektronların tek bir foton değiştokuşunda bulunarak geri teptiği basit bir Feynman Diyagramı, iki ya da daha fazla foton değiştokuşunda bulundukları daha karmaşık bir diyagram veya QED'in kurallarına uyan başka bir Feynman Diyagramı kullanarak gösterebiliriz. Bu diyagramlar faydalıdır fakat yalnızca bir özettir. Parçacıklar aslında düz çizgiler boyunca ilerlemek yerine, A noktasından B noktasına uzanan her olası yolu keşfeder. Yalnızca bir veya iki foton değil, her olası bileşimi değiştokuş eder. Yalnızca tüm bu farklı olasılıkları, tüm farklı yolları ve etkileşimleri toplayarak ve onlara aynı anda meydana gelmişler gibi davranarak, elektronlar çarpıştığında ne meydana geldiğine dair gerçekçi bir açıklamaya ulaşabiliriz.

İster inanın ister inanmayın, tüm bu sonuçlara bu bölümün başında bahsettiğimiz o basit Dirac Denklemi'nden ulaşılır. Dirac aynı zamanda bu denklemin başka bir şeyi daha tahmin ettiğini fark etmiştir: antimadde. Bu sonuca matematikle varılır, fakat yine de onu görmenin en kolay yolu Feynman'ın çizimleridir. Sol tarafta elektron ve foton çizgilerinin bir araya geldiği verteks diyagramında, elektron fotonu emer, sağ tarafta ise yalnızca elektron çizgisi vardır. Bu diyagramı alıp onu döndürebilir ve sol tarafta yalnızca gelmekte olan fotonun, sağ tarafta da iki elektron çizgisinin bulunmasını sağlayabiliriz: Biri vertekse doğru gitmekte, diğeri de çıkmaktadır.



Bir elektrona ve bir pozitrona dönüşen
bir fotonu gösteren dönmüş verteks diyagramı.

Bu noktada karşımıza iki problem çıkar. Öncelikle, neden bu diyagramı döndürmekte bir sorun yoktur? Bu resimlerde zaman soldan sağa doğru hareket eder ve pozisyonlar da yukarı ve aşağıdır; dolayısıyla diyagramı döndürerek zaman ve pozisyonun (veya uzayın) anlamını değiştiririz! İşte Dirac Denklemi bu yüzden bu kadar müthiştir. O, Einstein'ın Özel Görelilik Teorisi'yle uyumlu olan ilk denklemdir. Görelilik, bize bütün uzayın ve zamanın göreli olduğunu, mutlak bir referans çerçevesi olmadığını söyler: İnsanlar, göreli hareketlerine bağlı olarak, şeylerin farklı düzenlerde meydana geldiğini görebilir. Bu büyüleyici bir konudur fakat onu başka bir kitaba bırakmamız gerek! Burada ise bize bir Feynman Diyagramının tek değil, çeşitli yönlerde konumlandırılabileceğini, onları döndürmekte bir sorun olmadığını söyler.

Fakat bir başka problem daha vardır. Bir önceki paragrafta, verteksi döndürerek elektron çizgisini hareket ettirdiğimizi görmüştük. Çizgi diyagrama soldan geliyordu fakat şimdi sağdan gelmektedir. Sağdan sola doğru yolculuk etmesi, zamanda geri gittiği anlamını taşır. Feynman Diyagramında bu, bu çizgi boyunca geriye doğru işaret eden yön okuyla betimlenir fakat fiziksel olarak bunun bir anlamı var mıdır?

Zamanda geriye doğru giden negatif elektrik yüklü bir parçacık, zamanda ileri doğru giden pozitif elektrik yüklü bir parçacıkla aynı görünür. Bu tuhaf gelebilir ama negatif elektrik yüklü bir parçacık belirli bir yönde hareket ettiğinde, terk ettiği yer daha az negatif elektrik yükü barındırır (yani daha pozitiftir). Bu adeta bir kum saati gibidir; saati ters çevirdiğimizde kum mu aşağıya akar, yoksa hava yukarı mı akar? Feynman Diyagramında hareket ettirdiğimiz çizgi, artık bir pozitif elektrik yüklü parçacığa, yani bir pozitrona benzer. Bu, antimaddedir.

Her fermiyon parçacığının antimadde versiyonları vardır: Antielektronlar, antikuarklar, o antikuarklardan meydana gelen antiprotonlar. Bu antimaddeler, simgenin üstüne bir çizgi eklenerek (örneğin $\bar{u}$, $\bar{e}$ vs.) ve Feynman Diyagramlarında parçacık zamanda geriye gidiyormuş gibi çizilerek gösterilir. Antimadde tıpkı madde gibi davranır fakat zıt elektrik yükü taşır. Pozitronlar elektronlar gibi hareket eder ve kuantum mekaniğinin diğer bütün tuhaf kurallarına uyar. Tüm bunlara yalnızca halihazırda bildiğimiz QED verteksini döndürerek ulaşırız. Bu döndürülmüş verteks de bize başka bir şey söyler: Soldan gelmekte olan ve bir elektron ile bir pozitrona dönüşen bir fotonumuz vardır. Eğer bir foton yeterince enerjiye sahipse, hem madde hem de antimadde yapabilir.

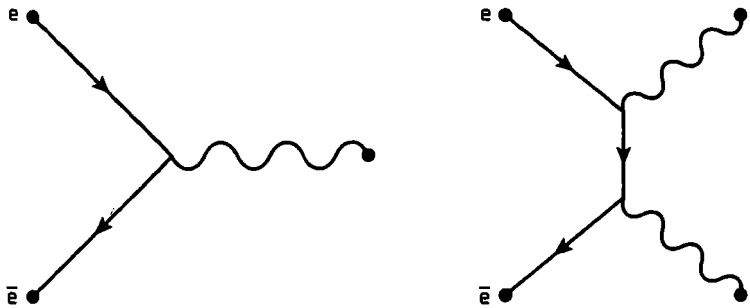
Antimadde yapmak için ne kadar enerjiye ihtiyaç olduğunu bulmak, dünyanın en meşhur denklemi kullanmamızı gerektirir: $E=mc^2$. Bu denklem, Einstein'ın Özel Görelilik Teorisi'nden gelir ve enerji (E) ile kütlenin (m) eşit olduğunu söyler. Diğer sayı (c), ışık hızıdır ve büyük bir sayıya tekabül eder: saniyede neredeyse 300 milyon metre veya saatte bir milyardan fazla kilometre. Bu sayının karesi alınırsa (yani kendisiyle çarpılırsa) denklem epey dengesizleşir: Küçük bir parça kütlenin devasa miktarda enerjiye dönüştürülebileceği

veya küçük bir kütle yapmak için devasa miktarda enerji gerekeceği anlamına gelir.

Bir fotonun bir elektron veya pozitron yapabilmesi için denkleme elektron kütlesinin iki katını (elektron ve pozitron aynı kütleye sahiptir) koymamız gerekir ve ihtiyaç duyulan enerji, bir julün milyonda birinin milyonda birinin onda birine, yani 10^{-13} jule denk gelir (bu kitapta pek çok büyük sayıya yer vereceğimizden, arada bir onları böyle kısaltılmış şekilde kullanacağım; bu kısaltmalara aşina değilseniz, Ek 1'de küçük bir kılavuz bulunuyor). Referans olarak, bir kaloride 4000 jul, bir muzda yaklaşık 100 kalori bulunduğunu belirtelim. Başka bir ifadeyle, genel tablo düşünüldüğünde bu minicik bir enerji miktarıdır fakat bu enerji, tek bir fotonda yoğunlaşmıştır. Bir kişinin bir milyon pounda sahip olması ile bir milyon kişinin her birinin birer pounda sahip olmasının aynı şey olmaması gibi, bu kadar küçük miktarda enerjinin bile tek bir fotonda toplanmış olması onu epey istisnai kılar. Görünür ışığın fotonları, hiçbir şekilde antimadde yapabilecek kadar enerjiye sahip değildir (ve bu muhtemelen iyi bir şeydir). Antimadde elektronlar yapmak için, görünür ışığın, ultraviyolenin, X-ışınlarının ötesine gitmeli, bildiğimiz en yüksek enerjili fotonlara, yani gama ışınlarına çıkmalıyız. Zaten bu yüzden, yani yapılması zor olduğu için antimadde 1932'ye dek keşfedilmemiştir!

Bir fotonun madde ve antimaddeye dönüştüğü bu verteks diyagramını diğer tarafa da döndürebiliriz. Bunu yaptığımızda, bir elektron ile pozitron bir araya gelerek yüksek enerjili foton olan bir gama ışını içinde "imha olur". Bu, medikal görüntülemede kullanılan pozitron emisyon tomografisinin (PET) temelindeki prensiptir: Bazı radyoaktif maddeler pozitronlar yayar ve böylesi bir maddenin (tamamen güvenli) bir dozu hastaya enjekte edilir. Pozitronlar, hastanın vücudundaki atomlarda elektronlarla buluştuğunda imha olarak gama

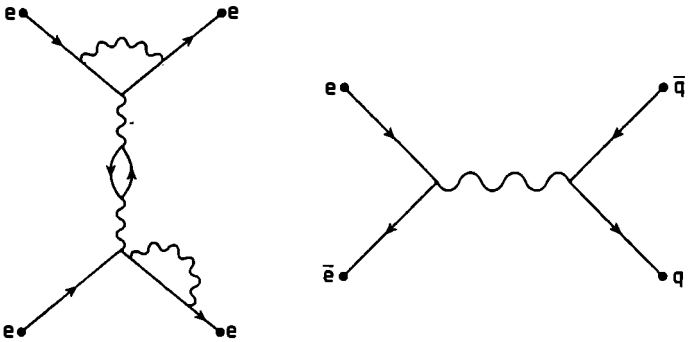
ışınları oluşturur; esasen bunlardan iki tane üretilir ve hastanın dışına çıkarak ters yönlere fırlar, böylece de ölçülebilirler. Gama ışınlarını takip etmek, enjekte edilen maddenin nerede olduğuna dair bir görüntü üretir, bu da doktorlara vücuttaki kan akışı hakkında bilgi verir. Bu, başka türlü elde edilmesi neredeyse imkânsız olan bir teşhis bilgisidir.



Bir foton üretmek üzere imha olan bir elektron ile pozitronu göstermek için verteksin tekrar döndürülmesi. Sağda, bir elektron ile bir pozitron gama ışınlarına dönüşünce PET taramasında oluşan tepki görülüyor.

Bu döndürülmüş verteks, aynı zamanda daha karmaşık Feynman Diyagramlarına, döngüler içeren diyagramlara da yol verir. Bir foton geçici olarak bir parçacık ve antiparçacık çiftine dönüşebilir. Elektronlar geçici olarak bir foton yayabilir, kısa süre sonra da onu yeniden emebilir. Bu döngüler, Feynman Diyagramları daha da karmaşıklaştıkça (NLO –yakın baskın mertebe– ve ötesi diyagramlar gibi) ortaya çıkmaya başlar. Başa çıkması çetrefilli bir iş olan bu döngüler, 1930'larda kuantum mekaniğini daha doğru düzgün başlamadan bitirmenin kenarından dönmüştür. Bu meseleye Dokuzuncu Bölüm'de geri döneceğim.

Antimadde, kuantum mekaniğinin bir öngörüsüydü. Sadece denklemlerde çıkar ve onun gerçek bir şey olarak ciddiye alınıp alınmaması gerektiği, evrende gerçekten var olan bir şey mi, yoksa matematikte görmezden gelinebilecek tuhaf



Döngüleri gösteren karmaşık bir Feynman Diyagramı.
Sağda, LEP'te kuarklar ile antikuarklar oluşturmak için elektronlar
ile pozitronların çarpıştırılması görülüyor.

bir şey mi olduğu bir süre net değildi. Günümüzde ise antimadde sıradandır: Büyük Hadron Çarpıştırıcısı, parçacıkları pozitron yapmak için gereken enerjinin birkaç milyon katı kadar büyük bir enerji seviyesine ulaşacak kadar hızlandırır ve neredeyse iki proton ne zaman çarpışsa antimadde üretilir. Elektronlar ve pozitronlar çok aleladedir ve öyle benzer biçimlerde davranırlar ki, ikisine de "elektron" der geçeriz. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndan önce CERN, elektron ve pozitronları çarpıştıran bir parçacık hızlandırıcı olan LEP'in (Large Electron-Positron Collider, Büyük Elektron-Pozitron Çarpıştırıcısı) yuvasıydı ve oradaki etkileşimler, madde ile antimaddenin imha olarak yüksek enerjili bir foton oluşturmasını içeriyordu; bu foton daha sonra yeniden madde ve antimaddeye dönüşürdü. Fakat sondaki parçacıklar, baştaki parçacıkların aynısı olmak zorunda değildir: Örneğin bir kuark ile antikuark olabilir. Bu çarpışmalarda, madde ile antimadde, bir foton formunda enerjiye dönüştürülür, bu foton daha sonra farklı parçacıklara, çarpışmadan önce var olmayan farklı bir madde formuna dönüşür. Bu, iki porselen vazoyu birbirine vurup kırmak ve iki tost makinesinin ortaya çıktığını görmeye benzer. Bizim deneyimlediğimiz şekliyle

dünyada ona paralel bir şey yoktur. QED tüm bu etkileşimleri öngörür ve iyice kavrar. Hatta bugün antimaddede bize tuhaf gelen tek şey, evrende ondan hiç kalmamış gibi görünmesidir. Fakat bu konuyu ilerleyen sayfalara bırakalım!

Geliştirilmiş en kusursuz bilimsel teori

Bir parçacık fizikçisi parçacıklar üzerinde nasıl düşünür? Cevap: Genellikle Feynman Diyagramlarıyla, yani parçacıkların nasıl davrandığını öngören matematiğin çizim olarak temsilleri aracılığıyla düşünür. Bu diyagramların yalnızca üç temel bileşeni vardır: Düz çizgiler, dalgalı çizgiler ve bir verteks (yani bir araya gelen iki çizgi). Bu üç bileşeni birleştirerek parçacıkların tüm olası etkileşim biçimlerini çizebiliriz. Bu diyagramlar daha sonra doğrudan bize sonucu söyleyen denklemlere çevrilebilir. Bunlar, aynı zamanda tüm doğal güçler ile tüm parçacık etkileşimlerini anlamak için bize temel bir şablon sunar. Ve genel olarak, yani belirli bir süreç için fazladan çizgi kullanmadan, çizebileceğiniz en basit diyagram olan "Baskın Mertebe" diyagramı, neler olduğuna dair epey isabetli bir kestirim sunar. Gelgelelim, hikâye bundan ibaret değildir; bir de o tuhaflık vardır: Yani her şeyin aynı anda meydana gelmesi ve parçacıkların zaman içinde ileriye ve geriye yolculuk edebilmesi. Bütün bunları kabul ederseniz, QED bilim tarihindeki en isabetli öngörüleri yapmakta kullanılabilir.

QED'in temellerini öğrenmenin parçacık fiziğindeki en heyecan verici ve hatta güzel şeylerden biri olduğunu gördüm. Bu çok basit fakat aynı zamanda çok güçlü bir şeydir. Fakat tüm bunlar bize bizzat parçacıklar hakkında ne söyler? QED onların nasıl davrandığını betimler fakat esasen ne olduklarını söylemez. Ve görünüşe bakılırsa, parçacıklar farklı biçimlerde davranır. Uzun mesafeler ve süreçlerde, katı kitleler, küçük

misketler gibi davranırlar. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda olduğu gibi kısa mesafeler ve süreçlerde ise bahsettiğim kuantum tuhaflığını sergilerler. Bir sürü kopyaya bölünür, tüm yönleri keşfe çıkarlar. Peki, temel olarak, bir parçacık nedir? İşin sonunda, bizi yönlendirmesi için yalnızca matematiğe sahibiz çünkü bir parçacığı doğrudan görmemiz imkânsızdır. Bu bir restorana gidip, mutfağa bakmamıza veya tarifi görmemize izin verilmeden, bir yemeğin nasıl pişirildiğini tahmin etmeye çalışmak gibidir. Sadece çorbayı tadabiliyoruz, belirli bir an içinde belirli bir parçacığı ölçebiliyoruz; malzemeleri, yani kuantuma has tuhaflıklar yapan parçacıkları göremiyoruz.

Kuantum mekaniğinin matematiği, onları ölçmediğimiz sırada parçacıkların ne yaptığının gerçek, olgusal bir tanımlaması mıdır? Eh, onu yok sayamayacağımız kesin. Kuantum mekaniği evrenin sahip olduğumuz tek işler durumdaki tanımıdır. İnanılmaz derecede isabetlidir ve şimdiye kadarki tüm deneysel testler, onun tahminlerini doğrulamıştır. Parçacıkların uslu durduğu, ikizler üretmediği ve zamanda geriye gitmediği o eski, kolay tabloya geri dönüş artık imkânsızdır. Ayrıca biz parçacıkların kuantum mekaniğinin tahmin edemediği şeyler yaptığını gözlemleyene dek, bunun doğru tarif olmadığını düşünmemiz için bir neden yoktur.

Nasıl bakarsak bakalım, temel parçacıklar esasen tuhaf şeylerdir. Kuantum mekaniğinin onların esasen olduğu şeyin iyi, işleyen bir kestirimi olması da elbette mümkündür. Ancak şimdilik, kuantum mekaniği bize bilmemiz gerekeni, yani bir deneyin olası sonuçlarını söyler. Üstelik bunu öyle güzel yapar ki. O olmasaydı, lazerlerimiz, LED'lerimiz veya yarı iletkenlerimiz olmazdı; dolayısıyla bilgisayarlarımız, akıllı telefonlarımız veya başka modern elektronik aletlerimiz de olmazdı. MR (manyetik rezonans görüntüleme) tarayıcıları, PET tarayıcıları olmazdı. İnsanlar artık kuantum bilgisayar,

kuantum kriptografi, spintronik, dolaşıklık, kuantum ışınlama gibi teknolojiler geliştiriyor ve daha sayısız başka uygulama da icat edilebilir. Kuantum mekaniği, bazı sıra dışı deney sonuçlarını anlamaya çalışan birkaç fizikçiyle başlamış olabilir fakat bugün hayatlarımız için elzemdir. Onun tuhaf olduğu gerçeğinden kaçmak imkânsızdır fakat kuantum mekaniğindeki kavramsal sorunların çoğu, matematiğin aslında ne anlama geldiğini, ölçemediğimiz şeyler, perdenin arkasındaki olaylar hakkında bize söylediklerini fazla yorumlamaya çalıştığımızda ortaya çıkar. Tüm teorilerde olduğu gibi, gerçeklikten fazla uzaklaşmamaya çalışmak önemlidir: Kuantum mekaniği, deneyler bize parçacıkların bu şekilde davranıyor olması gerektiğini söylediği için icat edilmiştir ve deneyler bize bunun aksini söyleyene dek, kuantum mekaniği en iyi parçacık teorimiz olmayı sürdürecektir! Böylece bir sonraki durağımıza ulaşmış oluyoruz. Şimdi elektronların nasıl davrandığını ölçen, yeni ve egzotik parçacıkların kocaman dünyasını bize açarak Standart Model'e, Higgs bozonuna ve Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'na yol veren deneyleri keşfe çıkacağız.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

MADDENİN KALBİNE YOLCULUK

Evren epey tuhaf bir yerdir; gördüklerinize inanamayabilirsiniz, inansanız da anlayamayabilirsiniz. Dünyanın atomlardan meydana geldiği veya atomların bir çekirdeğin etrafında dönen elektronlardan meydana geldiği aşikâr değildir. Bu elektronlar, yani tanıştığımız ilk temel parçacıklar, bazen küçük misketler, bazen dalgalar, bazen de hayal edemediğimiz başka şeyler gibi davranırlar. Birbirlerine fotonlar ateşleyerek etkileşim kurarlar. Yaratılabilir, yok edilebilirler ve bir antimadde kopyaları, yani pozitronları olabilir. Elektronlar hakkında tüm bunları nereden biliyoruz? Hemen hemen diğer pek çok şeyi bildiğimiz gibi: Onları ölçmenin bir yolunu bularak.

Bugün parçacık fiziğinin altın çağını yaşıyor olsak da, bilimin acı verici yavaşlıkta ilerlediği gerçeğinden kaçış yoktur. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki veriden anlamlı bir ölçüm elde etmek aylar, hatta yıllar sürebilir ve bir fikri bir sonuca dönüştürmek ise genellikle ilham ve kararlılığın bir karışımıdır. Gelgelelim, Isaac Newton'ın söylediği gibi, devlerin omuzlarında durarak, daha önce yapılan tüm çalışmaları kaldıkları yerden devam ettirerek biraz daha öteyi görebiliyoruz. Buna karşın, her sonuç bilimsel olarak ilginçtir ve

bazıları elbette diğerlerinden çok daha ilginçtir! Bu bölümde anlatacaklarımız, parçacık fiziğinin tarihindeki en önemli deneyler ve ölçümlerin bazılarının hikâyesidir. Eskiden bir masanın üzerini ancak dolduran cihazların, bugün kullandığımız kocaman araştırma laboratuvarları ve devasa detektörlere dönüşmesinin hikâyesidir. Bu deneylerle yapılan keşiflerin dünya algımızı tamamen değiştirmesinin hikâyesidir. Ve doğanın bizi hiç durmaksızın şaşırtmasının hikâyesidir.

Parçacıklardan önce fizik gelir

19. yüzyılın sonunda, bilim tamamlanmış gibi görünüyordu. Önceki birkaç yüzyıl süresince, dünyadaki hemen her şey için bir açıklama veya bir denklem bulunana dek bir dizi fikir inşa edilmişti: Gezegenlerin hareketi, ışık ve elektromanyetik dalgalar, minicik, katı atomların bildiğimiz evreni inşa etmesi. Bu fikirler, artık klasik fizik olarak bilinir.

Klasik fiziğin kurucu metinlerinden biri, Isaac Newton'ın 1687'de basılan *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Doğa Felsefesinin Matematiksel İlkeleri*) veya kısaca *Principia* eseridir. Bu eserde Newton, Hareket Yasalarının, yani cisimlerin nasıl hareket ettiğinin, itildiklerinde, çekildiklerinde veya herhangi bir kuvvete maruz kaldıklarında neler olduğunun kesin bir matematiksel betimlemesini yapar. Tabloya yeni bir kuvvet de katar: kütleçekimi. Bugün kütleçekimini verili bir gerçek gibi kabul ederiz fakat aslında bir ağaçtan düşen bir elma ile sadece gökyüzünde birkaç küçük benek gibi görünen gezegenlerin hareketleri arasında bağ kurmak, kesinlikle büyük bir kavramsal sıçramadır. Newton bu yasalara ulaşmak için yeni bir tür matematik keşfetmek zorunda kalmıştı: Kalkülüs. (Kalkülüs, Newton ile aynı dönemde ve Newton'dan bağımsız olarak Alman matematikçi Gottfried Leibniz tarafından da keşfedilmiştir –sonraki sayfalarda gö-

receğimiz gibi, bilim tarihinde böyle bir örüntü mevcuttur, yani bazı icat ya da keşifler birbirlerinden bağımsız olarak çalışan iki bilim insanı tarafından aynı anda yapılmıştır– ve bugün kullandığımız matematiksel işaretler onun geliştirdiği işaretlerdir). "Yasa" sözcüğünün kullanılması, bu fikirlerin zamanında ne kadar baş döndürücü olduğunu gösterir. Etrafımızdaki kafa karıştırıcı, dağınık dünyayı sadece bir avuç basit denkleme dönüşecek şekilde damıtmayı başarmak; bu muhakkak bize derin ve doğru bir şeyi, doğanın bir yasasını söylemektedir.

Buna karşın Newton, ardıllarına yapacak bir sürü iş bırakmıştır. Termodinamik Yasaları, 18. yüzyılda Sanayi Devrimi'nden sonra ortaya çıkarak entropi ve iş kavramlarını ortaya koymuş, yani daha basit bir ifadeyle, bir buhar makinesinden ne kadar faydalı enerji alınabileceğini açıklığa kavuşturmuştu. Kimya da bu dönemde ciddi bir ilerleme kaydediyordu. Her şeyin atomlardan oluştuğu fikri geniş olarak kabul ediliyordu ve atomların minik, sert toplar olduğu düşünülüyordu. Farklı kimyasal elementlere denk gelen pek çok farklı atom türü keşfedilmişti ve 1869'da Dmitry Mendeleev, genel olarak kabul gören ilk periyodik cetveli yayınlamıştı. Bu cetvel, bilinen elementleri kimyasal benzerliklerine göre gruplara ayırıyor ve boşlukları dolduracak, henüz keşfedilmemiş elementleri tahmin ediyordu. Bu çizelgenin modern versiyonlarına artık her fen sınıfında rastlanabilir.

Son olarak, manyetizma ve statik elektrik fenomenleri vardı. Aslında binlerce yıldır bilinmelerine karşın, 1820'lerde Michael Faraday bu ikisinin bağlantısını sergileyen bir dizi müthiş deney yaptı. James Clerk Maxwell bu deney sonuçlarına dayanarak 1862'de kendi elektromanyetizma teorisini inşa etti. Bu neden bir "yasa" değil de, bir "teori"dir? Maxwell denklemlerini evrenin işlemesini sağlayan gerçek kurallardan ziyade bir model, bir dünya betimlemesi olarak gördü.

Ama öyle bir betimleme ki! Teorisi, elektrik ile manyetizmayı dört kısa denklemde birleştirdi ve elektromanyetik dalgaların varlığını tahmin etti: Bu dalgalar radyo dalgaları, görünür ışık, gama ışınları ve aradaki her şeye denk gelen elektrik ve manyetizma dalgacıklarıydı. Yalnızca Maxwell'in dalgalarına çok yakından bakınca bunların aslında, parçacıklardan, fotonlardan oluştuğunu görürüz.

Klasik fizik, Einstein Maxwell'in elektromanyetizması ile Newton Yasaları arasındaki bazı tutarsızlıkları çözdüğünde zirve noktasına ulaşarak, 1905'te Özel Görelilik Kuramı'na, 1915'te de Genel Görelilik Kuramı'na, yani bugün de kullandığımız kütleçekim teorisine yol verdi. Fakat artık kuantum devrimi çoktan başlamıştı ve fiziksel dünya hakkında bilinen her şey altüst olmak üzereydi. Bizzat Einstein da 1905'te fotonlarla ilgili ilk makalesiyle bunda kilit bir rol oynamıştır; gerçi sonraları klasik fiziğin güzel dünyasının yerine kuantum mekaniğinin rastlantısallığının gelişini asla tam anlamıyla kabul edememiştir.

Kimse bunun olacağını tahmin edememişti. 19. yüzyılın sonunda fizikçilerin önünde cevap bekleyen sadece birkaç ufak tefek detay vardı. Kesinlikle bir devrimin ufukta olduğuna dair bir belirti yoktu. Fakat bilimsel ilerlemeler genellikle yeni teknolojilerin itici gücüyle kaydedilir ve yeni deneyler, bu ufak tefek detayların gereğince incelenmesine izin verir. Klasik fiziğin ucundan sarkan birkaç iplik çekilince gerisi çorap söküğü gibi geldi ve ortaya çıkan boşluğu doldurmak üzere kuantum mekaniği ile parçacık fiziği geliştirildi. Teorik fiziğin yetişmesi de 1960'ların sonunda, Standart Model en sonunda deneylerin ölçtüğü şeyin tam bir betimlemesini sunmayı başardığında gerçekleşti. Standart Model, günümüze dek büyük oranda bozulmadan ulaştı çünkü tahminleri ardı sıra yapılan deneylerle onaylandı ve Higgs bozonunun keşfiyle beraber zirve noktasına ulaştı. Fiziğin öyküsünün bir

yüzyıldan uzun süren, buluş ve içgörülerle dolu bir bölümü bitti, neredeyse her evin salonuna bir parçacık hızlandırıcısının girmesiyle bir başka bölümü başladı.

Esrarengiz ışınlar

Modern televizyon epey büyüleyici bir şeydir: Parlak renkleri vardır, yüksek çözünürlüklüdür ve en önemlisi de çok ince ve hafiftir. Her zaman böyle değildi. Bir zamanlar kocaman, hantal, ağır bir aygıttı ve havasının büyük kısmı alınmış mühürlü cam bir ünite olan katot ışını tüpü (CRT) içeriyordu. Tüpe elektrik verilince ekranda bir parlaklık beliriyordu ve modern (veya en azından 20. yüzyıl ortasına ait) elektronik aygıtlarda bu parlaklığın bir belirip bir kaybolması sağlanabiliyor ve böylece hareket eden bir görüntü elde edilebiliyordu.

CRT'nin selefleri 19. yüzyılda yapılıyordu ve epey küçük, hassas şeylerdi. Bu vakum tüplerini geliştirmek, cam üfleyicilerin ve alet yapımcılarının yeteneklerine yetenek kattı fakat 1870'lerde William Crookes modern bir floresan lambaya benzeyen bir tasarımı mükemmelleştirdi. Bu Crookes tüpleri, bir elektrik güç kaynağına bağlandığında net olarak görülen bir parlaklık üretti ve bunun tüpün negatif voltajlı ucundan (katot) çıkan ve uçarak diğer uca çarpan bazı "ışınlar"dan kaynaklandığı düşünüldü. Bu ışınlar her neyse, ya büsbütün görünmez ya da çıplak gözle kolay kolay görülemeyecek kadar küçük olmalılardı. Bunlar Maxwell'in elektromanyetik dalgalarından biri miydi? Bir molekül müydü? Bir atom muydu? Hiç kimse bilmiyordu fakat devrimi başlatan ilk gelişme oldukları kesindi.

1895'te Alman fizikçi Wilhelm Conrad Röntgen bir Crookes tüpüyle deneyler yaparken bir şey dikkatini çekti. Bazı koşullar altında, farklı tür bir ışın tüpten çıkıyor ve laboratuvarında uçuyordu. Katot ışınının aksine, bu yeni ışınlar aynı

zamanda bazı malzemelerin içinden doğruca geçip gidebiliyor, hatta (19. yüzyıldaki laboratuvarlarda standart ekipman olan) bir fotoğraf plakasında iz bile bırakabiliyorlardı. Röntgen, onların deri ve kas gibi hafif maddelerin içinden geçebildiğini fakat kemik gibi yoğun maddelerin içinden geçemediğini fark etti. Karısının elini yeni bir fotoğraf plakasının önüne koyup ekipmanı çalıştırdı, böylece plakanın el kemiklerinin arkasında kalan kısımları hariç tümü ışınlara maruz kaldı. Bu iskelet fotoğrafını gördükten sonra karısı, "Ich habe meinen Tod gesehen!" ("Ölümümü gördüm!") demiştir. Pek çok ülkede bu ışınlardan hâlâ röntgen ışınları olarak bahsedilir ve artık onların yüksek enerjili fotonlar olduklarını biliyoruz. Ancak kendisi için bu ışınlar gizemli şeyler olduğundan Röntgen onlara matematikte bilinmeyen değerleri ifade eden X simgesinden yola çıkarak "X-ışınları" ismini vermişti.

Ertesi yıl, yani 1896'da Fransız fizikçi Henri Becquerel bazı uranyum tuzlarının da gelişigüzel biçimde, aynı şekilde fotoğraf plakalarında görüntüler bırakabilen başka türlü ışınlar yaydığını keşfetti. Marie ve Pierre Curie daha sonra aynı şekilde ışınlar yayan, büsbütün yeni elementler keşfetti ve inceledi. Marie, bu fenomene "radyasyon" (ışıma) diyordu. Bu, insanların dikkatini çekmeye başladı ve ışınlar gitgide daha fazla yerde belirmeye başlasa da, hâlâ aslında ne olduklarına dair net bir düşünce yoktu.

Daha sonra 1897'de Joseph John Thomson bir Crookes tüpü kullanarak katot ışınlarının bir dizi ölçümünü gerçekleştirdi. Katot ışını tüplerinden havanın büyük kısmı çıkarılmış olsa da, içeride hâlâ zıplayarak gezen bir sürü atom vardı. İşin zor yanı, katot ışınlarının nasıl yön değiştirmeden tüp boyunca seyahat edebildiklerini çözmekti. Thomson, onların parçacık olmaları gerektiğini fark etti ve tıpkı iş çıkışı trafiğinde zikzaklar çizerek ilerleyen bir bisikletçi gibi, bir atomdan çok ama çok daha küçük olmalılardı. Thomson, bu minik parçacıkla-

ra "cisimcik" (korpüskül) ismini verdi fakat kullanıma giren isim "elektron" oldu. O zamana dek, atomların katı ve bölünemez oldukları düşünülüyordu: Onlar evrenin en küçük yapıtaşlarıydı. Fakat Thomson, katot ışınlarının çok daha küçük olduklarını ispatladı.

O sıralar Thomson Cambridge Üniversitesi'nde profesördü ve öğrencileri arasında, Becquerel tarafından keşfedilen ışınları incelemeye başlayan genç bir Yeni Zelandalı, Ernest Rutherford vardı. Rutherford bu ışınların aslında iki farklı parçacık türü olduğunu fark etti ve onları "alfa" ve "beta" olarak isimlendirdi. Onların ayrıca durdurulmadan önce farklı miktarlarda maddenin içinden geçebildiklerini gördü. Artık alfa parçacıklarının bir atom çekirdeğinin parçaları, beta parçacıklarının da elektronlar olduğunu biliyoruz. Fakat o sıralar hiç kimse atomların bir çekirdeği olduğunu bile bilmiyordu. Hâlâ, ya kaskatı ya da, içi Thomson'ın elektronlarıyla dolu, "fındıklı çikolata" gibi sert bir kitle oldukları düşünülüyordu.

1909'a gelindiğinde Rutherford bir Nobel Ödülü kazanmıştı ve Manchester Üniversitesi'ne geçerek, Hans Geiger ile Ernest Marsden'in tasarladığı, bu alfa parçacıkları bir altın folyoya ateşlendiğinde neler olacağını test eden bir deneyi idare etti. Bu parçacıkların pek çoğu beklendiği gibi dosdoğru folyonun içinden uçup geçti fakat detektörü folyonun diğer tarafına götürdüklerinde, bazılarının folyodan sektiğini fark ettiler. Birkaç alfa parçacığı çok ağır bir şeye çarpıyordu. Çarptıkları şey, bu kadar az alfa parçacığının etkilendiği düşünülürse çok küçük olmalıydı. Bu, "fındıklı çikolata" atom modelinde meydana gelmemeliydi ve Rutherford, atomun Birinci Bölüm'de bahsettiğim güneş sistemine benzemesi gerektiği sonucuna vardı. Merkezinde küçük, ağır bir çekirdeği vardı ve etrafında elektronlar dönüyordu. Bir çekirdeğe çarpan birkaç alfa geri zıplıyordu, çoğu ise hiç yön değiştirmeden elektron bulutunun içinden uçup geçiyordu.

Rutherford'ın atom modeli, deneyde görülen şeye uyuyordu fakat klasik fizik tarafından açıklanamazdı. O sıralar bilinenlere göre, bu güneş sistemi modeline uyan atomların var olmaması gerekirdi çünkü bir elektron çekirdeğin etrafında saniyenin binde kadar bir hızla sarmal çizerek dönüp çekirdeğin üzerine düşer ve bu sırada bildiğimiz dünya da dahil olmak üzere her şey çökerdi. Ne var ki, kanıtlar netti ve kararlı elektron yörüngelerini açıklamak, atomaltı parçacık fiziğinin baştan yazılmasını gerektiriyordu. Bu durum, önceki bölümde karşılaştığımız tuhaf davranışlara kapıyı sonuna dek açıyordu. Kuantum devrimini hepsinden çok Geiger-Marsden Deneyi tetiklemiştir.

Kutudaki bulutlar

Parçacık fiziğinin tarihinde belki de en önemli deneysel ekipman cihazı, aynı zamanda en olasılıksız görünenidir. Şu her üniversite ve araştırma laboratuvarının rüyasıdır: Zeki insanları bir araya getirirseniz, müthiş ve beklenmedik şeyler meydana gelir. Bu durumda, böylesi bir şey, Thomson'ın laboratuvarında bir başka öğrencinin, Charles Thomas Rees (C. T. R.) Wilson'un başına geldi. Wilson okul sıralarında, özellikle de meteoroloji ilgisini çekene dek, bir hekim olmayı planlıyordu. 1893'te bulutların güzelliğinden büyülendiği Ben Nevis dağının zirvesindeki gözlemevinde vakit geçiriyordu. Oradayken Wilson'ın çoğu deneysel bilimcinin düşündüğü bazı şeyleri düşündüğünü tahmin edebiliyorum. Bu, laboratuvarda daha kolay oluşturulamaz mıydı? Cambridge'e dönünce, bir bulut makinesi yapmaya girişti.

Bulutlar tıpkı buhar gibi su damlalarından, sıkışarak gazdan sıvıya dönüşen sudan meydana gelir. Bu genellikle buharlaşmış su soğuk havaya çarptığında meydana gelir; tıpkı nefesinizin dondurucu bir günde buharlaşması gibi. Gökyü-

zündeki bulutlar genellikle belirli bir yükseklikte meydana gelir çünkü o yükseklikte farklı sıcaklıktaki hava katmanları, soğuk bir katmanın üstüne daha sıcak bir katman gelecek şekilde buluşur ve bu sınırdan geçerek yukarıya çıkmak genellikle bir uçak yolculuğunun en sallantılı kısmıdır.

Laboratuvarda bir bulut yapmak için Wilson havaya büyük miktarda nem uçurdu, sonra havayı nemin yoğunlaşabileceği şekilde hızla soğuttu. Bunu sıcaklığı hızla düşürerek başardı. Benzeri bir etki, bir sprey tüpünü sıkarken de olur: İçindekiler tüpün içinde yoğunlaşır, sonra sıkıldığında genişler ve hızla soğur. Bunu gerçekleştirmek için Wilson, bir pistona bağlı mühürlenmiş bir cam kaptan oluşan bir "bulut odası" yaptı. Kabın içindeki hava suyla doygun hale getirildi, pistonu dışarıya doğru hızla hareket ettirip havayı yayarak soğuttu ve odada kısa süreliğine bir bulut belirmesine yol açtı. Üstelik bunların hepsi bir masaya sığabilecek kadar az yer kaplıyordu.

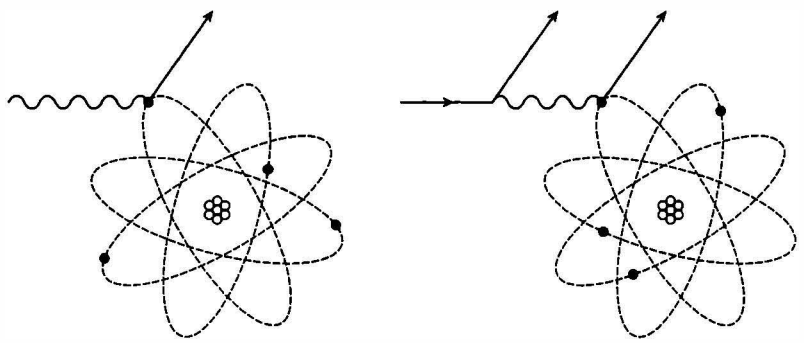
Gelgelelim Wilson, tek başına soğumanın yeterli olmadığını fark etti. Yoğunlaşmanın bir tetikleyiciye ihtiyacı vardı. Benzeri bir etki, köpüklü içeceklerde de görülür. Sıvıda çözünen karbondioksit gazı hemen kaçmaz, bunu yapmak için bir tetikleyiciye ihtiyacı vardır. İçeceğe bir miktar tuz atarsanız bu tetikleyici görevi görür. Karbondioksit molekülleri kristalin etrafına birikir ve bir dizi kabarcık bırakır. Atmosferdeki bulutlar için tetikleyiciler, genellikle minicik toz taneleridir ve su molekülleri, bir damlacık oluşturacak kadar birikene dek, bu tanelerin etrafına yığılır. Bulutun Wilson'ın odasında oluşması için bir tetikleyici olması gerekiyordu. Deney sırasında Wilson tüm toz ve kirlilikleri yok etmek için havayı arıtmaya çalıştı. Bu koşullar altında bulut oluşmasını beklemiyordu ve bir muammayla karşılaştı. Bulut yine de ortaya çıkıyordu. Peki, suyun yoğunlaşmasını sağlayan tetikleyici neydi?

İşte bulutlardan parçacıklara da böyle geliriz. J. J. Thomson'la aynı laboratuvarda çalışan Wilson, ışınlar ve radyasyon üzerine süren çalışmalardan haberdardı ve bunların bulut için tohumlar sağlayabileceğini düşünüyordu. Odayı bir X-ışını kaynağının yanına koyarak bunu doğruladı. Bunu yaptığında çok daha yoğun bir bulut oluştu. Wilson ertesi on yılı gerçek bulutları inceleyerek geçireceği için, bu keşif hiçbir yere çıkamazdı. Fakat 1911'de tasarımını, tek başına parçacıkların odada uçarken tıpkı gökyüzündeki uçakların izlerine benzeyen buhar izleri bıraktığını görmesinin mümkün olduğu bir noktaya kadar geliştirmeyi başardı. O sıralar hiç kimse, bir atomaltı parçacık şöyle dursun, bir atomu bile direkt olarak görmemişti; dolayısıyla Wilson bulut odasında görmekte olduğu izlerin fotoğraflarını yayınladığında, bu bir keşif olarak karşılandı.

Parçacıkları görmek

Ulaştığımız noktada esasen neler olduğunu açıklamak önemlidir çünkü bu hemen her modern parçacık detektörünün ardında yatan temel ilkedir. Artık tüm bu ışınların ne olduğunu biliyoruz: X-ışınları yüksek enerjili fotonlar, alfa parçacıkları atom çekirdeklerinin parçaları, katot ışınları ile beta parçacıkları da elektrondur. Bu ışınlar havada hareket ederken, havadaki bazı atomlara çarpma eğilimi gösterir. Atomlar çoğunlukla minik bir çekirdek etrafında dönen kocaman bir elektron bulutuysa, çarpılan genellikle elektronlardır.

Önceki bölümde, X-ışını gibi bir fotonun bir elektronla karşılaştığında neler olduğundan bahsetmiştim: Elektron onu emer ve bir enerji şoku alır. Bu şok, genellikle atomu iyonlaştırmak için yeterlidir. Elektronu yörüngesinden çıkararak serbest bir negatif elektrik yüklü elektron ile bir pozitif yüklü atom veya iyon bırakır.

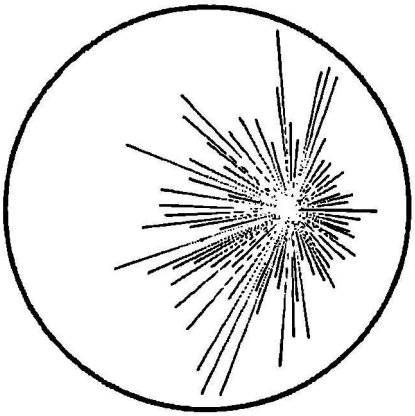


Solda, bir atomun X-ışınlarıyla iyonlaşması;
sağda, yüklü bir parçacığın X-ışınlarıyla iyonlaşması.

Katot ışınlarındaki hızlandırılmış elektronlar gibi elektrik yüklü parçacıklarda da benzeri bir şey meydana gelir. İki elektron çarpıştığında ne olduğunu zaten biliyoruz: Bir (veya daha fazla) foton değiştokuşunda bulunurlar ve birbirlerinden uzaklaşırlar. Yüksek hızda hareket eden elektrik yüklü parçacıklar yolculuk ederken tıpkı yuvarlanarak lobutları deviren bir bovling topu gibi, atomların pek çok elektronunu devirebilir. Bir X-ışını fotonu tüm enerjisini tek bir elektrona verir fakat bir alfa veya beta parçacığı, enerjisi bitene dek uçarak, ardında bir dizi iyonlaşmış atom bırakır.

Bu iyonlaşma, Wilson'ın ilk odasındaki buluta yol açan tetikleyiciydi. Su molekülleri, iyonların etrafında toplanmış, en sonunda su damlacıkları oluşturmuştu. 1911 tarihli yenilenmiş modelde, Wilson, koşulları elektrik yüklü parçacıkların bıraktığı iyonlaşma izi boyunca oluşan ayrı su damlacıklarının izlerini tespit etmeye yetecek şekilde kontrol edebilmişti.

Soğutmayı sağlaması için bir piston yerine kuru buzlu boş bir akvaryum kullanarak düşük bütçeli bir bulut odası yapmak mümkündür ve bu benim en sevdiğim parçacık fiziği deneylerinden biridir (siz de bazı parçacıklar görmek isterseniz, internette bunu nasıl yapacağınıza dair pek çok kılavuz bulunmaktadır). Elektrik yüklü parçacıkların bırak-



Radyoaktif bir kaynaktan gelen parçacık izlerinin
Wilson'un bulut odasındaki görünüşü.

tığı su damlacığı izleri, incecik örümcek ipleri gibi görünür ve birkaç saniye bir bulut içinde süzüldükten sonra kaybolur. Wilson'ın çektiği ilk parçacık izi fotoğrafları, şimdi Royal Society'deki arşivdedir ve bugün bir kuru buzlu bulut odasında görebileceklerinize alabildiğine benzer.

Wilson'ın parçacık izi fotoğrafları, kuantum teorisinin ilk dönemlerinde bir zorluk ortaya çıkarmıştır. Bilhassa Heisenberg parçacıklara bir tür matematiksel soyutlama, asla doğrudan gözlemlenemeyecek bir şey olarak yaklaşmıştı. Fakat işte şimdi buradalardı; minik misketler gibi yuvarlanıyor, giderken arkalarında izler bırakıyorlardı. Bu bulgu kuantum teorisinde nereye oturuyordu? Tabii bu izler aslında göründükleri gibi değillerdi. Bir parçacığın kesintisiz izi değil, esasen bir parçacık ile farklı atomlar arasında bir dizi çarpışmaydı. Bu çarpışmalar, birbirlerinden bir milimetrenin binde biri uzaklıktayken meydana gelebilir fakat bir parçacık için bu devasa bir mesafedir; bir şeye çarpmadan önce bir kilometreyi aşkın mesafe giden bir golf topu gibidir. Birkaç santimetre uzunluğunda bir ize baktığımızda, parçacıklar gerçekten de uslu, katı şeyler gibi görünür. Fakat bunun nedeni, kuantuma has

tuhaflığın ancak çok daha küçük ölçeklerde, çarpışmalar arasındaki kocaman boşluklarda meydana gelmesidir.

Bulut odası yıllar boyunca parçacıkları görmenin tek yolu oldu ve modern parçacık detektörleri bile hâlâ iyonlaşmaya dayanır. Fakat su damlalarının izleri yerine, artık atomlardan dışarı atılan elektronları arıyoruz. Bazı detektörler basitçe iyonlaşmış elektronları doğrudan sayar. Alternatif olarak elektronlar bir atom tarafından yeniden yakalanabilir ve aynı anda belirli bir dalga boyunda (renkte) bir foton salabilir. Bu yeniden yakalama sayesinde, katot ışın tüpündeki parlaklık, sokak lambalarının turuncu ışığı ve Kuzey ve Güney Kutbu yakınında farklı renklerdeki kutup ışıkları meydana gelir. Bazı parçacık detektörleri bu fotonları sayar. Her halükârda, toplanan foton veya elektronlar bize bir parçacığın nerede olduğunu ve ne kadar enerjiye sahip olduğunu söyler. Çalıştığım deney, LHC'deki ATLAS Deneyi, bu ölçümleri, dört katlı bina yüksekliğinde devasa bir detektördeki 100.000.000'u aşkın sensörle yapar. Bu teknoloji, temel fikirler çok farklı olmasa da, 1911 yılının teknik koşulları içinde çalışan bir fizikçi için akıl almaz olurdu.

Dış uzaydan gelen ışınlar

Thomson, Rutherford ve pek çok başka ismin deneyleri, 20. yüzyılın başında atom dünyasının kapılarını açmak için ışınları kullandı. Fakat bugün incelediğimiz egzotik parçacıkların dünyasına kapıları açan, başka türlü bir ışındı. Dış uzaydan gelen bir ışın.

Marie ve Pierre Curie'nin keşiflerinden yola çıkarak, etrafımızda iyonlaştırıcı radyasyonun olduğu ve kimi kaya ve minerallerde doğal olarak meydana geldiği biliniyordu. Kayalardan uzaklaştığınızda, daha az radyasyon görüyordunuz. Bilim, varsayımlarınızı test etmenizi gerektirir; dolayısıyla

1909'da, Alman bilimci Theodor Wulf Eyfel Kulesi'nin altı ve üstündeki radyasyon miktarını ölçmek için yola çıktı. Bir sürprizle karşılaştı: Radyasyon miktarı kulede yukarı çıktıkça ve dünyadan uzaklaştıkça, hiç de beklediği kadar düşmedi. Bu, 1911 ila 1912'de Viyana ve şimdiki Çek Cumhuriyeti'nin tepesinde balon seyahatleri yaparak radyasyon ölçümleri gerçekleştiren Avusturyalı bilimci Victor Hess tarafından bir adım ileriye götürüldü. Sıcaklığın -20°C'ye düşebildiği 5300 metrelik yüksekliğe çıkan Hess, beklenmedik bir sonuç veren kesin ölçümler yaptı. O yükseğe çıktıkça, daha fazla iyonlaştırıcı radyasyon oluyordu. Bu radyasyonun kaynağı olarak Güneş'i seçenekler içinden çıkarmak üzere, geceleri, hatta bir kısmi güneş tutulması sırasında bazı uçuşlar gerçekleştirdi. Radyasyon hâlâ vardı. Hess, dış uzaydan gelen yeni bir tür radyasyon kaynağı keşfetti: Kozmik ışınlar. Bunlar yalnızca kısa mesafelerde yolculuk edebilen diğer tüm ışın türlerinden büsbütün farklı görünüyordu. Bu kozmik ışınlar, atmosferde kilometrelerce yol kat ediyor, çoğu Dünya'nın yüzeyine bile ulaşıyordu. Ne var ki, bu keşfin haberi yayılırken Avrupa Birinci Dünya Savaşı'nın kaosuna saplandı. Bazı bilimciler uzmanlıklarını memleketlerinde savaş çabasına katkıda bulunmaya adadı, çoğu da siperlerde hayatını kaybetti.

Savaştan sonra 1919 yılında İngiliz bilimci Arthur Eddington, Einstein isimli bir Alman bilimcinin son teorisini test etmeye koyulduğunda, fizik sayesinde bir uzlaşmaya varıldı. Eddington'ın bir güneş tutulması sırasında yıldızların konumlarını ölçmesi, Genel Görelilik'in en tuhaf tahminlerinden birini, yani kütleçekimin ışığı eğebildiğini doğrulayarak Einstein'ı dünya çapında üne kavuşturdu. Bundan sadece birkaç yıl sonra, Amerikalı astronom Edwin Hubble, ilk defa evrenin Samanyolu'muzdan daha büyük olduğunu kanıtlayan ölçümleri gerçekleştirdi. Oralarda yalnızca başka yıldızlar değil, aynı zamanda bir sürü kocaman galaksi vardı.

Savaşın kaosu dağıldıktan sonra, evren çok daha tuhaf ve çok daha büyük bir şey haline gelmişti.

1920'lere gelindiğinde, Hess'in keşfettiği kozmik ışınlara ilgi de giderek artıyordu ve bulut odası onları incelemek için mükemmel bir araçtı. Bu ışınlar elektrik yüklü parçacıklardan meydana geliyorsa, görünür izler bırakırlardı. Wilson'ın tasarımı artık dünyanın dört bir yanındaki üniversitelerde kullanılıyor ve geliştiriliyordu ve yapılan en önemli değişikliklerden biri de, büyük mıknatısların eklenmesiydi. Elektrik yüklü bir parçacık, bir manyetik alandan uçarak geçerken yön değiştirerek bulut odasında kavisli bir iz bırakıyordu. Pozitif ve negatif elektrik yüklü parçacıklar zıt yönlere doğru kıvrılıyordu (örneğin sola ve sağa eğiliyordu) ve yavaş parçacıklar da hızlı parçacıklardan daha çok kıvrılarak bulut odası fotoğraflarından daha fazla bilgi elde edilmesini sağlıyordu. Büyük ve güçlü mıknatıslar, aynı nedenlerle hemen her modern parçacık detektörünün kilit bir parçasıdır. Bir parçacığın elektrik yükünü ve momentumunu, izlediği yolun kavisini ölçerek belirleyebilirsiniz.

Kozmik ışın avcılığı yine de hâlâ bir şans meselesidir. Bulut odası, havayı soğutmak ve bulutu oluşturmak için pistonu ateşleyerek etkinleştiriliyordu, ardından o bulutun detaylı olarak incelenebilmesi için fotoğrafı çekiliyordu. Tam o anda odadan kozmik ışın geçmiyorsa, hiçbir su damlacığı izi görünür olmuyordu. Belki yalnızca yirmi fotoğraftan biri bir iz gösteriyordu fakat artık mesele anlaşılmıştı: Kozmik ışınlar, elektrik yüklü parçacıklardan oluşuyordu. 1932'de California Teknoloji Enstitüsü'nden (Caltech) genç bir araştırmacı, Carl Anderson, bulut odasında tuhaf kozmik ışın izleri fark etti. Bu izleri bırakan görünüşe bakılırsa elektronla aynı kütleye sahip fakat ona zıt elektrik yüklü (çünkü iz manyetik alanda ters yöne doğru bükülüyordu) bir parçacıktı. Bu, Dirac'ın 1928 tarihli denklemindeki tuhaf öngörüye, yani antimadde

öngörüsüne uyuyordu. Anderson, aynı zamanda pozitron olarak da bilinen antielektronu keşfetmişti. Kozmik ışınlar yalnızca elektrik yüklü parçacıklar içermiyor, aynı zamanda kuantum mekaniğinin tuhaf öngörülerini test etmek için de yeni bir yol sunuyordu.

Cambridge'de İngiliz fizikçi Patrick Blackett, bulut odasının yalnızca ilginç bir şey olurken çalışmasını sağlayarak, kozmik ışın fotoğrafçılığını çok daha etkili kılmanın bir yolunu geliştiriyordu. Odanın dışına basit radyasyon detektörleri olan Geiger sayaçları yerleştirdi; sayaçlar gelmekte olan bir kozmik ışını tespit edince pistonu harekete geçiriyordu. Bulut, şimdi tam kozmik ışınlar odada uçarken oluşuyordu ve artık neredeyse her fotoğraf bazı izler yakalıyordu. Blackett Anderson'ın pozitron keşfini hemen onaylamayı başarmış, hatta yeni bir şey bile gözlemlemişti: Bunlar, "V" izleriydi. Bunlar, önceki bölümdeki verteks diyagramlarından birine denk gelir. Bir gama ışını, bir yüksek enerjili foton, iz bırakmadan odada uçuyordu ve bir elektron ile bir pozitrona dönüşüyordu, onlar da birbirinden uzaklaşırken izler bırakıyor, bu sırada bir "V" biçimi oluşturuyorlardı. Bu, Dirac'ın madde ve antimaddeye dönüşen enerji (foton) tahminini doğruluyordu.

"Tetikleyici" detektörler fikri, günümüzde bile esastır. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda protonlar kafa kafaya çarpışır ve bunun sonucunda parçacıklar ışık hızına yakın hızla uçarlar. Birkaç nanosaniye içinde, bu parçacıklar detektörden dışarıya uçar; eğer doğru anda kaydetmiyorsa, elimizde veri yok demektir. Her şey gereğince senkronize olduğunda bile, çarpışmalar öylesine yüksek bir oranda (saniyede yaklaşık 40 milyon adet) meydana gelir ki, hepsini kaydetmek imkânsızdır ve her çarpışmanın kaydedilmeye değer olup olmadığına bir salise içinde karar verilmelidir. Bir dizi tetikleyici, meydana gelmiş olabilecek ilginç şeylerin işaretlerini arar: Örneğin, de-

tektörün bir kısmının pek çok sinyalle parlaması gibi. Eğer bu tetikleyicilerden biri ateşlenirse, çarpışmadan elde edilen veri sonradan yapılacak analiz için kaydedilir. Tetikleyici tasarımı yanlış olursa, ilginç çarpışmalar da kaçırılır ve ebediyen kaybedilir; bu gerçekten de bir parçacık fiziği deneyi yürütmenin en önemli yanlarından biridir.

"Bunu kim sipariş etti?"

1939'da, antimaddenin varlığının kanıtlanmasından sadece dört yıl sonra, kozmik ışınlar büyük bir sürpriz yapmak üzereydi. Caltech'te Carl Anderson ilk lisansüstü öğrencisiyle, Seth Neddermeyer'le mesai yapmaya başlamıştı ve beraberce bulut odalarında çalışmaya devam ediyorlardı. Bir elektrondan çok daha ağır fakat bir protondan çok daha hafif bir parçacığa aitmiş gibi görünen bir iz fark ettiler. Bu yeni bir şeydi: Atomun parçası veya o sıralar bilinen farklı radyasyon türlerinden biri değildi. İçinde yaşadığımız dünyada yoktu ve bu tuhaf kozmik ışınlar tarafından meydana getiriliyordu. Artık bu parçacığın, elektronun ağır kuzeni olan müon (μ simgesini alır) olduğunu biliyoruz fakat o sıralar bu tam bir sürprizdi ve bu durum Amerikalı Nobel Ödüllü I. I. Rabi'nin esprili sözlerinden de anlaşılıyordu: "Bunu kim sipariş etti?" Bu, evrende atomlar ve içerdikleri parçacıklardan daha fazlası olduğuna dair ilk ipucuydu.

Açıklanması gereken yalnızca bu müon değildi çünkü zaten henüz bu kozmik ışınlara neyin yol açtığına ilişkin net bir gösterge yoktu. Bazı tuhaf fikirler olduğu kesindi: Elektronun elektrik yükünü ölçerek Nobel Ödülü kazanan Robert Millikan, din temalı bir model ortaya atarak, kozmik ışınların Tanrı evrende yeni maddeler yaratmayı sürdürürken "atomların doğum çığlıkları"ndan yayılan fotonlar olduğunu öne sürdü. Artık kozmik ışınların esasen galakside yüksek hızda

uçan protonlar olduğunu biliyoruz. Pek çoğu süpernovalardan, yani ömürlerinin sonuna gelen yıldızların evrendeki en şiddetli olaylardan birini gerçekleştirerek patlayıp her yöne ışık ve madde saçmasından kaynaklanır. Bu protonlar Dünya'nın atmosferine çarptığında, tıpkı LHC'deki çarpışmalar gibi, hatta oradakilerden binlerce kat fazla enerjilere ulaşarak, yeni parçacıklardan oluşan bir yağmura neden olur. Bu nedenden ötürü, kozmik ışınlar büyüleyici bir araştırma konusu olmayı sürdürmektedir ve biz de Sekizinci Bölüm'de onlara geri döneceğiz.

Gelgelelim, 1930'larda müon hâlâ bir gizemden ibaretti. Bir teoriye göre, iki tür elektron vardı: "Kırmızı" ve "mavi". Bunlardan biri, bildiğimiz ve sevdiğimiz elektrondu fakat diğeri bu yeni parçacığa uyum sağlayan zoraki bir davranış yapısına sahipti. Eldeki bilgiyi yeni verilere uyacak şekilde biçimlendirmek, bazen büsbütün yeni bir gerçeklikle uğraşmaktan daha makbul olabilir! 1935'te Japon teorisyen Hideki Yukawa, her şeyi bir arada tutan pion (π simgesiyle gösterilir) isimli yeni bir parçacığa ihtiyaç duyan bir atom çekirdeği modeli geliştirdi. Pionun kütlesinin, yenilerde keşfedilen müona benzer olduğu öngörülmüştü. Keşfedilen şey o olamaz mıydı?

Bu gizemin çözülmesine fırsat kalmadan İkinci Dünya Savaşı patlak verdi. Einstein ve pek çok başka bilimci, Naziler güçlenirken Almanya'dan kaçtı veya sürüldü. Heisenberg gibi bazıları kalmaya, ya kaosu atlatmaya çalışmaya ya da yeni rejimin kaderine ortak olmaya karar verdi. Birleşik Krallık'ta Dirac bir atom bombası için birtakım fikirler üstünde çalışırken, Birleşik Devletler'de Manhattan Projesi, aralarında Feynman'ın da bulunduğu en parlak isimlerin çoğunu toplayıp bir atom bombası yapmayı başarmış, atomun içindeki gücü korkunç bir gövde gösterisiyle gözler önüne sermişti.

Savaştan sonra araştırmalar sürdü. 1947'de Bristol Üniversitesi'nden bir ekip, kozmik ışınları kaydetmek için Wilson'ın

yanında çalışmış olan Cecil Powell'ın geliştirdiği bir fotografik emülsiyon tekniği kullanıyordu. Bu fotografik levhalar, daha fazla kozmik ışın yakalamaları için dağlara bırakılıyor veya uçuşlara götürülüyor, sonra toplanıyor, banyo ediliyor ve inceleniyordu. Yeni bir parçacık da bulundu; bu seferki tam da Yukawa'nın pionuna uyuyordu. Pion, kıvrımlı iziyle dikkat çekiyordu: Bazen gelişigüzel şekilde daha hafif bir parçacığa (hatta müona) bozunuyor, aynı anda yön değiştiriyordu. Sonuç olarak, iki iz uç uca birleşmiş gibi görünüyordu.

Blackett, artık George Rochester ile Clifford Butler'ın bulut odası araştırmasına girişerek yeni bir keşif yaptığı, yeni tür bir V parçacığı bulduğu Manchester'daydı. Blackett, bir nötr parçacık (bir foton) iki elektrik yüklü parçacığa (bir elektron ve bir pozitron) bozunduğunda ilk V izlerini bulmuştu. Bu yeni V parçacığı elektrik yükü olmayan bir şey olmalıydı fakat bu seferki pozitif ve negatif pionlara bozunuyordu. Ona zaman içinde kaon ismi verildi (K simgesini aldı). Kaon pionlara bozunduğundan, ağır olsa gerekti. Fakat kararsız ağır parçacıklar hızlı bozunmalıdır ve tuhaf bir şekilde, kaon uzun süre yaşıyordu. Caltech'teki ekip, bu keşfi doğruladı ve ona elektrik yükü taşıyan başka bir kaon türü ekledi. İşler kafa karıştırıcı olmaya başlamıştı. Bütün bu yeni parçacıklar neyin nesiydi ve kaç tane daha ortaya çıkacaktı? Bu soruları cevaplandırmak için daha yeni teknolojilerin keşfedilmesi gerekiyordu.

Bilim hızlanıyor

Atom gücünün askerlik dışındaki alanlara yönelik potansiyeli, İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra bilime büyük ilgi duyulmasına ve mali kaynak ayrılmasına neden oldu. 1950'lerde aralarında Rusya'daki Ortak Nükleer Araştırma Enstitüsü (JINR), Avrupa'da Conseil Européen pour la Recherche Nuc-

léaire (CERN) ve ABD'de günümüzde Enerji Bakanlığı tarafından idare edilen çeşitli laboratuvarların bulunduğu büyük ölçekli araştırma laboratuvarları kuruldu. Parçacık fiziği araştırması, üniversitelerde kozmik ışınları inceleyen küçük ekiplerden, bu laboratuvarlarda son teknoloji ekipmanla yani parçacık hızlandırıcılarla çalışan büyük ekiplere dönüştü.

İlerleyen sayfalarda parçacık hızlandırıcıların nasıl çalıştığını anlatacağım fakat esasen yalnızca şunu yaptıklarını söyleyebiliriz: Parçacıkları hızlandırırlar, sonra da birbirleriyle çarpıştırırlar. Bu, bir kozmik ışın yukarı atmosfere vurduğunda meydana gelen şeyi taklit etmek gibidir fakat artık böylesi bir çarpışmanın yanına olan biteni yakalayacak bir detektör yerleştirilebilmektedir.

Çarpışma üreten bu yeni parçacık hızlandırıcılarla devam edersek, elimizde aynı zamanda sonuçları inceleyecek yeni tür bir parçacık detektörü de vardı. 1952'de bulut odasının yerini, Carl Anderson'ın bir başka öğrencisi Donald Glaser tarafından keşfedilen kabarcık odası aldı. Fikir aşağı yukarı aynıydı fakat iyonlaşma havadaki buharın yoğunlaşmasına neden olmak yerine, köpüklü bir sıvıda (prototiplerden birinde bira kullanılmıştı) kabarcıkların oluşmasına neden oluyordu. Bunun avantajı, basitçe sıvının havadan yoğun olmasıdır. Çok hızlı hareket eden parçacıklar iz bırakmadan bir bulut odasında uçar fakat kabarcık odasındaki sıvıda yoğunlaşan atomlara çarpmaları ve onları iyonlaştırmaları çok daha olasıdır. Bu yeni keşif, deneylerin ilk defa çok yüksek enerjili parçacıkları incelemesine olanak tanımıştır.

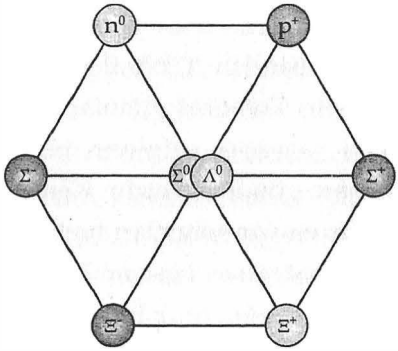
Artık parçacıklar neredeyse istendiği an birbiriyle çarpıştırılabildiğinden, bir veri patlaması yaşandı. Bu yeni deneyler büyüktü; örneğin CERN'deki Gargamelle Kabarcık Odası, 2 metre genişliğinde ve 4,8 metre uzunluğundaydı ve günümüzde de halkın ziyaretine açıktır. Bu oda 1970'lerde faal du-

rundayken, bir milyonun üstünde parçacık izi fotoğrafı üretmiştir ve bunların arasından fotoğraf ayıklamak yoğun bir çalışma gerektirmiştir. Fotoğraf yığınları laboratuvarlardan onları ayıklamakta çalışacak ekiplerin bulunduğu işbirliği yapılan üniversitelere gönderiliyordu. Kendi üniversitemde, yani UCL'de bir ara, en son sonuçları hızlıca işlemek için bazen gece boyunca fotoğrafları tarayarak çalışan, çoğunluğunu öğrencilerin oluşturduğu, otuz kişilik bir ekip vardı; tabii öğrenciler daima böyle müthiş işleri kapar. Modern deneylerde, veriler, fotoğraflar yerine sensörlerden dijital okumalar halinde elde edilir ve ayıklama ve eleme işinin büyük kısmı, hem sinyallerin karmaşıklığı hem de üretilen çarpışmaların baş edilemez sayılara ulaşması nedeniyle, artık bilgisayarlar tarafında yürütülmektedir. Higgs bozonunu keşfetmek için altı katrilyon çarpışma analiz edilmiştir; bunların her biri 1 saniyede ayıklansa, süreç neredeyse 200 milyon yıl sürerdi.

Sekiz katlı yol

1950'lerde bir dizi yeni parçacığın keşfedilmesiyle beraber, yeni parçacık hızlandırıcılar ve daha hassas detektörler hemen sonuç getirmiş oldu. Eskiden atomaltı dünyası, yalnızca tüm maddeyi oluşturan elektron, proton ve nötronun kontrolü altındaymış gibi görünüyordu. Fakat sonra birden beş, on, yirmi yeni parçacık ortaya çıktı ve açıklanması gereken yalnızca müon, pion ve kaon değil, tüm bu parçacık dünyasıydı: eta (η), rho (ϱ), sigma (Σ), ksi (Ξ), omega (Ω)... Bunları isimlendirirken Yunan harflerinin hepsini tüketme riski vardı. Bir şeyler yapılmalıydı.

1960'a gelindiğinde, teorisyenlerin her şeyi bir mantığa oturtmaya çalışmalarının vakti gelmişti. İki kişi, birbirinden habersiz, parçacıkların özellikleriyle parçacık bahçesini organize etmeyi akıl etti. Bu kişiler, Yuval Ne'eman ile Murray



Gell-Mann'ın parçacık cetvellerinden biri.

Gell-Mann'dı. "Periyodik cetvelleri" sekiz parçacık içerdiğinden, Gell-Mann ona Budistlerin Sekiz Aşamalı Yolu'nu çağrıştıracak şekilde, Sekiz Katlı Yol ismini verdi.

Bu "periyodik cetveller"deki örüntüler, altta yatan bir neden olduğunun ipucuydu ve 1964'te Gell-Mann, neler olduğunu fark etti. Bütün bu parçacıklar, çeşitli kombinasyonlarda birbirine yapışarak deneylerde keşfedilen farklı parçacıkları oluşturan üç temel yapıtaşı kullanılarak açıklanabiliyordu. Yine eşzamanlı bir keşifle, Richard Feynman'ın öğrencilerinden George Zweig bundan bağımsız olarak aynı fikre ulaşmıştı. Zweig bu daha küçük parçacıklara "ace" ismini vermişti fakat kullanımda kalan, Gell-Mann'ın verdiği isim, yani "kuark" oldu.

Telaffuzla ilgili bir not düşelim. Gell-Mann başta "kuark" ismini koyarken, ördek sesine benzer bir şey hayal etmişti. Daha sonra, James Joyce'un *Finnegan'ın Vahı*'ından bir satır dikkatini çekti: "Three quarks for Muster Mark!" (Muster Mark için üç kuark!") Pek çok kişi, "kuark"ı, "pork"la (domuz) değil, Mark'la uyaklı telaffuz eder. Şimdilerde, iyi veya kötü, edebi referanslardan ziyade kısaltmalarla isim koyuluyor ve bunlar sıradan olanlardan (bir gün başına "Very"nin [çok] V'sini alarak VLHC'ye dönüşebilecek LHC, yani Large

Hadron Collider gibi) saçma olanlara (örneğin ATLAS = A Torodial LHC Apparatus, yani Toroidal LHC Aparatı veya WIMP = Weakly Interacting Massive Particle, yani Zayıf Etkileşimli Büyük Kütleli Parçacık) kadar çeşitlilik gösteriyor. Müphem kısaltmalar üretmek, parçacık fizikçileri arasında popüler bir hobiye dönüşmüştür.

Gell-Mann'ın kuarklarının ikisi "yukarı" ve "aşağı" isimlerini taşır ve proton ile nötronun yanı sıra parçacık bahçesindeki diğer birkaç parçacığı ve pionu oluşturur. Proton, üç kuark içerir: Yukarı, yukarı, aşağı. Nötron ise aşağı, aşağı, yukarı kuarklardan oluşur. Doğru elektrik yüküne sahip olmak için, kuarkların her biri küçük bir miktar elektrik yükü taşımak zorundadır: Yukarı +, aşağı -, nötron 0 ve atomdaki elektronun -1'ini dengeleyen proton +1. Kuarklar aynı zamanda antimadde eşlere de sahiptir ve antielektronda olduğu gibi, bu antikuarkların zıt elektrik yükü madde eşlerinin elektrik yükünün zıddır. Pionda bir kuark, bir de antikuark vardır: Yukarı, antiyukarı veya nötr pion için aşağı, antiaşağı; elektrik yüklü pionlar için yukarı, antiaşağı veya aşağı, antiyukarı. Üç kuark içeren parçacıklar, iki kuark içerenlere oranla önemli ölçüde ağırdır ve toplu olarak, Yunanca ağır anlamını taşıyan "baryonlar" ismini almışlardır. İki kuark içeren parçacıklara, Yunanca orta düzey anlamına gelen "mezonlar" ismi verilmiştir. Bunlar baryonlardan hafif, elektronlardan ağırdır. Kuarklardan meydana gelen tüm parçacıklara, hem mezon hem de baryonlara, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda olduğu gibi, (Yunanca "kalın" veya "iri" sözcüğünden) hadronlar ismi verilir.

Kaon ve tuhaf bir şekilde uzun ömürlü olan diğer parçacıkları açıklamak için üçüncü bir kuarka ihtiyaç vardı: "Acayip". Bu, yukarı veya aşağıdan daha ağırdır, dolayısıyla kaonu (pozitif kaon, yukarı ve antiacayipten meydana gelir) piondan (pozitif pion, yukarı ve antiaşağıdan meydana gelir) ağır

yapar. Böylece, artık bir düzen gelmişti: Atomu ve parçacık bahçesindeki diğer tüm parçacıkları açıklamak için yalnızca elektron ile üç kuarka ihtiyaç vardı. Tabii müon dışında. Hiç kimse müonla ne yapılması gerektiğini bilmiyordu.

Standart Model'in geliştirilmesi

Bir dizi yenilenmiş tasarım ve yeni teknoloji, parçacık hızlandırıcıları daha da güçlü kılarak gitgide daha yüksek enerjili çarpışmalar üretti. Bu çarpışmaları inceleyen detektörler de aynı şekilde evrim geçirdi, kabarcık odalarının yerini çarpışmalara daha hızlı cevap verebilen ve işlemesi fotoğraflardan daha kolay sonuçlar üreten aygıtlar aldı. Kıvılcım odaları, çok telli orantılı odalar, sürüklenme tüpleri, zaman kestirim odaları, halka görüntüleme Cherenkov detektörleri, örnekleme kalorimetreleri, silikon detektörler ve diğerleri.

1960'ların sonuna gelindiğinde, parçacık hızlandırıcılar, daha küçük parçacıklardan yani kuarklardan meydana geldikleri fikrine ağırlık vererek, protonları parçalayabilecek kadar güçlüydü. Ne var ki hâlâ pek çok şüphe vardı: Daha önce hiç kimse bir kuarkı doğrudan ölçmemişti. Beşinci Bölüm'de göreceğimiz gibi, Standart Model olarak bilinen yeni bir teori kuarkların daima çift olarak bulunması gerektiğini önerince şüpheler arttı. Tıpkı yukarı kuarkın aşağı kuarkla eşleşmesi gibi, acayip kuarkla bir çift oluşturacak bir şans "tılsımı", yeni bir kuark olmalıydı. Fakat henüz ondan bir işaret yoktu.

ABD'deki Brookhaven ve Stanford laboratuvarlarında çalışan ekiplerin eşzamanlı olarak, bir tılsım ve antitılsım kuarktan meydana gelen mezonla tutarlılık sergileyen, daha önce bilinenlerden ağır yeni bir parçacık keşfettiği 1974'e kadar. Brookhaven'daki grup bu yeni parçacığa J, Stanford ekibi de ψ ismini verdi; bugün J/ψ gibi tuhaf bir kombinasyon kullanıyoruz. Stanford ekibi, aynı parçacığın daha ağır

bir versiyonunu da buldu, böylece J'den vazgeçilerek ona ψ' veya "psi prime" ismi verildi. Tılsımın keşfi, kuarkların varlığıyla ilgili tüm şüpheleri yok ederek ve Standart Model'i doğru teori olarak konumlandırarak, parçacık fiziğinde "Kasım Devrimi"ni tetikledi.

1977'ye gelindiğinde hızlandırıcılar gelişmeyi sürdürüyordu ve ABD'de Fermi Ulusal Hızlandırıcı Laboratuvarı (Fermilab), yüksek enerji cephesinin lideriydi. Bir dizi yeni parçacık, daha da ağır bir kuark, yani "alt" içeren hadronlar keşfedilmişti. Bunun da bir eşi, yani "üst" vardı elbet (alternatif isimleri olan "güzellik" ve "gerçeklik", neyse ki tutmadı). Üst kuark epey aldatıcıydı; ta ki 1995'te onu keşfedecek denli güçlü bir makine ortaya çıkana kadar. Bu, yine Fermilab'daki Tevatron'du. Tevatron, 2009'da LHC gelip de rekorunu elinden alıncaya dek, dünyadaki en yüksek enerjili makine olarak kaldı. LHC, Tevatron'dan neredeyse 7 kat, 1960'lardaki hızlandırıcılardan ise en az 1000 kat daha güçlüdür.

Peki ya müon? Bugün onun esasen ağır bir elektron olduğunu, yaklaşık 200 kat ağır olduğunu biliyoruz. O, basit bir kuru buzlu bulut odasında görebileceğiniz en sıradan şeylerden biridir ve Standart Model ailesinin iyi anlaşılmış bir üyesidir. 1975'te elektronun daha da ağır bir kopyası keşfedildi: Tau. Kuarklar nasıl çiftler halindeyse, elektron, müon ve taunun da bir eşi vardır ve bu eş, nötrinodur. Nötrinolar bu kitapta kendilerine özel bir bölüm ayrılmasını hak edecek kadar ilginçtirler fakat şimdilik bu altı parçacığın "lepton" listesini tamamladığını söyleyelim. Lepton ismi Yunanca "küçük"ten gelir ve ağır tau keşfedilmeden önce onlar için uygun görülmüştür! Böylece tablo tamamlanır: 6 kuark ile 6 lepton, Standart Model'in madde parçacıkları olan 12 fermiyonu meydana getirir. Bu kafa karıştırıcı parçacık çeşitliliği, kitabın başındaki tabloda gösterilmiştir.

Parçacık fiziği, dünyanın çeşitli yerlerindeki üniversitelerde çalışan bireylerle başlamıştır: 20. yüzyılın başındaki merkezlere örnek olarak Cambridge ve Caltech'i seçtim fakat daha fazlası var. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra, ulusal ve uluslararası laboratuvarlarda yürütülen daha büyük, daha güçlü deneylere bir eğilim oldu. Elbette hâlâ yol boyunca elzem katkılar sunan bireyler vardır fakat sahada parçacık fiziği bir süredir bir takım oyunudur ve bunun sonucunda çok daha hızlı gelişme kaydeder.

Bugün benim gibi pek çok araştırmacı, dünyanın çeşitli bölgelerindeki üniversitelerde çalışmakta, deneyler de laboratuvarlarda yürütülmektedir. LHC'deki en büyük deneyler olan ATLAS ve CMS ekiplerinin yayımladığı her bilimsel makalede 3000'i aşkın yazar ismi listelenmektedir. Bu demek oluyor ki, bu deneylere yapılandırma, operasyon, bakım ve veri işleme alanlarında 3000'i aşkın birey önemli katkılarda bulunmuştur. Her makalede belirli bir analiz ortaya koyan ekip, genellikle çok daha küçüktür, belki üç ila elli veya daha fazla kişiden oluşur fakat her birinin katkısı olmasa herhangi bir analiz mümkün olmazdı. Yine de çok fazla isim bulunmaktadır ve ATLAS ile CMS'nin toplam sonuçlarını gösteren bir makale, 5000'i aşkın yazarıyla muhtemelen dünya rekorunu elinde tutmaktadır.

Burada anlattığım hikâye enerji cephesine, yani büyük keşifler yapmaya eğilimli olan en güçlü parçacık hızlandırıcılara odaklandı. Fakat hikâyenin başka bir yüzünde, keşfedildikten sonra parçacıkların özelliklerine odaklanan bir dizi daha küçük deney vardır. Bu diğer deneyler, bize atomaltı dünyasının kendine has işleyişine dair pek çok şey söylemiş, hatta daha farklı şeyler de anlatmıştır; bunların bazılarına ilerleyen sayfalarda değineceğim.

20. yüzyılda ortaya çıkan tablo, yani Standart Model, büyük bir başarıydı. Standart Model, evreni hesaplayabildiğimiz en küçük ölçeklerde ve en yüksek enerjilerde betimler. Dünyadaki laboratuvarlarda parçacıkları inceleyerek bu parçacıkların günümüzde tüm evrende nasıl davrandığını ve aynı zamanda Büyük Patlama'dan sonraki saniyenin milyarda birinden az bir zaman dilimi içinde neler olduğunu da öğrenebiliriz. Hatta bu model öyle başarılıdır ki, klasik fizikle arasında bir paralellik kurmak baştan çıkarıcıdır. Standart Model işler işlemesine fakat hâlâ halledilmesi gereken birkaç detay vardır ve muhtemelen bir sonraki deneysel keşif, bütün tabloyu bir kez daha altüst edecek, adeta bir çorap söküğünün her şeyi başlatan ipliği gibi olacaktır.

Fizik araştırmalarına başlayan çoğu kişi gibi, ben de deney ile teori arasında seçim yapmak zorundaydım. Teoride görkemli düşünceler, güzel matematik ve kudretli açıklamalar varken, deneyler karman çorman ve moral bozucu olabiliyordu. Fakat ben o karmaşıklığın bir parçası, bir sonraki büyük keşfin bir parçası olmak istiyordum. Bu keşif, müon gibi bir sürpriz de olabilirdi, yepyeni bir çalışma dünyası açan bulut odası gibi teknolojik bir dönüm noktası da. LHC, bugünkü enerji cephesinde bahsettiğim o ipliği arıyor fakat sahnedeki tek büyük aktör o değil. Daha sonra, Standart Model'i farklı yollarla test eden, hepsi de bir sonraki dönüm noktasını, Standart Model'in yıkıldığı noktayı arayan daha küçük birtakım deneylerden bahsedeceğim.

Fakat önce, Standart Model hakkında öğrenilmesi gereken başka şeylerden de söz edelim. Dünyayı canlandıran, yalnızca bir fermiyon grubu değil, gerçekten de temel kuvvetlerdir. Şimdiye kadar yalnızca elektromanyetik kuvvetten ve bu kuvveti aktaran bozondan yani fotondan bahsettim. Biz, elektromanyetik kuvvetin hüküm sürdüğü bir dünyada yaşıyoruz: modern teknolojiye güç veren elektrik, elektronların

atom çekirdeğinin etrafında dönmelerini sağlayan kuvvetle aynıdır. Farklı atomlardaki elektronlar, elektromanyetik kuvvet aracılığıyla etkileşim kurarak etrafımızdaki katı dünyayı üretir: Farklı maddelerin, farklı renklerin oluşturduğu kalabalık ve yaşamın ta kendisinde bulunan karmaşık moleküller. Elbette kütleçekimi bizi Dünya'nın yüzeyinde tutuyor fakat elektromanyetik kuvvet, burada olmayı zahmete değer kılıyor. Bununla beraber, elektromanyetizma, Standart Model'deki üç kuvvetten yalnızca biri. Diğerleri, çok farklı biçimlerde hareket ediyor fakat elbette onlar da, göreceğimiz üzere, evrenin yapısı için son derece elzem.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ALDATICI KUARK

1920'lerde kısa bir süre boyunca, atomaltı dünyasının epey basit olabileceği düşünüldü: Her şey atomlardan meydana geliyordu, atomlar da çekirdeğin etrafında dönen elektronlardan ibaretti ve elektromanyetik kuvvetle yerinde tutuluyordu. Bu, elementlerin periyodik cetvelini, atomların nasıl birleşerek moleküller ve teoride DNA veya insan beyni gibi son derece karmaşık yapılar oluşturduğunu açıklamak için yeterlidir. Elbette on iki notayı bilmek, dünyadaki her şarkıyı çalabileceğiniz anlamına gelmez; tıpkı atomların nasıl işlediğini bilmenin onlardan inşa edilebilecek her şeyi anladığımız anlamına gelmemesi gibi. Fakat elbette, her şey aynı temel kurallara, kuantum mekaniğinin kurallarına uymalıdır.

Fakat daha önce gördüğümüz gibi, evrenin temel yapıtaşlarının o kadar da basit olmadığı ortaya çıkmıştır. Parçacık bahçesinde müon ile hadronların keşfedilmesi, kuralların yeniden değerlendirilmesi gerektiği anlamına geliyordu. Standart Model'e iki kuvvet daha eklenmeliydi: Güçlü ve zayıf. Bazı açılardan, bunlar İkinci Bölüm'de karşımıza çıkan elektromanyetik kuvvete benzer: Elektrik yükü taşıyan parçacıklar arasında yolculuk eden bozonlar tarafından aktarılırlar. Fakat elektromanyetik kuvvetin aksine, güçlü ve zayıf kuvveti

doğrudan deneyimlemeyiz. Bu ve bir sonraki bölümde, bu iki kuvvetin neden bizden saklandığı ve bildiğimiz şekliyle dünyanın neden onlarsız var olamayacağı üzerinde duracağız.

Güçlü renkler

Atom çekirdeği uzun bir zaman boyunca bir gizemden ibaretti. Öncelikle, atom çekirdeği çok küçüktür. Eğer bir atom bir stadyum boyutunda olsaydı, çekirdeği de çim sahanın ortasında duran bir bezelye büyüklüğünde olurdu. Atom çekirdeği ilk olarak Geiger ile Marsden bir altın folyoda alfa radyasyonunu, yüksek enerjili parçacıkları ateşleyip bazılarının geriye zıpladığını gördüğü 1911 yılında keşfedildi. 1930'larda çekirdeğin bileşenleri, protonlar ve nötronlar keşfedilmişti fakat her şeyi bir arada tutan neydi? Protonların hepsi pozitif elektrik yükü taşır ve aynı elektrik yükünü taşıyan tüm parçacıklar gibi, birbirlerini uzaklaştırmalı, itmeli ve çekirdeği yok etmelilerdir. Nötronlar ise elektrik yükü taşımadıkları için birbirlerini ya da protonları itemezler fakat bir rolleri olmalıdır. Kararlı bir çekirdek için proton ve nötron sayısı arasında hassas bir denge gereklidir. Çok fazla veya çok az olursa, atom radyoaktifleşebilir. Protonların, nötronların ve parçacık bahçesindeki diğer tüm hadronların kuarklardan meydana geldiğinin fark edilmesi, bir başka soruyu gündeme getirdi: Kuarkları proton ve nötron gibi hadronlar oluşturacak şekilde bir arada tutan şey nedir?

Burada bir başka kuvvetin, elektromanyetik kuvvetten çok daha güçlü bir kuvvetin rol oynadığı netti. Buna "güçlü kuvvet" veya "güçlü nükleer kuvvet" denildi. Güçlü nükleer kuvvet, adının da gösterdiği üzere, bildiğimiz en güçlü kuvvettir fakat onun esasen nasıl işlediği uzun bir zaman boyunca net olarak anlaşılmamıştır. Rekabet halindeki fikirler geliştirilmiş, sonra onlardan vazgeçilmiştir. Yukawa'nın 1930'lar-

da pionun varlığını tahmin eden teorisi bunlardan biriydi. 1960'ların sonunda parçacık hızlandırıcılar en sonunda protonları parçalayacak kadar güçlü olduğunda, bu kuvveti aksiyon halindeyken incelemek mümkün oldu ve bir konsensüs ortaya çıkmaya başladı. Elektromanyetik kuvvetin başarılı bir teorisine dayanan Kuantum Kromodinamiği (QCD) isimli bir teori, tüm deneysel veriyi tanımlamakta başarılı oldu; şu anda kullandığımız güçlü kuvvet teorisi odur.

QED ile QCD arasında pek çok benzerlik bulunmaktadır fakat pratikte neden bu kadar farklı davrandıklarını anlamak için detayların bazılarına yakından bakmalıyız. QED'de elektromanyetik kuvvet, bir bozon olarak bilinen foton, yani bir "elçi parçacık" tarafından iletilir. Elektrik yükü taşıyan her türlü parçacık fotonları yayabilir veya emebilir ve bu etkileşimler, İkinci Bölüm'de gördüğümüz gibi, basit Feynman Diyagramları şeklinde çizilebilir. Birbirlerine fotonlar ateşleyerek, aynı elektrik yükünü taşıyan parçacıklar birbirini iter, zıt elektrik yükü taşıyan parçacıklar ise birbirini çeker. Bu fotonlar, İkinci Bölüm'deki analojiyi kullanacak olursak, "toplar" veya "bumeranglar" gibi hareket edebilir. Yüksek enerjili fotonlar aynı zamanda bir antiparçacığa veya bir parçacığa, örneğin zıt elektrik yükü taşıyan bir elektron ve pozitrona dönüşebilir.

Şimdi bu bilgiyle QCD'ye geçelim. Onun da kuvvet taşıyan bir parçacığı, onunla özdeşleştirilen bir bozonu vardır ve ona (birbirine yapışarak* hadronları oluşturduğu için) gluon denir. Gluonlar, "güçlü kuvvet yükü" taşıyan her parçacıkla etkileşime girebilir; bunlara renk denir (QCD'deki "chromo" buradan gelir) fakat bu yalnızca bir isimden ibarettir ve LHC'deki ateşli tartışmalarda kullanılan renkli sözcükler dışında renklerle hiçbir ilgisi bulunmamaktadır. Bu etkileşim-

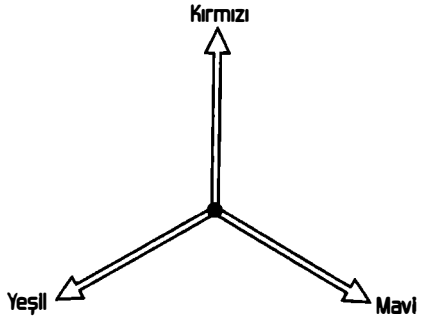
* İngilizce "glue" sözcüğü, yapıştırma anlamını taşır. (çev.)

ler de Feynman Diyagramlarında gösterilebilir: Kuarklar tüm fermiyonlar gibi düz çizgilerle sunulur, gluonlar ise dalgalı çizgilerle. Fakat QED'le benzer noktalar bununla sınırlıdır.

Fotonlar epey dışadönüktür. Parçacıklar, aralarında çok büyük mesafeler olsa da foton takas ederek çekebilir veya itebilir; Dünya'nın merkezindeki manyetik çekirdeğin elinizde tuttuğunuz bir pusulanın iğnesini hareket ettirmesi buna bir örnektir. Uzak galaksilerden gelen ışık gibi diğer fotonlar, bize ulaşmak için milyarlarca kilometre aşabilir. Fakat ne gluonlar ne de kuarklar bir hadronun (bir metrenin milyarda birinin milyonda biri kadar bir şeydir) sunduğu rahatlık olmadan seyahat edemezler; aslında daha önce hiçbir kuark veya gluonu direkt olarak görmedik çünkü daima bu şekilde bağlıdırlar ve hadronları çarpıştırmadığımız takdirde onları asla aksiyon halinde görmeyiz. Bu da gündelik hayatınızda yapmadığınız bir şeydir. Tabii LHC'de çalışıyorsanız iş değişir.

Fotonlar ile gluonlar arasındaki bu farklar, "renk yükü"nün doğasından kaynaklanır. Elektrik yükü, görece basit bir miktardır: Tıpkı sayı doğrusu gibi "tek boyutlu"dur. Elektrik yükü, pozitif veya negatif olabilir ve pozitif elektrik yüklü iki parçacığı bir araya koyarsanız iki birim elektrik yükü birimi alırsınız; üç pozitif parçacık size üç birim elektrik yükü verir. Bir pozitif ve negatif parçacığı bir araya koyarsanız, sıfır yük alırsınız. Ve zıt yükler birbirini çektiği için, pozitif ve negatif parçacıkların bir araya gelerek sıfır toplam yükü olan atomlar gibi şeyler üretme eğilimleri vardır. Doğa ortadaki simetrik noktaya oturmayı sever.

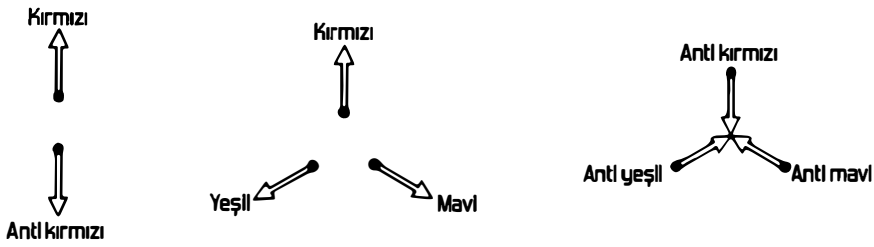
Renk yükü farklıdır. O, "üç boyutlu"dur. Bunun anlamı, yükün pozitif veya negatif bir simgeye sahip olabilmesi gibi, bir yöne de sahip olabilmesidir ve kolaylık olması için bu farklı yönler "kırmızı", "yeşil", "mavi" olarak sınıflandı-



Bir kuarktaki renk yükünü temsil eden "rüzgârgülü".

rılır ("üst" ve "alt" halihazırda kuarkları isimlendirmek için kullanılmıştı!). Dolayısıyla, bir birim elektrik yükü taşıyan bir parçacık herhangi bir parçacık gibiyken, bir birim renk yükü taşıyan parçacık, üç farklı yönden birine, kırmızı, mavi veya yeşile işaret eden bir rüzgârgülü gibi davranabilir. Bir üst kuark, renk yükünün dizilimine bağlı olarak kırmızı, yeşil veya mavi olabilir. Tabii bu yalnızca bir analojidir; kuarklar gerçekte yanlarında küçük bir ibreyle dolaşmaz. Antikuarklar, yani kuarkların antimaddeleri zıt yükler taşır: Örneğin bir üst kuark + elektrik yükü birimleri ve 1 renk birimi, kırmızı, mavi veya yeşil taşır. Bu kuarkın antimadde eşi - elektrik yükü birimleri ile -1 renk birimi, yani "antikırmızı", "antimavi" veya "antiyeşil" taşır.

Elektrik yüklü parçacıkların toplam sıfır yüklü atomlarda bir araya gelmeye meyilli olması gibi, kuarklar da daima toplam sıfır renge sahip kombinasyonlarda birbirine yapışır. Bir kuark ile antikuark çifti renksiz olabilir; örneğin kırmızı ile antikırmızı, toplam sıfır renk meydana getirir. Bu kuark-antikuark durumları, son bölümde karşımıza çıkan mezonlara, pionlara, laonlara vb. denk gelir. Fakat aynı zamanda her renkten bir tane olmak üzere üç kuarkı birbirine yapıştırmak da mümkündür ve renk analojisi burada işe yarar: Kırmızı+yeşil+mavi=beyaz veya renksiz. Protonlar ve nötronlar gibi



Hadronlar (bir mezon, bir baryon ve bir antibaryon) içerisinde renk yükünün dizilişi.

baryonlar da böyle üç kuark içeren parçacıklardır. Aynı şey, birleşerek antiproton ve antinötron gibi şeyler oluşturabilen üç antikuark için de geçerlidir.

Bunlar renksiz nesneler yapmak için kuarkları birbirine yapıştırmanın en basit yollarıdır fakat aslında bunu yapmanın yollarının sayısı sonsuzdur ve parçacık hızlandırıcılarda daha egzotik hadronlar keşfedilmiştir. Tetrakuarklarda iki kuark ve iki antikuark (yani kırmızı, mavi, antikırmızı ve antimavi) bulunur ve çeşitli deneylerde görülmüşlerdir. Daha sonra 2015'te CERN'deki LHCb Deneyi, dört kuark ve bir antikuark içeren (yani kırmızı, yeşil, mavi, kırmızı ve antikırmızı) pentakuarklar keşfetmiştir. Tetra ve pentakuarkların (veya hatta daha başka egzotik bileşimin) sorunu, her zaman renksiz olan iki daha hafif kombinasyona ayrılabilmeleridir. Örneğin tetrakuark, bir kırmızı antikırmızı mezon ile bir mavi antimavi mezona bölünebilir. Pentakuark, bir kırmızı-yeşil-mavi baryona ve bir kırmızı antikırmızı mezona bölünebilir. Bu tam da büyük hızda gerçekleşen şey gibi görünmektedir: LHCb'de keşfedilen pentakuarklar yaklaşık 10^{-23} saniye veya bir saniyenin milyarda birinin milyarda birinin milyonda birkaçı boyunca yaşar. Temel kuark-antikuark, üç kuark ve üç antikuark dışında başka bir kombinasyon fazlasıyla kararsızdır.

Renk değiştirmek

Bu üç boyutlu renk yükü, QCD teorisinin merkezindedir. Kuarklar yalnızca birbirine yapışarak renksiz nesneler oluşturmakla kalmaz, kuarkların bizzat kendisi de renk değiştirebilir. Bu esasen gluonların yaptığı şeydir: Eğer kuark renk yükleri üç olası yönden birine işaret eden küçük rüzgârgülleri gibiyse, gluonlar da onları döndüren rüzgâr gibidir: renk yükünün toplam miktarını veya rüzgârgülünün boyutunu değil, yalnızca işaret ettiği yönü değiştirirler.

Bu yalnızca fotonlar ile gluonlar arasındaki elzem fark nedeniyle mümkündür: Protonlar elektrik yükü taşımazken, gluonlar renk yükü taşır. Hatta iki tür taşırlar: Bir renk ve bir de antirenk. Bu kafa karıştırıcı olacak fakat nasıl işlediğine bir örnek verelim. Kırmızı bir kuark bir kırmızı+antimavi gluon yayabilir ve bir mavi kuarka dönüşebilir. Her rengin toplam miktarı daima aynı kalır: Kırmızı, kırmızı+mavi+antimavi olur, bu da toplamda yalnızca kırmızıya denk gelir fakat şimdi renk kuark ve gluon arasında bölünmüştür. Bu kırmızı+antimavi gluon, bir antikırmızı antikuark tarafından emilebilir, bu antikuark daha sonra bir antimavi kuarka dönüşür: Yine, her rengin toplam miktarı aynı kalır. Dolayısıyla bir kuarktan ve bir antikuarktan meydana gelen bir mezon, sürekli renk değiştirir. Kırmızı ve antikırmızı olarak başlayabilir fakat gluonlar takas ettikten sonra bunlar mavi ve antimaviye, ardından yeşil ve antiyeşile, sonra yeniden kırmızı ve antikırmızıya vs. değişebilir.

Fakat tüm bunları hatırlamanıza gerek yok! Önemli olan, bireysel kuarklar ne renk olursa olsun, her şeyin daima dengede kalmasıdır ve en sonunda hadronun daima sıfır genel renge sahip olmasıdır. Hatta kuark renklerinin sürekli değişimi bize tamamen görünmezdir çünkü kuarkları doğrudan ölçemeyiz. Bir hadron, dingin bir gölde huzurla süzülen bir kuğu gibidir. İçindeki aralıksız renk çalkantısını, suyun için-

de hiç durmadan yüzen ayakları görmeyiz. Bu, her birimizin içindeki her bir atomun merkezinde sürekli olmaktadır. Yakından baktığınızda dünya epey tuhaf bir yerdir.

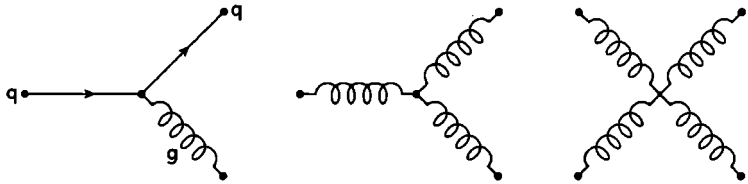
Uçan renkler

Kuarkları gluonlar tarafından farklı yönlere doğru üflenen küçük rüzgârgülleri olarak düşünerek, QED ile foton karşılaştırmasına bakmamız yerinde olur. Bu noktayı biraz deşersek, güçlü kuvvetin neden elektromanyetik kuvvetten çok farklı davrandığının nedenlerinin yanı sıra, güçlü kuvvetin etrafımızdaki dünyayı biçimlendirmedeki rolünü görürüz.

Fotonlar, elektrik yükü taşıyan parçacıklarla etkileşime girer; her elektrik yüklü parçacık bir foton emerek enerji kazanabilir, bir foton yayarak enerji kaybedebilir veya bir foton takasında bulunarak bir başka parçacıkla etkileşim kurabilir. Aynı şey, renk yüklü parçacıklar ve gluonlar için de geçerlidir; renk yükünün elektrik yükünden daha karmaşık görünmesi bu bakımdan bir şey değiştirmez. Fakat başka bir bakımdan arada büyük bir fark vardır: Fotonların kendileri elektrik yükü taşımaz, dolayısıyla diğer fotonlarla etkileşmezler. Gluonlar renk taşır ve güçlü kuvveti özel kılan da budur: Gluonlar diğer gluonlarla etkileşim kurabilir. Bu gluon etkileşimleri, teoriyi inşa etmekte kullanılabilecek yeni bir kural, iki gluon içeren bir verteks gösteren yeni tür bir Feynman Diyagramı çizmeyi gerektirir ve aynı zamanda dört gluon içeren bir verteks daha vardır:

QED'deki verteks gibi, bu yeni gluon köşeleri her yöne çevrilebilir. Bize bir gluonun bir diğerini emebileceğini söyler. Veya bir gluonun ikiye bölünebileceğini: gluonlar çoğalabilir ve bu devamlı hadronların içinde meydana gelmektedir.

Bunun fotonlara olmaması, fotonların birbirlerinin içinden kolayca geçmesi alışageldiğimiz bir şeydir. Masamda 5 volt-



QCD Feynman Diyagramının bileşenleri.

luk bir LED lamba var ve çok parlak ışık vermemesine karşın, her saniye yaklaşık milyar kere milyar foton yayıyor. Bu fotonlardan bazıları doğrudan gözüme seyahat ediyor. Bazıları duvarlardan, masamdan, klavyemden sekerek, her yöne saçılarak odayı aydınlatıyor. Etrafta zıplayan bu fotonlar devamlı çakışıyor fakat farkında bile olmadan doğruca birbirlerinin içinden geçiyor ve her yönden gelen fotonlar, oraya varmak için milyarlarca başka fotonun içinden geçmek zorunda kalmalarına rağmen, doğruca benim gözüme erişebiliyor.

QED'i, fotonların elektrik yükü taşıdığı ve birbiriyle etkileşime girebildiği bir kural ekleyerek değiştirebilseydik, dünya tamamen farklı bir yer olurdu. Elektrik yüklü parçacıkların karşılaştıklarında nasıl davrandıklarını biliyoruz: Birbirlerini itebilirler, birbirlerine çarpıp sekebilirler ve yön değiştirebilirler veya bunun yerine birbirlerini çekebilir, birbirlerine yapışabilirler. Aynı şey, elektrik yüklü fotonlar için de geçerli olurdu ve artık bir foton bir diğer fotonu bile emebilir ve bunu yaparken enerji kazanabilirdi. Lambamdan çıkan bir foton yalnızca kısa bir mesafe giderek bir başka fotonla karşılaşır, ardından ya diğerini iter, yön değiştirir ya da diğerini emer. Sonra aynı şey bir başka fotonla da olur, sonra bir başkasıyla, bir başkasıyla ve bu böyle devam eder. İş çıkışı saatinde platformda koşarak trene yetişmeye çalıştığınızı hayal edin; sürekli birilerine çarpar, yön değiştirmek zorunda kalırsınız. Derken en sonunda biri yolunuzu hepten tıkar. Hayalimde lambamdan yayılan elektrik yüklü fotonlar, ancak kısa bir

mesafe kat ettikten sonra başka fotonlara çarpıp seker veya tamamen emilir. Fotonların birbirleriyle etkileşmesi, elektromanyetik kuvvetin sınırlı olması anlamına gelirdi: Artık masa lambamı veya odamdaki hiçbir şeyi göremezdim çünkü gözlerime ışık ulaşmazdı.

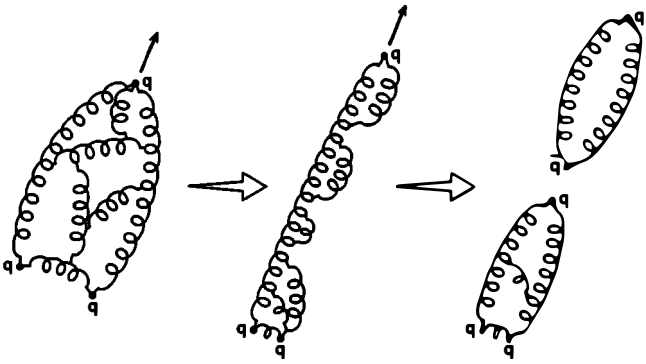
Güçlü kuvvete olan şey tam da budur. Onu asla deneyimlemeyiz çünkü gluonlar renk yükü taşır ve sınırlanmadan önce ancak kısa bir mesafe gidebilir. Her şey hadronlar içinde sıkıca sarılmıştır, ancak çekirdekte birbirlerinin hemen yanındayken hadronları birbirine yapıştırmak için çok kısa bir mesafe boyunca sızar. Renk yükü taşıyan hiçbir şeyin kaçmasına izin yoktur ve doğada ancak renksiz hadronlar bulunur.

Gluonlar renk taşıdığı için, teoride renksiz bir parçacık yapmanın aslında başka bir yolu daha vardır: Bir yapıştırıcı topu. İsminden anlaşılabileceği gibi, bir yapıştırıcı topu, sürekli bölünen, birleşen ve birbirine çarpıp sıçrayan, kuarksız bir parçacık meydana getiren pek çok gluondan meydana gelir: Saf kuvvetten ibarettir ve madde değildir. Bu tuhaf şey, tıpkı pentakuarklar kadar kararsız olmalıdır ve henüz var olduğuna dair kesin kanıt bulunmamakla birlikte o Standart Model'deki egzotik madde için zengin olasılıklardan yalnızca bir diğeridir.

Fıskiyeyle kaçış

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda protonları yüksek enerjilerde, onları parçalayabilecek enerjiden daha yüksek enerjilerde birbirleriyle çarpıştırırız. Güçlü kuvveti anlamak, LHC'de meydana gelen hemen her şeyi anlamanın anahtarıdır ve bu çarpışmalarda gluonların hareket edebildiği çok kısa mesafelerde neler olduğunu ve güçlü kuvvetin teşvik edildiğinde nasıl davrandığını görme fırsatını buluruz.

Her çarpışmadan önce her protonun içindeki kuarklar birbirlerine gluonlar ateşleyerek birleşir. Çarpışma ise, bu kuark-



Bir proton parçalanırken uzayan gluon sicimleri.

ların ikisi, hatta protonların içindeki iki gluon arasında meydana gelir. Çarpışmanın devasa enerjisi, geçici olarak güçlü kuvveti bastırır: Çarpışan kuark veya gluon, sanki serbest bir parçacıkmış gibi protondan dışarı uçmaya başlar. Fakat kaçmaya çalışırken, güçlü kuvvet uyanır.

Diyelim ki kuarklardan biri dışarı fırladı. Bu kuark ile diğerleri arasında uçan, onları birbirine bağlayan gluonların artık daha uzağa yolculuk etmesi gerekir. Onlar ne kadar uzağa yolculuk ederse, bir başka gluon yayma ihtimalleri de o kadar fazladır. Sonra bir tane daha, bir tane daha ve bu böyle devam eder. Güçlü kuvvet bırakmaz ve epey sabit kalırken kuark uzaklaşır, esneyen bir gluon sicimi kaçan kuarka uzanır. Bir protondan bir kuark çıkarmak, bir topu yokuş yukarı tekmeleye tekmelemeye tepeye çıkarmaya benzer; en sonunda topun enerjisi bitecek, gluonlar onu geri çekerken, gerisingeri aşağı yuvarlanacaktır.

Bu, elektromanyetik kuvvetin etkisinden farklıdır. Eğer masa lambamı alıp evden çıkarır ve sokakta bir yere koyarsam, ışığı masamı aydınlatamayacak kadar az gelir. Fotonlar her yönde yayılır; benim lambam gibi bir kaynaktan ne kadar uzağa giderlerse o kadar fazla yayılırlar. Fotonlar bu şekilde yayıldığı için elektromanyetik kuvvet de mesafeyle (hatta mesafenin ka-

resiyle) daha zayıf hale gelir. Güçlü kuvvet tamamen farklıdır ve mesafeyle beraber olabildiğince sabit kalır çünkü gluonlar daha uzağa giderken, çoğalma ihtimalleri daha fazladır. Gluonlar fotonlar gibi yayılmazlar çünkü boşlukları doldurmak için daima çoğalabilirler. Dolayısıyla bir kuark kaçmaya çalışırken, gluonlar devamlı onu geri çeker. En sonunda bir şey olması gerekir: Ya kuark yeniden protonun içine çekilecektir ya da eğer çarpışma yeterince sertse, gluon sicimi kopacaktır; bu sürece "hadronlaşma" denir.

Sicimde yeterli enerji toplandığında, gluonlar yeni parçacıklar yapmaya başlayabilir. Tıpkı yeterince enerjiye sahip bir fotonun eşzamanlı olarak bir madde + antimadde çiftiyle, elektrik yüklü bir çift parçacık oluşturabilmesi gibi. Sicimdeki gluonlardan biri, eşzamanlı olarak bir kuark ve antikuarka dönüşebilir ve bu da proton ile kaçan kuark arasındaki bağı kırabilir. Yeni antikuark, artık bu kaçan kuarkla bir araya gelip bir mezon oluşturabilirken, yeni kuark yeniden protona çekilebilir. Veya eğer ilk çarpışmada yeterince enerji varsa, bu süreç tekrarlayabilir: Kuarklar uçarak uzaklaşmayı sürdürür, daha fazla gluon sicimi kopar ve gitgide daha fazla hadron oluşturur. LHC'deki patlamalarda, protonlar genellikle tamamen paramparça olur ve dışarı uçan yüzlerce yeni hadronu görebiliriz. Bu yeni hadronlar, bir çarpışmadan çıkan ilk kuark (veya gluon) yönünde oluşma eğilimindedir ve *fıskiye*ler olarak da bilinen koşutlanmış püskürmeler olarak görünürler. Bu, sonraki bölümlerde döneceğimiz önemli bir kavramdır.

1.000.000 dolarlık soru

Şimdiye kadar güçlü kuvvetin genel olarak nasıl davrandığını anlattım fakat asıl önemsediğimiz, LHC'deki bir çarpışmada neler olabileceği gibi şeyleri hesaplamak için QCD kul-

lanmaktır. QCD'yi hesaplamalarda altından kalkması çok zor kılan şey, sadece gluon etkileşimlerini idare eden ekstra kural değil, güçlü kuvvetin çok güçlü olmasıdır. İkinci Bölüm'deki Feynman Diyagramlarının diliyle, bu, "eşleşme sabiti"nin, yani fazladan gluon üretilmesi ihtimalinin, büyük olduğu anlamına gelir. QED'in eşleşme sabiti, 1/137 civarındadır fakat LHC'deki bir çarpışma için güçlü eşleşme sabiti (α_s) 1/8 civarındadır. Bu, döngüler ve fazladan çizgileri olan daha komplike Feynman Diyagramlarının QCD'de QED'de olduğundan çok daha önemli ve genellikle başa çıkması son derece zor olduğu anlamına gelir.

QCD'nin şaşırtıcı yanlarından biri, yüksek enerjilerde daha basit hale gelmesidir. Eşleşme sabiti, hiç de sabit değildir ve küçülür. Fazladan gluonlar daha olasılıksız olur. Yeterince yüksek enerjide de, bir kuark bir hadronun içinden neredeyse tamamen çıkarılabilir. Bu özelliğe "asimptotik özgürlük" denir, 1970'lerde David Gross, Frank Wilczek ve David Politzer tarafından kanıtlanmış, onlara 2004'te Nobel Fizik Ödülü'nü getirmiştir.

Fakat madalyonun bir de öteki yüzü vardır: Eğer güçlü kuvvet yüksek enerjilerde daha zayıfsa, daha düşük enerjilerde daha güçlü olmalıdır. Kuarklar bir çarpışma sonucu fırlayıp uçarken gluonlar yaymaya başlar: α_s 1/8'den 1/4'e, 1/2'den neredeyse 1'e büyür; yani bir gluonun yayılması, sonra bir başkasının, sonra bir başkasının yayılması için neredeyse %100 olasılık vardır. Feynman Diyagramları kullanarak bir şeyler hesaplamak imkânsızlaşır ve bunun yerine gluon sicimlerine dayalı modeller kullanılır. Kuarklar arasında esneyen sicimler, çok sert çekilirse kopar ve en sonunda renksiz hadronlardaki her şeyi bağlar. Bu, hapsetme ve hadronlaşma sürecidir.

Aslında hapsetme sürecinin hâlâ QCD kurallarını izlediğine dair kesin matematiksel kanıtımız yoktur fakat görünüşe

göre meydana gelen şey budur. ABD'deki Clay Matematik Enstitüsü, bunu yedi "Milenyum Problemi"nden biri olarak seçmiştir ve "spektral boşluk problemi" olarak bilinen problemdeki hapsetme kanıtını sunabilenlere 1.000.000 dolar verecektir. Gerçi 2015'in sonlarında bu ödül üzerinde hak iddia etmek biraz daha zorlaşmış olmalıdır çünkü genel spektral boşluk probleminin "kararlaştırılamaz" (bu bir şeyin ispatlanamayacağını ifade eden teknik bir terimdir) olduğu gösterilmiştir. Herhalde sadece matematikte bir şeyi ispatlayamayacağınızı ispatlayabilirsiniz! Fakat bunun QCD'deki hapsetme sürecinin de ispatlanamaz olduğu anlamına gelip gelmediği henüz net değildir ve şimdilik ödül sahibini beklemektedir.

Bu bilimde klasik bir vakadır: Nasıl çözeceğimizi bildiğimiz "kolay" bir problem (asimptotik özgürlük) ve nasıl çözeceğimizi bilmediğimiz "zor" bir problem (hapsetme) var. Çiftliğindeki süt üretimini artırmak isteyen bir mandıracıyla ilgili eski bir fıkra vardır. Mandıracı kadın bölgedeki üniversiteden bazı akademisyenlere danışıp süt üretimini artırmak için ne yapabileceğini sorar. Aradan bir süre geçtikten sonra, bir fizik profesörü mandıracıyı arar ve ona şöyle der: "Mükemmel çözümü buldum! Ama yalnızca bir vakumda bulunan sürtünmesiz, yuvarlak ineklerde işe yarıyor." Fıkra çok komik olmasa da, açıklayıcıdır. Zor problemleri olabildiğince basitleştirmek baştan çıkarıcıdır fakat işin sonunda cevabın gerçek dünyayla herhangi bir bağı var mıdır? Bilimin büyük kısmı da bu noktada uğraş verir: Modeller geliştirilir, test edilir, iyileştirilir, tekrarlanır.

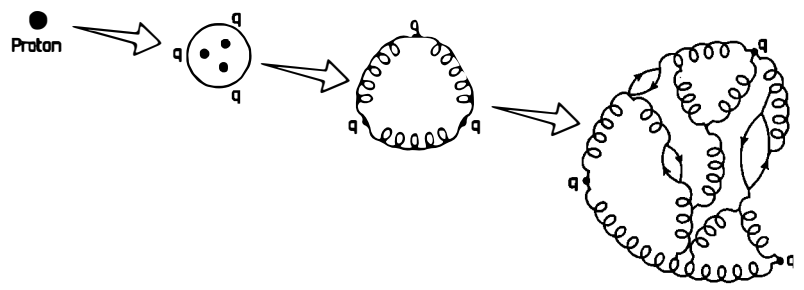
QCD çok çetrefillidir. LHC'deki hesaplamalar, iki uç noktayı birbirine yamamayı içerir: Çarpışmanın çözebildiğimiz ilk parçası için isabetli Feynman Diyagramı hesaplamaları ile çarpışmanın çözemediğimiz son parçası için gluon sicim modellerine ek olarak iki uç noktayı birleştirmek için bazı diğer modeller. Bu, uzun yıllardır teorik faaliyetin büyük kısmını

oluşturmuştur ve güçlü kuvvetin davranışını anlama yolundaki büyük başarılardandır. Fakat bu hesaplamalar modellere dayandığından kalibre edilmeli, gerçekliğe uyması için "ayarlanmalıdırlar". Deneysel fizikçiler olarak yaptığımız ilk ölçümler, çarpışmalarda üretilen ortalama hadron sayısı gibi temel şeylerdir ve daha sonra modelleri, sonuçlara uymak üzere ayarlayabiliriz. Biraz ayarlamadan sonra, hesaplama LHC'de meydana gelebilecek bir dizi farklı şeyi başarıyla izah edebilir. Bu şarttır çünkü eğer sıradan bir çarpışmanın temel fiziğini anlamazsak, yeni bir egzotik parçacığın tüm karmaşa içinde bir yerlerde üretildiği çok ender çarpışmaları tespit etmek için neredeyse hiç umudumuz olmaz.

Örgü QCD olarak bilinen düşük enerjili QCD'yi modellemek için başka teknikler kullanılarak ilerlemeler kaydedildi. Bir hesaplamayı bir dizi daha karmaşık Feynman Diyagramına bölmek yerine, Örgü QCD alanı her biri komşusuyla etkileşim içindeki bir dizi noktaya böler. Çok yoğun olan bu hesaplamalar büyük süper bilgisayarlarda uzun işlem süreleri gerektirir fakat başka türlü elde etmesi imkânsız sonuçlar üretir. Örneğin, çeşitli hadronların kütle ve özelliklerinin yanı sıra yapıştırıcı toplarının ve pentakuarkların varlığını da öngörmüştür. Hesaplamalar geliştikçe, ileride onları doğrudan LHC'deki çarpışmaların daha da gerçekçi tanımlamalarını üretmekte kullanabilir, günümüzdeki "ayarlama" ihtiyacını azaltabiliriz.

Bir protonun içindeki yaşam

QCD de bize bir hadronun içinde olan bitenler hakkında çok daha fazla şey söyler. LHC'de çarpıştırdığımız parçacığı, protonu ele alalım. Proton belirli bir mesafeden katı bir nesneye benzer. Biraz yakından bakınca ise kuarkları görürüz. Basit bir proton modeli üç kuarktan oluşur: Yukarı, yukarı, aşağı.



Protona yakından bakış.

Fakat QCD'ye göre bu kuarklar, iyi dengelenmiş bir makinenin içinde sürekli dönen küçük kollar gibi, gluonlar takas ederek devamlı renk değiştirir ve daha yakından bakarsak bu gluonları seçebiliriz. Daha da yakından bakacak olursak, bu gluonların bazılarının, Feynman Diyagramlarındaki döngüler gibi, kısa ömürlü kuark-antikuark çiftlerine dönüştüğünü görebiliriz. Biz baktıkça daha fazla şey olup biter ve LHC'deki çarpışmalar bu incelikli yapıya duyarlıdır: Bu yapı büyük ölçüde gluon içerir fakat çarpışma aynı zamanda asıl kuarklardan birini veya bu kısa ömürlü kuark veya antikuarkları da dışarı çıkarabilir.

Bir protonda pek çok şey olup biter ve parçacıklar bunun gibi küçük bir yere sıkıştırıldığında tuhaf davranışlar sergilemeye meyillidir. Bunu ilk olarak Heisenberg 1927'de keşfederek, ileride daha detaylı bahsedeceğimiz Belirsizlik İlkesi'ni ortaya atmıştır. Heisenberg o sıralar güçlü kuvvetle uğraşmasa da, atomların içindeki elektronların nasıl davrandığını anlamaya çalışıyordu. Klasik fizikçiler, elektronların doğrudan çekirdeğe doğru sarmal yapması gerektiğini söylüyordu fakat böyle bir şey olmaz ve Heisenberg'in bu soruna verdiği cevap, bir parçacığın hem konumunu hem de momentumunu bilmenin imkânsız olduğunu söyleyen Belirsizlik İlkesi olmuştur. Elektromanyetik kuvvet bir elektronu daha küçük

bir yörüngeye çekerken, elektron momentumunu artırır ve yeniden dışarı kaçar. Elektron yörüngeleri böyle, aralıksız bir mücadelenin ürünüdür ve tıpkı bir balonu sıkmaya çalıştığınızda bir başka yerinin şişivermesine benzer. Elektromanyetik kuvvet biraz daha güçlü olsaydı, elektronları daha yakına çekebilirdi ve bunun sonucunda atomlar çok daha küçük olurdu.

Aynı şey protonun içindeki kuarklara da olur fakat güçlü kuvvet çok güçlü olduğundan, kuarkları çok daha küçük bir alana sıkıştırabilir: bir proton bir atomun içindeki elektron yörüngelerinden yaklaşık 10.000 kat küçüktür. Kuarklar çok daha küçük bir alanda sınırlandırılmış olduğundan, Belirsizlik İlkesi onların çok fazla momentum kazanması gerektiğini söyler. Bir protonun içindeki kuarklar tıpkı kafese konmuş hayvanlar gibi etrafta koşturur, kaçmaya çalışıp da gluonlar tarafından geri çekilene dek, hareket özgürlükleri vardır.

Tüm hadronlar içindeki bu aralıksız ve yüksek hızlı hareketin bir başka sonucu daha vardır ve $E=mc^2$ formülünü izleyen bu sonuç bizim için çok önemlidir. Einstein'ın denklemi bize enerji ile kütlenin eşit olduğunu söyler ve gerçekten de, kuarkların ve bir hadronun içindeki gluonların hareketinin enerjisi, o hadronun kütlesi olarak görünür. Proton ile nötronların kütlelerinin %95'inden fazlası, kuarkların kütlelerinden değil de, bu "bağlanma enerjisi"nden, QCD kuvvetiyle minik bir alanda tutulan kuarkların ortalıkta gezinmesinden gelir. Başka bir tabirle, proton ve nötron gibi hadronlar gerçekten de hafif olmalıdır fakat kuarkları böylesine minik bir alan içinde tutmak için gereken enerji onları ağır kılar.

Proton ve nötronlar elektronlardan çok daha ağırdır ve atomlardaki kütlenin büyük kısmından sorumludur. Atomların kütlesi ise, atomlardan meydana gelen her şeyin kütlesinden sorumludur: Yani benden, sizden ve dünyadaki diğer

her şeyden. Etrafımızdaki her şeyin kütlesinin %95'ten fazlası QCD'den ve bu tuhaf hapsetme özelliğinden kaynaklanır. Geri kalan %5 mi? O kısım da, zayıf kuvvetten bahsettikten sonra geleceğimiz Higgs bozonundan kaynaklanmaktadır.

QCD'de ortaya çıkan pek çok tuhaf şey vardır. Genellikle protonları çarpıştırmasına karşın, LHC her yıl birkaç hafta boyunca kurşun çekirdekleri de çarpıştırır. 82 proton ve 120 nötrondan meydana gelen kurşun çekirdekleri büyük ölçekte çok minik olsa da, parçacık fiziği açısından alabildiğine büyüktür. Çarpıştırıldığında, bu çarpışmalar geçici olarak bir laboratuvarda üretilmiş en yüksek sıcaklıkları (birkaç trilyon santrigrat) ve çekirdeğin "kuark-gluon plazması" olarak bilinen bir çorbada eriyormuş gibi göründüğü, tamamen farklı bir madde hali oluşturabilir ve ALICE Deneyi (Ağır İyon Çarpıştırıcı Deney) onu LHC'de incelemeye odaklanır. Bu plazmanın, tüm maddenin minik bir alanda parçalandığı Büyük Patlama'dan hemen sonra tüm evreni doldurmuş olduğu öngörülür ve çorbadan çıkan şey, bize evrenin nasıl evrimleştiği ve neden bugünkü gibi göründüğüne dair önemli şeyler söyleyebilir.

Gizli güç

Bu bölümde, atom çekirdeğini bir arada tutan kuvvet, yani güçlü kuvvetin dünyasında kısa bir gezintiye çıktık. Bu kuvvet çok uzun zaman bir gizemden ibaretti fakat deneyciler protonları çarpıştırmaya başladığında, onun şaşırtıcı şekilde dinamik ve karmaşık olduğunu gösterdiler. Güçlü kuvvet teorisi QCD, QED'e oldukça benzer bir şey olarak başladı: İkisi de bir elektrik yükü taşıyan parçacıklar arasında uçan bir bozonla aktarılan bir kuvveti tanımlar. Fakat QCD'ye fazladan bir kural daha eklemek (güçlü kuvvet bozonları da renk yükü taşır)

güçlü kuvvete büsbütün ayrı bir karakter verir. Bu karakter, yüksek enerjilerde asimptotik özgürlükten düşük enerjilerde hapsetme sürecine dek değişim gösterir.

QCD'nin pek çok farklı yüzü onu büyüleyici bir konu kılar ve ben de araştırma kariyerimin büyük bölümünü yüksek enerji cephesinde onun öngörülerini test etmeye adadım. Aynı zamanda tüm bu tahminlerin asla net olarak göremeyeceğimiz şeylere dayalı olması gibi tuhaf bir durumla karşı karşıyayız. Hapsetme, kuark ve gluonların daima hadronların içinde mahsur kaldığı, daima görünmez şekilde sarmalanmış olduğu anlamına gelir. QCD saat düzeneği gibi çalışır fakat biz yalnızca saatin kadranını görebiliriz, içeride dönen çarkları değil. Peki, bir şeyi ölçemiyorsak, o şey gerçekten var mıdır? Bu, QCD'nin ilk günlerindeki büyük sorulardan biriydi fakat artık gerçek bir şüphe bulunmuyor. Eğer o kuarklar ve gluonlar var olmasaydı, LHC'deki çarpıştırmalar çok farklı görünürdü ve biz de onları tanımlamak için büsbütün farklı bir teoriye ihtiyaç duyardık.

Gelgelelim, güçlü kuvvetin katıksız gücü, teoride hesaplamaları çok daha zorlaştırır, dolayısıyla, bunun yerine isabetli Feynman Diyagramları ile gluon sicimleri modellerinin bir karışımından faydalanırız. Buna karşın, QED'de olduğu gibi, teori gerçekten işe yarar: QCD LHC'deki çarpıştırmaların sonucunun yanı sıra, güçlü kuvvetin pek çok başka yönünü yüksek kesinlikle tahmin eder. Hapsetme, bize aynı zamanda dünyadaki kütlenin büyük kısmının aslında güçlü kuvvetin kuarkları minik proton ve nötronda sıkıştırmasına bağlı olduğunu, bu hadronların içlerinin de sürekli değiştiğini söyler. Güçlü kuvvet çoğunlukla eylemsiz görünebilir fakat kutunun içine bir göz attığınızda, orada büsbütün ayrı bir dünya olduğunu fark edersiniz. Bu kuvvet olmasaydı, evren çok farklı bir yer olurdu.

Bir sonraki bölüm Standart Model'deki başka bir kuvvetten, yine buna benzer fakat aynı zamanda farklı olan ve dünyamızın oluşmasında bir o kadar önemli rol oynayan bir kuvvetten bahsedecek.

BEŞİNCİ BÖLÜM

KUVVET ZAYIFLIYOR

Çekirdeği bir arada tutan güçlü kuvvet ve elektronları yörüngede tutan elektromanyetik kuvvetle, etrafımızdaki fiziksel dünyayı hemen her şeyiyle açıklamak için gereken temel malzemelere sahibiz. Gelgelelim, bu tabloya eklenecek bir kuvvet daha var ve atomaltı parçacıkların dünyasında olup bitenler arasında muhtemelen en tuhafı da odur. Bu zayıf kuvvettir ve gerçekten de çok zayıf görünmesine karşın, Standart Model'de ve evrenin oluşumunda çok önemli bir rol oynadığı anlaşılmıştır. Güneş'in yanmasını sağlar ve neden her şeyin sadece protonlar, nötronlar ve elektronlardan meydana geldiğini açıklar. Zayıf kuvvet olmasaydı, biz de olmazdık.

Işınların gizemi çözülüyor

Zayıf kuvvetin varlığına ilişkin ilk ipuçları, 1899'da Rutherford tarafından sınıflandırılan radyasyon türlerinden biri olan beta bozunumuyla birlikte geldi fakat güçlü kuvvetin tespitinde olduğu gibi, yol boyunca pek çok farklı model geliştirildi ve zayıf kuvvet, Standart Model 1968'de geliştirilene dek tam anlamıyla anlaşılmadı. Bu bölüm, buraya nasıl vardığımızın tarihinden ziyade şimdi bildiğimiz şeylerin bir özeti olsa da,

beta bozunumu eylem halindeki zayıf kuvvetin en net örneklerinden biridir; bu nedenle oradan başlayacağım.

Radyoaktivitenin dört ana türü vardır: Alfa, beta, gama ve nötronlar. (Rutherford o sıralar nötronları bilmiyordu, bu nedenle onlara "delta" dememişti). Bunlar genellikle bir atom çekirdeği kararsız olduğunda meydana gelir ve atom çekirdeği daha sabit bir yapıya döner; bu farklı türde radyasyonların kombinasyonu sıklıkla birbiri ardına meydana gelir, sonunda da çekirdek durulur.

İlk olarak, protonlar ile nötronlar yalnızca daha sıkışık bir düzende karışabilir. Bu biraz bavul hazırlamaya benzer; kıyafetler dertop edilmek yerine güzelce katlanırsa bavul çok daha fazla eşya alacaktır. Bir çekirdek bu yeniden düzenlemenin bir kısmını yaptığında, yüksek enerjili bir foton (bir gama ışını) formunda enerji salar. Bazen tekrar karıştırmak yeterli değildir ve pofuduk tulumunuzu çıkarmadığınız sürece bavulunuzu kapatamazsınız. Bu tür durumlarda, çekirdeğin bir parçası bir alfa parçacığı, yani birbirine bağlı iki proton ve iki nötron formunda kırılabilir. Veya çekirdek, iki bavulu tercih edebilir ve daha küçük iki çekirdeğe ayrılır, belki geriye biraz nötron kalır; bu nükleer santrallerin motoru olan fisyondur.

Ancak bazen yarınıza bambaşka bir kıyafet almanız daha iyidir. Bu nedenle artık bir şeye uymayan o kravatı da çıkarabilirsiniz. Bu beta bozunumudur: Çekirdek, bir nötronu protona dönüştürerek ve bir beta parçacığı, yani elektron atarak yeniden düzenlenir. Beta bozunumu, ters şekilde de olabilir: Bir proton bir nötrona dönüşerek bir antielektron atabilir. Bu, Güneş ile evrendeki tüm yıldızlara güç veren süreçlerden biridir. Her halükârda, çekirdekteki protonlar ile nötronların toplam sayısı aynı kalır fakat aralarındaki denge değişerek çekirdeğin daha kararlı olmasına izin verir.

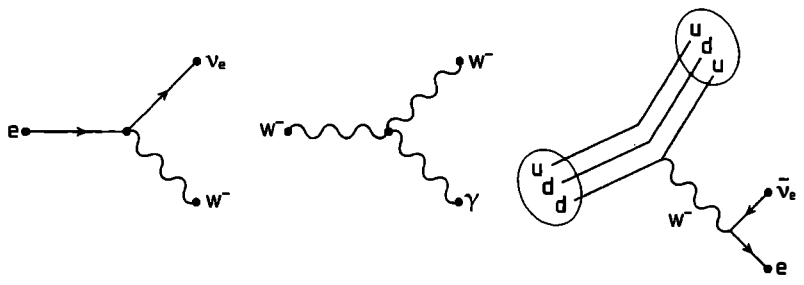
Kuark modeli bize beta bozunumunda neler olması gerektiğini söyler. Proton üç kuarktan meydana gelmektedir:

Yukarı, yukarı, aşağı (şimdilik ptoronlar LHC'de çarpıştırıldığında belirebilen fazladan gluonları, kuarkları ve antikuarkları yok sayabiliriz!). Nötron da üç kuarktan meydana gelir: Yukarı, aşağı, aşağı. Dolayısıyla bir nötron bir protona dönüştüğünde bu aşağı kuarklardan biri bir yukarı kuarka dönüşmek zorundadır. Oralarda bir yerde aynı zamanda elektron da üretilir.

Sorun, şimdiye dek bahsettiğimiz teorileri kullanarak bunu izah etmemizin imkânsız olmasıdır. Elektromanyetik kuvvet elektrik yüklü parçacıkların etkileşimine izin verir fakat etrafta ne kadar foton uçarsa uçsun, onlar aynı parçacık olarak kalır. Güçlü kuvvet bir kuarkın "rengini" değiştirebilir fakat kuarkın türü daima aynı kalır. Bildiğimiz hiçbir kuvvet veya parçacık etkileşimi, bir aşağı kuarkı bir yukarı kuarka dönüştüremez ve beta bozunumunu açıklayan bir Feynman Diyagramı da çizemeyiz. Bunu çözmek için yeni tür bir etkileşime, yeni bir kuvvete ihtiyaç duyarız. Bu, zayıf kuvvettir.

Tüm kuvvetler gibi, zayıf kuvvet de bir elçi parçacığı, bir bozon tarafından aktarılır. Bu, W parçacığıdır (W: weak, yani zayıf) ve tıpkı güçlü kuvvetin gluonu gibi, W bozonu da bazı özel niteliklere sahiptir: Örneğin bir parçacığı bir başka parçacığa dönüştürebilir. Bir aşağı kuark bir W bozonu yaydığında, bir yukarı kuarka dönüşür. Aşağı kuark -, yukarı kuark ise + elektrik yükü taşıdığından, W -1 birim yük taşıyor olmalıdır. W elektrik yüklü olmalıdır. Böylece bir elektrona, yani tüm bunları başlatan beta parçacığına bozunabilir.

Beta bozunumunun kesin ölçümleri, bu tabloda aslında bir sorun olduğunu göstermiştir: Elektron, nötron protona dönüştüğünde salınan tüm enerjiyi taşıyormuş gibi görünmez. Böylece 1930'da Wolfgang Pauli, yeni ve görünmez bir parçacığın, nötrinonun elektronla beraber üretildiğini ve enerjinin geri kalanını taşıdığını tahmin etti. Bu, çok daha dengeli, QED ve QCD için gördüğümüz Feynman Diyagramlarına daha çok



Zayıf kuvvet Feynman Diyagramlarının bileşenleri ve sağda beta bozunumu Feynman Diyagramı.

benzeyen bir tablo sunar: Bir tarafta bir parçacık bir bozon yayar; o bozon daha sonra bir parçacık ve antiparçacık çiftine dönüşür (nötrino ν simgesiyle anılır).

Zayıf kuvvet Feynman Diyagramlarından tam bir teori inşa edebiliriz. Bunlar, QED için Feynman Diyagramlarına benzerdir fakat sadece W verteksinde parçacığın türü değişir. Zayıf kuvvet için bir verteks daha vardır: W elektrik yükü taşıdığından, bir fotonla etkileşebilir. Zayıf kuvvet etkileşimleri öyle enderdir ki, mümkün olan en basit Feynman Diyagramı bile neler olup bitiğine dair epey isabetli bir tablo sunar. Birkaç W bozonu içeren daha karmaşık bir etkileşim şansı öyle küçüktür ki, tamamen yok sayılabilir. Dolayısıyla, bu diyagram bize beta bozunumunun hemen hemen bütün hikâyesini anlatır:

Beta bozunumda antinötrino görmeyiz çünkü nötrino elektrik yükü veya renk yükü taşımaz ve sadece zayıf kuvvet üzerinden etkileşime girer. Yani öyle ender etkileşime girer ki, Pauli şöyle söylemiştir: "Korkunç bir şey yaptım, tespit edilemeyen bir parçacığın var olduğunu farz ettim." Deneyciler elbette güçlüklerden keyif alır ve yirmi altı yıl sonra Clyde Cowan ile Frederick Reines, Pauli'nin imkânsız olduğunu düşündüğü şeyi başardı, yani nötrinoları ölçtü. Nötrinolara Sekizinci Bölüm'de döneceğiz çünkü onlar günümüzde parçacık fiziği araştırmasının en aktif sahalarından birini oluşturur.

Zayıf kuvvet neden zayıftır?

Zayıf kuvvetin zayıf olmasıyla kastedilen şey, bu kuvvetin dahil olduğu etkileşimlerin ender olmasıdır. Beta bozunumu saniyeler, saatler, hatta milyarlarca yıl bile sürebilir. Buna karşın, zayıf kuvvetle ilgili bilinmesi gereken bir şey, aslında o kadar da zayıf olmaması gerektiğidir: Ters bir durum olmadığı sürece, zayıf kuvvet dünyamızda elzem bir rolü olan elektromanyetik etkileşimden çok daha önemlidir: Zayıf kuvvetin eşleşme sabiti α, QED'in 1/137'sinden yaklaşık 5 kat büyüktür. Gelgelelim, ters bir durum söz konusudur.

Beta bozunumu, meydana gelebilecek pek çok parçacık bozunum türlerinden yalnızca bir tanesidir ve bu bozunumların ne kadar hızlı meydana geldiğini belirleyen iki ana faktör vardır. Birincisi, basitçe ne kadar uygun olduğudur. Nötron, bir protondan yalnızca %0,1 daha ağırdır, dolayısıyla bir nötron beta bozunumu sırasında bir protona dönüştüğünde, geri kalan kütlenin bir kısmı daha hafif elektron ile antinötrinoya ve $E=mc^2$ hesabına göre geri kalanı enerjiye dönüşür. Daha hafif parçacıklar tıpkı bir patlamanın enkazı gibi, etrafa uçar. Müonlardan en ağırları üst kuarklara dek başka pek çok parçacık da benzer şekillerde bozunabilir. Baştaki parçacık ne kadar ağırsa, son parçacıklar bir o kadar hafiftir ve tepkime de bir o kadar uygundur. İster inanın ister inanmayın, bu son teknoloji televizyonlar satan bir mağaza gibi düşünülebilir. Normalde bu çok pahalı modeller sık satın alınmaz. Fakat %20 indirim yaptığınızda satışlar muhtemelen artar %50 indirim yaptığınızda ise daha hızlı artacaktır. %90 indirim yaparsanız televizyonlar raflardan anında kapılacaktır. Orta seviye bir televizyon indirimdeyse fakat üst model televizyonla aynı fiyattaysa, o kadar çabuk satılmayacaktır. Bozunumlar da böyle işler: Liste fiyatı (parçacığın başlangıçtaki kütlesi) ne kadar yüksekse ve satış fiyatı (son parçacıkların birleşik kütlesi) ne kadar düşükse, bozunum da o kadar hızlı meydana ge-

lir. Bir beta bozunumu, fiyatında daha az indirim yapılmış bir orta seviye televizyon gibidir, yani öteki parçacık bozunumu tiplerinden daha ender rastlanan bir olaydır.

Bu indirim bir faktör olsa da, zayıf kuvvetin zayıf olmasının ana nedeni değildir. W bozonlarıyla ilgili büyük sürpriz, foton ve gluonun aksine, W'nin kütlesinin olmasıdır. Hatta çok ağırdır: Bir protondan yaklaşık 85 kat ağırdır. Bunun parçacığın bozunumunu nasıl etkilediğini görmek için, mağazanın televizyonun fiyatında %90 indirim yaptığını fakat aldığınız malı evinize getirmesi gerektiğini düşünelim. Bu teslimatın ücreti, televizyonun asıl fiyatının 85 katıdır. Ürün bu sebeple kelepir olmaktan çıkar ve satışlar çabucak durur. İşte zayıf bozunumlarda da bu meydana gelir: W bozonu son derece ağırdır ve bozunumun meydana gelmesi için, bu W bozonunu meydana getiren enerjinin başka bir yerde bulunması gerekir. Tekrar beta bozunuma baktığımızda bir nötronla başlıyoruz, sonra bu sürecin yarısında bir protonumuz ve son derece ağır bir W bozonumuz oluyor. Bir anda bir sürü kütle ortaya çıkmış oluyor. Böylesi bir tepkimede, sonunda televizyona, elektrona ve nötrinoya verecek yeterli paramız olsa da, teslimat, yani W bozonu için paramız çıkışmaz. Beta bozunum imkânsız olmalıdır. Zayıf kuvvet yalnızca zayıf olmakla kalmamalı, gerçekleşmemelidir bile!

Fizik yasalarını eğmek

Feynman Diyagramı diline dahil etmemiz gereken bir parça daha kuantum mekaniği vardır ve onu beta bozunum vakasında görebiliriz. Yeniden baktığımızda görürüz ki, bu diyagramın ortasında bir W bozonu vardır fakat onu asla ölçemeyiz: bir kuarktan yayılır, sonra bir elektrona ve bir antinötrinoya bozunur. Feynman Diyagramlarının ortasına hapsedilmiş böylesi parçacıklara "sanal parçacıklar" denir. Bu sanal par-

çacıkları asla doğrudan ölçemeyiz ve görünüşe bakılırsa, fizik kanunlarına uymak zorunda bile değillerdir.

Fizikte birkaç temel kural vardır; bu kurallar her şey tarafından saygı görür ve bize bizzat evrenle ilgili derin bir şey söylerler. Bu kurallar genellikle belirli şeylerin korunduğunu, zamanla değişmediğini söyler ve bunlardan biri de Enerjinin Korunumu Yasası'dır. Bu temel olarak, karşılığını vermeden enerji alamayacağınız anlamına gelir. Ne kadar çok enerjiyle yola çıkarsanız çıkın, en sonunda yine aynı miktara sahip olmanız gerekir. Yaptığınız çoğu şey, bir enerji türünü bir başka enerji türüne çevirmeyi içerir: Bir su ısıtıcısı elektrik kuvvetini ısıya çevirir, bitkiler güneş enerjisini şekere ve enerjiyi hapseden başka moleküllere çevirir, arabalar benzin yakarak o kimyasal enerjinin bir kısmını kinetik enerjiye (harekete) çevirir. Fakat bütün bu örneklerde toplam enerji miktarı aynı kalır. Elektrik olmadan bir su ısıtıcısını, benzin olmadan arabanızı çalıştıramazsınız. Enerji çıkarabilmek için enerji konmalıdır. Atomların davranışlarından galaksilerin hareketine ve başka her şeye dek evrendeki her şey bu kurala uyar. Tabii her şey derken, sanal parçacıklar, yani Feynman Diyagramlarında ölçemediğimiz parçacıklar dışında demek istiyorum.

Bu, son bölümde bahsettiğimiz Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi'nin bir başka sonucudur. Bu ilkeye göre, parçacıklar küçük bir alana sıkıştırıldığında, kaçmaya çalışırlar. Fakat aynı zamanda bu sanal parçacıkların kuralları bozmaya, kısa süreliğine küçük miktarda enerji ödünç almalarına izin vardır. Bu da beta bozunumunun meydana gelmesine ve zayıf kuvvetin varlığına izin veren şeydir: Ödünç alınan enerji, teslimat masrafını ödeyen kısa vadeli bir borç görevi görerek, W'yi yapmakta kullanılabilir. Ne var ki, ne kadar çok ödünç alınırsa, meydana gelme ihtimali o kadar azdır ve bir W bozonu yapmak için devasa miktarda enerji ödünç alınmalıdır.

Etkileşimleri ender kılan da budur. Bu kadar büyük miktarda enerji ödünç almak, borcun daha hızlı tahsil edilmesi anlamına gelir; yani W bozonu bir saniyenin binde biri boyunca var olabilir, sonra enerji iade edilmeli ve her şey dengelenmelidir. Bu zaman sınırı nedeniyle, zayıf kuvvet ancak son derece kısa mesafelere erişebilir: Bir metrenin yaklaşık milyarda birinin milyarda birine; yani bir atomdan, çekirdekten, hatta bir protondan yaklaşık bin kat daha kısa bir mesafeye.

Bu iki faktör (fiyatta indirim ile teslimat için gereken borç), pek çok kararsız parçacığın ömürlerinde rol oynar. Nötron ortalama yaklaşık 15 dakika yaşar. Ortalama diyorum çünkü bu bozunum bir kuantum sürecidir ve belirli bir nötronun bozunduğu zamanda bir rastlantısallık unsuru vardır. Bir çekirdeğin içinde, elektromanyetik kuvvet enerji dengesini etkiler ve nötronlar tamamen kararlı hale gelebilir; atom için iyi haber! Bir müon bir elektrona bozunduğunda, daha fazla enerji salar ve dolayısıyla ortalama bir müon, yalnızca birkaç mikrosaniye yaşar. Yine de bu süre kilometrelerce mesafe uçabilmesine yeter. Tau leptonu veya tılsım ve aşağı kuarklar içeren hadronlar gibi, parçacık hızlandırıcılarda keşfedilmiş diğer ağır parçacıklar da bozunduklarında daha fazla enerji salar ve sadece nanosaniyeler boyunca yaşar, yalnızca birkaç milimetre veya daha az mesafe kat eder ve bozunur.

Parçacık çiftleri

Kuvvetler hakkında bildiğimiz başka bir şey de, yalnızca doğru yükü taşıyan parçacıklar tarafından hissedildikleridir. Kuarklar renk yükü taşır, dolayısıyla güçlü kuvveti hissederler. Neredeyse tüm parçacıklar elektrik yükü taşır, dolayısıyla elektromanyetik kuvveti hissederler. Zayıf kuvvet için ona denk gelen bir "zayıf yük" olmalıdır ve esasen tüm fermiyonlar, tüm kuark ve leptonlar onu taşır. Renk yükü güçlü kuvve-

tin davranışını belirlemede nasıl etkiliyse, bu zayıf kuvvetin de eşsiz bir karakteri vardır.

Önceki bölümde, elektrik yükü "tek boyutlu"yken, renk yükünün "üç boyutlu" olduğuna işaret etmiştim. Bir birim elektrik yükü taşıyan bir parçacık, diğer herhangi bir parçacık gibidir fakat bir birim renk yükü taşıyan bir parçacık, üç yönden (kırmızı, yeşil veya mavi) birine işaret ediyor olabilir ve gluonlar tıpkı farklı yönleri gösteren bir rüzgârgülüne üfler gibi, bu rengi değiştirebilir. Bu zayıf kuvvet "iki boyutlu" olarak arada yer alır. Zayıf kuvvetin tıpkı bir demir para gibi iki olasılıklı durumu vardır. Tüm fermiyonlar çifttir, zayıf kuvvetin yazısı veya turasıdır ve W bozonu, tıpkı bir demir parayı yazı tura atmak gibi, birini diğerine dönüştürebilir.

Beta bozunuma bakarak şimdiden her şeyi zayıf yüklü çiftler halinde gruplamak mümkündür. Yukarı ve aşağı kuark, bir çift olmalıdır, bir W ise beta bozunumu sırasında aralarında gidip gelebilir. Beta bozunumun diğer tarafı sayesinde, elektron ile nötrinonun bir başka çift olması gerektiğini biliyoruz. Bildiğimiz tüm parçacıklar bu çiftler içindedir, dolayısıyla üç tür nötrino olmalıdır: Elektron nötrino (ν_e) elektronla, müon nötrino (ν_μ) müonla, tau nötrino (ν) da tau'yla eşleşir. Kuarklar da aynı şekilde eşleşir: Acayip ve tılsım, yukarı ve aşağı vb. Bir demir para gibi yazı veya tura; W bozonunun demir parayı tersine çevirme gücü vardır. Bu zayıf çiftler, Standart Model'e son yapısını da verir: Şimdiye dek fermiyonlar (güçlü kuvveti hisseden) kuarklar ve (onu hissetmeyen) leptonlar halinde gruplanmıştır fakat aynı zamanda, aynı demir paranın iki yüzü gibi olan, bu zayıf eşler halinde de gruplanırlar.

Bu eşleşme, kimi parçacıkların keşfedilmeden evvel tahmin edilmelerinde kullanıldı. Acayip kuark, kozmik ışın deneylerinde keşfedildi ve zayıf kuvvet modelinin geliştirildiği 1970'e gelindiğinde, onun bir eşi olması gerektiği anlaşıldı,

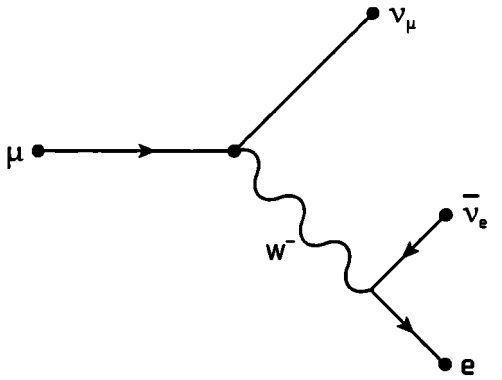
yani dört yıl sonra keşfedilen tılsım kuark öngörüldü. Aşağı kuark, 1977'de keşfedildi fakat hızlandırıcıların eşini, bildiğimiz en ağır parçacık olan yukarı kuarkı yapabilecek kadar güçlü olması için on sekiz yıl beklemek gerekti. Son olarak tau lepton 1975'te keşfedildi; onun da bir tau nötrino eşi olmalıydı. Nötrinoları ölçmek çok zor olduğundan, bu 2000'e dek keşfedilmedi. Böylece tablo tamamlanıyor. Üç nesil kuark çifti ve üç nesil de lepton çifti vardır ve Standart Model'deki 12 parçacığı oluştururlar. W bozonu da her parçacığı eşine çevirebilir.

Zayıf kuvvet aynı zamanda Standart Model'deki tüm parçacıklar düşünülürse neden dünyanın yalnızca en hafiflerinden, yukarı ve aşağı kuark ile elektrondan oluştuğunu da açıklar.

Bu en kolay müonun bozunması durumunda kavranabilir. Bu (sanal) bir W yayabilir ve bir müon nötrinoya dönüşebilir. W daha sonra bir elektrona ve elektron antinötrinoya bozunabilir. Saniyenin binde birinde, artık müon kalmamıştır. Aynı şey, W yayan, tau nötrinoya dönüşen taulara da olur; W daha sonra ya bir elektron ve elektron antinötrinoya ya da müon ve müon antinötrinoya dönüşecektir. Birkaç nanosaniye sonra, artık tau yoktur. Yalnızca en hafif leptonlar hayatta kalır: Elektron ile bir sürü nötrino. Bunun nedeni, yalnızca bozunabilecekleri daha hafif bir şey olmamasıdır.

Karışık kuarklar

Kuarklarla da aynı şeyi deneyebiliriz. Ağır bir kuark, örneğin tılsım, bir W yayabilir ve daha hafif eşine, acayip kuarka dönebilir. Ancak acayip kuarkın gidebileceği başka bir yer yokmuş gibidir: W onu yalnızca daha ağır olan tılsıma geri çevirebilir, bu da genellikle biraz enerji eklenmeden gerçekleşmeyecektir. Başka bir ifadeyle, acayip kuark kararlı olmalıdır çünkü bozu-



Zayıf kuvvet aracılığıyla bozunan bir müon.

nabileceği daha hafif bir şey yoktur. Aynı şey aşağı kuark için de geçerlidir: Aşağı kuark, yukarı kuarkın daha hafif eşidir ve yine, bozunması için başka bir yol yokmuş gibi görünür. Dünya acayip ve aşağı kuarklarla dolu olmalıdır. Onları atomlarda bulmamız gerekir. Gerçi atomlar, tüm evren, durum böyle olsaydı çok farklı görünürdü.

Kuarkların durumunun biraz daha karmaşık olduğu ortadadır. Leptonlar bire bir bu çiftlere ayrılırken, kuarklar biraz daha karmaşıktır. Bir W bozonu, bir tılsım kuarkı bir acayip kuarka çevirebilir fakat aynı zamanda bir aşağı kuarkı alt kuarka da çevirebilir. Hatta pozitif W, pozitif yüklü herhangi bir kuarkı (yukarı, acayip, üst) negatif yüklü herhangi bir kuarka (aşağı, acayip, alt) çevirebilir; negatif W de bunun tersini yapabilir. Karışma miktarı (örneğin bir tılsım kuarkın bir aşağı kuarka kıyasla bir acayip kuarka dönme ihtimali) bir W bozonu yayarak bozunan hadronları inceleyerek ölçülebilir. CERN'de (aynı zamanda son bölümde bahsettiğimiz pentakuarkı da keşfeden) LHCb gibi deneyler, bu tür analizde uzmanlaşır ve sonuçlar, bu fikirlerin belli başlı üç lideri Nicola Cabibbo, Makoto Kobayashi ve Toshihide Maskawa'nın soyadlarının baş harflerinden yola çıkılarak adlandırılmış CKM Matrisi'nde özetlenir.

W ile kuark etkileşimlerinin neden böyle karıştığı net değildir. Kuarklar çiftler halindedir, dolayısıyla en basit şey, o çiftlerin zayıf yüklü çiftler olarak mükemmel şekilde dizilmesi olurdu. Şu anda bunun için verebileceğimiz en iyi neden, "Çünkü canı öyle istiyor"dur. Bu karışma teknik olarak mümkündür, dolaysıyla doğada meydana gelir. Bu büyük bir etki değildir ve kuark çiftleri gerçekten de neredeyse W çiftleri şeklinde dizilir: Üst, %99,8 olasılıkla alt kuarka bozunur ve bir tılsım kuark, %95 olasılıkla acayip kuarka bozunacaktır. Gelgelelim Standart Model bunların neden %100 veya başka bir yüzde olmadığına dair bir açıklama sunmaz. Bunlar daha çok "serbest parametreler", henüz açıklayamadığımız sayılardır ve sahip oldukları değere sahip olmalarının nedenleri, parçacık fiziğindeki açık sorulardan biri olmayı sürdürmektedir; bu soruya Dokuzuncu Bölüm'de döneceğim. Ancak bu karışma olmasaydı, evren büsbütün farklı görünür, acayip ve alt kuarklar içeren değişik madde türleriyle dolu olurdu.

Karışma, W bozonunun her etkileşimde eşleşeceği kuarkları büyük oranda kendisinin seçmesi anlamına gelir. Bu da daha ağır kuarkların en hafifine kadar bozunabileceği anlamına gelir: Ağır kuarklar, örneğin üstten alta, tılsımdan acayip kuarka ve yukarıya dek iner. Dolayısıyla karışma tuhaftır fakat evrende çok önemli bir rol oynamıştır. Üstelik karışmanın leptonlar için de söz konusu olmayacağı anlaşılmıştır fakat yalnızca Sekizinci Bölüm'de bahsedeceğim nötrinoların tuhaf davranışlarında görülür.

Dolayısıyla zayıf kuvvet nedeniyle Standart Model'deki tüm ağır parçacıklar kararsızdır. Büyük Patlama'dan hemen sonra evren inanılmaz sıcak ve yoğundu ve taular, üst kuarklar, müonlarla doluydu. Fakat saniyenin binde biri içinde tüm bunlar zayıf kuvvet sayesinde bozunmuş olmalıdır. Yalnızca en hafif parçacıklar hayatta kalmıştır: Yani yukarı ve aşağı

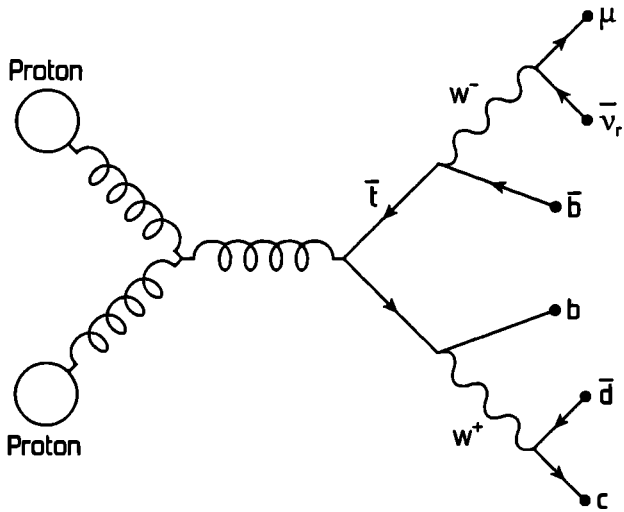
kuark ile elektron. Bunlar, bir sürü nötrinoyla birlikte, etrafımızdaki dünyayı meydana getirir. Kuarklar ile elektronlar en sonunda birleşerek atomları, birkaç milyar yıl sonra da bizleri meydana getirdi. Biz, Büyük Patlama'nın geride bıraktığı soğuk tozlardan meydana geliyoruz.

Bir çarpışmanın anatomisi

Dünya'nın atmosferine kozmik ışınlar vurduğunda meydana gelen çarpışmalara benzeyen LHC'deki yüksek enerjili parçacık çarpışmalarını anlamak için gereken tüm bilgiye artık sahibiz. Hemen her şeyi sergileyen bir süreç, en basit Feynman Diyagramlarını kullanarak bakabileceğimiz üst-eş üretimidir. Bu birkaç şekilde olabilir, en sıradan süreçtir ve bu çarpışmayı takip eden karışık olay zincirinin açıklamasını okurken bir diyagramın binlerce sözcüğe bedel olduğu anlaşılabilir!

Çarpışmadan önce iki proton ışık hızına yakın hızda birbirlerine yaklaşır. Çarpışma meydana geldiğinde, iki protonu da bir arada tutan gluonlardan biri etkileşip kaynaşarak yüksek enerji yüklü tek bir gluon oluşturabilir. Çarpışmanın kinetik enerjisinin büyük kısmı bu gluonun oluşturulmasına harcanır, daha sonra bu gluonun bir üst kuark ile bir üst antikuarka bozunmaya yetecek kadar enerjisi olur. Bunların birleşik kütlesi, çarpışmanın başındaki iki protonun yaklaşık 185 katıdır.

Üst kuarklar ve antikuarklar ağırdır. Öyle ağırdır ki, enerji ödünç almak için Belirsizlik İlkesi'ni kullanmalarına gerek kalmaksızın bir W bozonu çıkarabilirler. Üst kuarklar ve antikuarklar, yaklaşık 10^{-25} saniye, yani bir saniyenin milyarda birinin milyarda birinin milyonda birinde üst kuarklar ile antikuarklara bozunur. Bu öyle hızlı meydana gelir ki, üst kuarkı asla doğrudan göremeyiz ve güçlü kuvvetin üst kuarkı bir hadrona bağlama fırsatı olmaz. Bu bozunmalardan sonra,



LHC'de üst kuark ile antikuark üretiminin ilk aşamasını anlatan temel Feynman Diyagramı. İşler karışmadan önce.

elimizde çarpışmadan çıkan bir pozitif yüklü W, bir alt kuark, negatif yüklü bir W ve bir alt antikuark vardır.

İki W bozonu da hemen bozunur; hem de herhangi bir parçacık çiftine. Diyelim biri bir müon ile müon-antinötrinoya bozundu, diğeri mümkün olan çeşitli kuark bileşimlerinden birini seçer ve bir tılsım kuark ile aşağı antikuarka bozunur. Bu çarpışmanın temeli, aşağıdaki gibi basit bir Feynman Diyagramı kullanarak hesaplanabilir:

Müon ile müon antinötrino, çarpışma sonucu uçar ve detektörümüzden geçip dünyaya karışır. Müon en sonunda bir müon nötrino, elektron ve elektron antinötrinoya bozunacaktır fakat muhtelemen bu ancak birkaç kilometre gittikten sonra meydana gelecektir.

Kuarklarda da güçlü kuvvet ipleri eline alır. Kuarklar sicimler halinde esneyen gluonlar yaymaya başlar, bunların bazıları koparak daha fazla kuark antikuark çifti yapar. En sonunda tüm bunlar hadronlaşma olarak bilinen süreçte had-

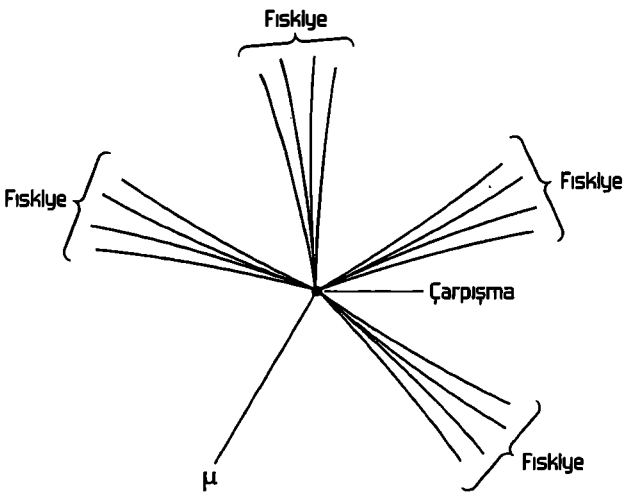
ronların içinde sınırlanır. 4 kuarkımız (alt, antialt, tılsım ve antiacayip) vardı ve en sonunda da elimizde 4 hadron fıskiyesi olur.

Ağır kuarklar da aynı şekilde bozunur. Örneğin alt kuark, B^- olarak bilinen bir hadronda bir antiyukarı kuarkla bağlanabilir. Alt kuark, bu hadron birkaç milimetre seyahat ettikten sonra (ölçmemize yetecek kadar gider) bir W bozonu yayarak bir tılsım kuarka bozunur. Bu W daha fazla kuarka veya örneğin bir başka müon ve müon antinötrinoya bozunabilir. Daha fazla hadron üretilir.

Aynı şey, tılsım kuarkı içeren hadronlara da olur. Tılsım bir W yayabilir bir acayip kuarka bozunabilir. En sonunda geri kalan tek şey ya kararlı ya da detektörümüzde birkaç metre yolculuk edebilecek kadar uzun yaşayan hadronlardır. Bunlar pion, kaon, proton ve nötrondur. Yol boyunca aynı zamanda biraz elektron ve foton da üretilir; bunlar da kararlıdır ve ölçülebilir.

Son olarak, iki protonun kalıntıları vardır. Bu çarpışma onları tamamen parçalayarak kuark ve gluonların saçılmasına neden olur. Enkaz, nihayetinde çok daha fazla hadron üretir ve bu hadronların büyük çoğunluğu, ışının ilk yönüne epey yakın olarak uçmayı sürdürür. Yani çarpışma tam bir karmaşa gibi görünür:

Tüm bunlar içinden müon ile dört fıskiyeyi seçebilir ve onları üreten üst kuarkları yeniden yapılandırabiliriz. Bu, bir çarpışmada meydana gelebilecek pek çok şeyden sadece biridir fakat en sonunda bizim ölçebileceğimiz kadar yaşayan birkaç tür kaldığından, radikal anlamda farklı şeyleri göremesek bile, pek çok çarpışma nihayetinde benzer görünebilir. Protonları çarpıştırdığımız için, hadron fıskiyeleri gördüğümüz en sıradan şeylerdir ve bunların parçalara ayrılan iki protondan mı, yoksa bir üst kuarkın bozunumu gibi çok daha ilginç bir şeyden mi kaynaklandığını çözmek zor bir iştir. Bu tür



Bir üst kuark ile antikuarkın bozunumunu takip eden çarpışmadan fırlayan bazı parçacıklar.

parçacık dedektiflikleri, LHC'de veya herhangi bir parçacık fiziği deneyinde çalışmanın en keyifli yanlarından biridir ve Yedinci Bölüm'de bu konuya döneceğim.

Gizli kuvvetler

Güçlü ve zayıf kuvvetler, Standart Model'in ötesinde olup bitenler için bir şablon sunar. Eğer evrende daha fazla kuvvet varsa (ki olduğu neredeyse kesindir) onları henüz fark edememiş olmamızın bir nedeni olmalıdır. Böyle yeni bir kuvvet, QCD gibi hapsedilmiş olabilir: Kuarklar, leptonlar veya bozonlar esasen çok daha küçük bir şeyden meydana geliyor, bu varsayımsal kuvvetle birbirine bağlanıyor olabilir. Eğer parçacıkları yeterince sert çarpıştırmayı başarabilirsek, bu kuvveti alt edebiliriz ve onları parçalamaya başlayabiliriz. Örneğin bir W bozonunu parçalayarak açabiliriz. Veya yeni bir kuvvetin ağır, W veya bildiğimiz parçacıklardan çok daha ağır bir bozonu olabilir. Belirsizlik İlkesi üzerinden, çok en-

der süreçlerde bu yeni bozonu gözlemleyebiliriz; tıpkı beta bozunumunun W'nin varlığının bir ipucu olduğunu gözlemlediğimiz gibi. Veya bir çarpışmaya yeterince enerji verirsek, bu yeni bozonu doğrudan yapmayı da başarabiliriz. Bu, parçacık hızlandırıcılar nihayet yeterince güçlü hale geldiğinde, 1986'da CERN'de W bozonu vakasında yaşanmıştır. Çarpışmaya yeterli enerji verilirse, W bozonu yapmak için Belirsizlik İlkesi'ne ihtiyaç duyulmaz. Zayıf etkileşimler daha da sıklaşır ve örneğin müonlar ile müon antinötrinolar, elektronlar ile elektron antinötrinolar üreten çarpışmalar tespit edilir.

Standart Model'in ötesine geçmeden önce aradan çıkarmamız gereken birkaç şey var. Tüm kuvvetlerin ortak bir yanı vardır ve bu ortak yan, tablonun son parçasını içerir: Higgs Bozonu.

ALTINCI BÖLÜM

HIGGS BOZONU

Standart Model son derece iyi işler. Dünyamızı minik parçacıklar ve onların etkileşimleri üzerinden açıklar. Aynı zamanda Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki yüksek enerjili çarpışmalardan çıkan sonuçları da açıklar; bu da Büyük Patlama'dan sonraki saniyenin binde birinden itibaren evrenimizde meydana gelmiş olabilecek hemen her şeyi açıklar. Bütün bunları birkaç farklı teori kullanarak yapar. QED elektromanyetik kuvvet ile fotonu açıklar. QCD güçlü kuvvet ile gluonları açıklar. Zayıf kuvvet, beraberinde W bozonuyla gelir ve parçacıkların nasıl bozunduğunu açıklar. Dirac Denklemi, madde parçacıklarının, fermiyonların nasıl hareket ettiğini tanımlar.

Gelgelelim, tüm bunlarda en heyecan verici olan, tüm bu parçaların birbirine bağlı olmasıdır. Evrende olup biten çok daha derin bir şey, Standart Model'in ve ötesindeki şeyin altında bir kılavuz ilke vardır ve bu ilke simetridir. Atomaltı dünyamızı kavrayışımıza simetriler uygulamak, aynı zamanda bir şeyin eksik olduğunu göstermiştir ve tarihin en uzun parçacık avına, yani Higgs Bozonu arayışına yol vermiştir.

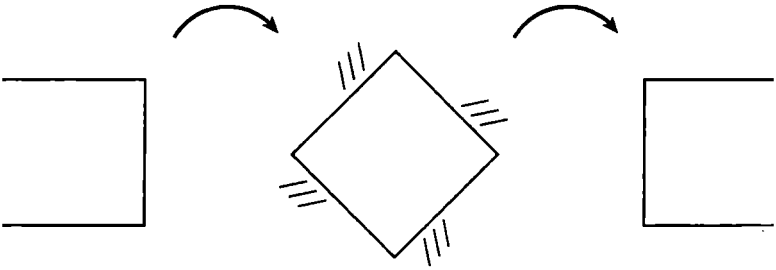
Simetri

Simetri, 20. yüzyıldan beri fizikteki belki de en önemli fikirlerden biridir. O, Einstein'ın Görelilik İlkesi ile –parçacık fiziğine ilişkin– Standart Model arasındaki, yani günümüzün en büyük iki fizik teorisi arasındaki bağdır ve tüm evreni biçimlendiren en önemli şey olabilir.

Simetriyi düşündüğümüzde, aklımıza bir aynada yansıdığında aynı görünen bir şey gelebilir ve simetrik yüzlü insanların genellikle daha çekici olduğu söylenir. Eğer bir şeyi bölüp iki eşit parçaya ayırdığımızda veya bir şeyi ters çevirdiğimizde hâlâ aynı görünüyorsa onun simetrik olduğunu söyleyebiliriz. Örnek olarak, bir karenin simetrisi yüksektir; ona pek çok farklı şey yapabiliriz fakat bunların her birinden sonra aynı görünecektir. Onu aynanın önüne koyabiliriz, 90, 180 veya 270 derece döndürebiliriz. Bir daire ise daha da simetriktir. Onu herhangi bir açıda döndürmek, farklı görünmesine yol açmayacaktır.

Bu daha matematiksel bir ifadeyle verilebilir: Bir simetri, bir şeyin bir dönüşümden sonra değişmeden kalması anlamına gelir. Buradaki "şey" gerçekten de herhangi bir şey olabilir: Birinin yüzü, bir kare veya bir atomaltı parçacık. Bir "dönüşüm" de yine herhangi bir eylem olabilir: Bir aynada yansımak, 90 derece dönmek, güçlü kuvvet renk yükünü değiştirmek. Gerçekten, aklınıza gelen her şey olabilir.

Dünyayı tanımlayan fizik denklemlerine şöyle bir baktığımızda, orada simetriler görürüz ve bu simetriler bize evrenle ilgili derin bir şey söyler. Öncelikle, uzayda simetriler vardır. Fizikte "uzay" genellikle konum anlamına gelir: Bir golf topuna vurmak onun uzaydaki konumunu değiştirir. Golf topuna evrendeki hangi golf sahasında ve nasıl vurursanız vurun, topun nasıl hareket edeceğini belirleyen fizik yasaları aynıdır.



Karenin simetrileri: 90 derecede döndürseniz de kare yine aynı görünür.

Bu simetridir. Fizik yasaları konumdan, uzaydaki dönüşümlerden bağımsızdır. Elbette değişen şeyler vardır. Örneğin her golf sahasında tümsekler farklı yerlerdedir. Fakat altta yatan denklemler, fizik yasaları aynıdır ve mekândan mekâna değişen tek şey, o denklemlere giren sayılar, örneğin toplam kaç tümsek olduğudur. Zamanda da simetri vardır: Bir topun nasıl hareket edeceğini tanımlayan denklemler, dünkünün aynısıdır. Elbette o gün veya ertesi gün yağmur yağabilir fakat bu yalnızca denklemlere giren kimi sayıları değiştirir, denklemlerin yapısını değil.

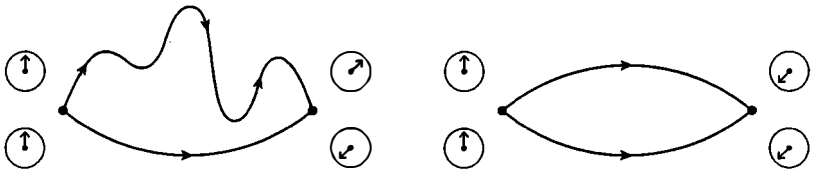
Bu uzay ve zaman simetrileri, Poincaré Grubu altında toplanabilir ve Einstein'ın Özel Görelilik Teorisi'nin zeminini teşkil eder. Görelilik bize esasen uzayın her yerde aynı göründüğünü söyler ve bu bariz bir şeymiş gibi gelse de, aslında simetrilerin bir sonucudur. Simetriler, kütle enerji eşitliği gibi ($E=mc^2$) genel kanıya ters görünen türlü türlü çıkarımlara götürür. Einstein bu fikirleri yine simetriyi kılavuz alarak Genel Görelilik Teorisi'nde kütleçekimi ve hızlandırılmış hareketi kapsayacak şekilde genişletmiştir. Einstein fizikte simetrinin rolünü tam anlamıyla fark eden ilk kişi olmasına karşın, simetri bu temel parçacıkların dünyasını kavramada da elzem rol oynuyordu ve burada odaklandığımız mesele de budur. Parçacık fiziğindeki simetrilerin, tuhaf kuantum özellikleriyle

bağlantısı vardır, dolayısıyla epey soyutturlar fakat Standart Model'in gerçek yapısını açığa çıkarırlar. Birazdan derinlere dalacağız, o yüzden nefesinizi tutun!

Parçacıklar ve zaman dilimlerine dair

İlk kuantum simetrisini irdelemek için İkinci Bölüm'de bahsettiğimiz bazı fikirlere dönmeliyiz. Özellikle de parçacıkların hareket etme biçimine. Parçacıklar pek çok hayaletimsi kopyaya bölünür ve A noktasından B noktasına uzanan tüm olası yolları keşfeder. İşyerine yaptığım kuantum yolculuğu örneğimde, ben otobüse binerim, otobüs pek çok farklı kopyaya ayrılır, ilerler, kent boyunca olası her rotayı izler, sonra da ben işyerine ulaştığımda kopyalar birleşir. Bu rotaların bazıları en sonunda birbirini iptal edebilir, yani iki otobüs dar bir sokakta kafa kafaya gelebilir ve birbirini engelleyebilir. Her şey aynı anda meydana gelince, her türlü yolculuk mümkün olmaz.

Bunun devamı da var çünkü eğer iki otobüs birbirini engelleyecekse dar sokağa aynı anda ulaşmaları gerekir. Farklı zamanlarda ulaşırlarsa ikisi de sorun yaşamadan sokaktan geçip gidebilir. Parçacıklar bir şekilde bu zamanlamayı takip etmek zorundadır ve bunu "iç saat"e benzer bir şey taşıyarak yaparlar. Matematiksel olarak, bu *kompleks evre*'dir ve bir adımsayar gibi işler. Temel olarak, bir parçacık hareket ederken dönen tek kollu bir saattir. Bir parçacık ne kadar uzağa giderse o kadar kendi ekseni etrafında döner (spin atar). Yolculuğun başında, parçacığın tüm kopyaları çeşitli yollara çıkmadan önce hepsi adımsayarlarını kolları aynı yöne işaret edecek şekilde sıfırlar. Sonra hepsi farklı yollara çıkar, bu yolların bazıları diğerlerinden daha uzundur ve böylece adımsayarlar bazen senkronize olur, bazen de sekrondışı. İki yol



Sonuçta (solda) senkrondışı ya da (sağda)
senkronize hale gelen bazı farklı parçacık yolları.

buluştuğunda adımsayarların bağıl senkronu bize ne olacağını söyler: Kollar aynı yöne işaret ediyorsa senkronizedirler ve bir sorun yoktur. Eğer kollar 180 dereceyle senkrondışıysa, bu kafa kafaya gelmek gibidir ve iki yol birbirini bloke eder. Bunların yanı sıra, kısmi bir engelleme, kısmi bir iptal etme söz konusudur ve bu yollar da bir parçacığın hareketini etkileyebilir.

Şimdi simetriye gelelim: Bir parçacığın davranışı, hareket etmeye başlamadan önce adımsayarının ayarından bağımsızdır. Önemli olan, parçacığın tüm tuhaf kuantum kopyalarının adımsayarlarını başlangıçta ayarlamaları, senkronize etmeleridir. Onları öğlen 12 veya öğleden sonra 3'ü gösterecek şekilde ayarlamaları fark etmez, yalnızca başlangıçta aynı yöne işaret etmeleri önemlidir; daha sonra çeşitli yollarda ilerlerken kâh senkronize olurlar, kâh senkrondışı. Simetrinin sonuçlarından biri, herhangi bir parçacığın adımsayarının mutlak ayarını asla ölçememizdir. Bu aslında gayet makuldür çünkü mutlak ayar zaten önemli değildir. Sonuçta onun ne olduğunu bilmemize izin yoktur! Önemli olan tek şey, farklı yollarda bağıl senkronizasyondur ve bunları bir parçacığın nasıl hareket ettiğinden, hangi yolların bloke olduğundan anlayabiliriz.

Bir parçacık ile onun kuantum kopyaları için geçerli olan durum böyledir. Şimdi iki farklı parçacık, örneğin LHC'de çarpıştırılan iki proton buluştuğunda ve etkileştiğinde neler

olduğuna bakalım. İkisinin de "iç saatleri" vardır ve önemli olan, çeşitli yollarda ilerleyen tek bir parçacığı düşünürken olduğu gibi, o saatlerin bağıl senkronizasyonudur. Peki, şimdi simetrimize ne olur? İki parçacık yolculuğun başında adımsayarlarına hâlâ herhangi bir ayar yapmakta özgür müdür? Bir yandan simetrinin sürmesi gerekir çünkü parçacıkların adımsayarını nasıl ayarladığını bilemeyiz. Diğer yandan, simetri süremez çünkü eğer iki parçacık adımsayarlarını farklı yöne ayarlarsa bu onların bağıl senkronizasyonunu değiştirir, bu da farklı davranmaları anlamına gelir. Artık hiç etkileşime girmeyebilirler. Bir şeyler eksiktir.

Burada bize faydası dokunabilecek gündelik hayata ilişkin bir analoji var ve hâlâ benim arada bir faka basmama neden oluyor. Bu, zaman dilimleridir. Ben İngiltere'de yaşıyorum fakat meslektaşlarımın pek çoğu İngiltere'den bir saat ilerideki Orta Avrupa Saati'ni kullanan CERN'de çalışıyor. Bazıları ise İngiltere'den sekiz saat gerideki California'da. Toplantılar genellikle CERN zamanına göre ayarlanır ve benim gibi pek çok insan dünyanın dört bir yanından görüntülü aramayla bu toplantılara katılır. Bir toplantı CERN'de öğleden sonra 2'deyse, ben Londra'dan saat 1'de bağlanıyorum. California'daki arkadaşlarımız ise sabah 6'da bağlanıyor. Demek istediğim, hepimizin aynı zamana farklı isimler veriyoruz. İngiltere'nin öğleden sonra saat 1'i, CERN'in öğleden sonra saat 2'si ve California'nın sabah saat 6'sı aynı zamanı gösteriyor. Kendi saatlerimizin hepsi senkrondışı; tıpkı farklı parçacıkların adımsayarları gibi fakat yine de bu engeli aşmayı ve doğru zamanda bağlanmayı başarabiliyoruz.

Aslında öğleden sonra 2'nin tek bir tanımı yoktur. Bu yalnızca bir isimdir ve bu isim ülkeden ülkeye ve hatta yıl bo-

yunca değişir: Bazı ülkeler saatlerini yaz saati uygulaması için bir saat ileri ve geri alır. Üstelik bunun yapıldığı tarih de bölgeden bölgeye değişir! Aynı şey parçacıklar için de geçerlidir: Hepsinin iç adımsayarı vardır fakat nasıl senkronize edilmeleri gerektiğine dair tek bir tanım yoktur. Benim saatim, CERN veya California'daki meslektaşımın saatinden farklı olacaktır ve benzeri şekilde, bir parçacığın iç adımsayarının da evrenin, dünyanın başka bir tarafındaki, hatta LHC'de zıt yönde hızlandırılan bir parçacıkla senkronize olmaması için bir neden yoktur.

İşlerin yolunda gitmesinin püf noktası iletişimdir. Örneğin, "Bir saat içinde buluşalım!" veya "Öğleden sonra ikide buluşalım. CERN saatinde!" yazan bir e-posta gönderebilirim ve bunun ne anlama geldiğini biliriz çünkü hepimiz bahsettiğim saatin kendi yerel saatimizdeki karşılığını biliriz. Dolayısıyla farklı parçacıkların adımsayarlarının farklı ayarları olması sorununu çözmek için, iletişim kurmalarının, bağıl senkronizasyonlarını bulmalarının bir yolu olmalıdır.

Böylesi bir yol vardır ve adeta sihir gibi beliriverir. Bize elektron gibi bir fermiyonun nasıl hareket ettiğini anlatan, İkinci Bölüm'de bahsettiğimiz Dirac Denklemi'ni alıp simetriye uyarlamak mümkündür. Sonuç o fermiyonun iç adımsayarının nasıl ayarlanmış olduğuna bağlı olamaz. Bu simetrinin doğru olabilmesi, denklemin aynı cevapları sunması için, fazladan bir parça eklenmelidir. Bu fazladan parça, bir etkileşimi tanımlar; parçacıkların iletişim kurmasının, bağıl senkronizasyonlarını bulmasının yolunu açar. Bu etkileşim, esasen elektromanyetik kuvvettir ve parçacıklar foton, yani bu kuvvetin bozonunu takas ederek iletişim kurar. Elektromanyetik kuvvet, evrendeki çok daha derin bir simetrinin doğrudan sonucudur.

$$i\gamma.\partial\psi = m\psi + A\psi$$

Burada biraz kafa karıştırıcı bir gösterim söz konusu: Dirac Denklemi'ndeki γ parçacıkların nasıl hareket ettiğiyle ilişkilidir. Feynman Diyagramlarında ise fotona γ simgesi verilir fakat Dirac Denklemi'nde bu A'dır. Dolayısıyla denklemin yeni kısmı hem ψ parçacığı hem de fotonu, yani A'yı içerir ve bu terim QED Feynman Diyagramlarındaki verteksin matematiksel versiyonudur.

Bir başka sonuç daha vardır: Dirac Denklemi'nde beliren yeni terim, foton için kütle içermez. Onu eklemek, işleri yeniden dengesizleştirir ve simetriyi bozar; dolayısıyla simetri bize sadece elektromanyetik kuvvetin var olması gerektiğini değil, aynı zamanda fotonun kütlesinin olamayacağını söyler. Kütlesi olmayan tüm parçacıklar evrenin doğal hız limitinde seyahat eder; bu hız limitini ışık hızı olarak biliriz çünkü kütlesiz fotonlar bu hızda seyahat eder!

Dolayısıyla evrenin her yanındaki parçacıkların adımsayarları farklı bölgesel senkronizasyonlara sahiptir ve bu senkronizasyonlar farklı zamanlarda farklı yerlerde değişebilir. Elektromanyetik kuvvet bu pürüzü giderir; parçacıklar fotonları, yani bu kuvvetin bozonunu takas ederek yerel ayarlarını birbirine iletir ve senkronize kalır. Benzer şekilde, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda çalışan insanlar dünyanın dört bir yanına dağılmıştır ve yerel saatleri mekân ile zamana bağlı olarak değişir. World Wide Web, herkesin iletişim kurabilmesi için CERN'de icat edilmişti ve bizler birbirimize web'in bozonu sayılabilecek, uluslararası işbirliğini yürüten kuvvet olan e-posta yollayarak senkronize kalırız.

Fiziğin bilinmeyen kahramanı

Simetriler fiziğin her yanında ortaya çıkar. Şimdiye kadar evrenin uzayda ve zamanda simetrileri olduğundan ve Ein-

stein'ın Özel Görelilik Teorisi'nin bunları izlediğinden bahsettim. Kuantum dünyasında parçacıklar da iç adımsayarları nasıl kurulmuşsa kurulsun, aynı şekilde davranır ve bunun sonucu olarak elektromanyetik kuvvet var olmak, parçacıkların bağıl senkronizasyonunu bulmasına ve bu simetriyi korumasına izin vermek zorundadır.

Bu simetrilerin başka olası sonuçları da vardır ve bunlar modern fizikteki en önemli matematiksel çıkarımlardan birini, Nöther Teoremi'ni izler. Emmy Nöther, 20. yüzyılın başında üniversitede çalışan bir kadın olarak cinsiyetçiliğe maruz kaldı. 1930'larda Almanya'da çalışan bir Yahudi olarak, zamansız ölümünden sadece iki yıl önce Nazi tasfiyeleri nedeniyle Amerika'ya gitti. Ölüm ilanında Einstein, bilhassa bir simetri olan yerde korunan bir nicelik olduğunu, bir şeyin sabit kalması gerektiğini ispatladığı 1915'teki çalışmaları nedeniyle ondan "önemli, yaratıcı bir matematik dehası" olarak bahsetti.

Nöther Teoremi, fizikteki tüm simetrilere uygulanabilir. Uzayın her yerden aynı görünüyor olması gerçeği, esasen momentumun korunumuna, evrenin zaman içinde aynı görünmesi gerçeği de, enerjinin korunumuna götürür. Fizik kanunlarının değişmemesi, bir saat sarkacının sallanmayı sürdüreceği anlamına gelir. Sürtünme ve rüzgâr direnci bu simetrileri kırmaya ve zaman içinde işleri yavaşlatmaya meyillidir fakat Dördüncü Bölüm'de bahsettiğim "vakumdaki sürtünmesiz inekler" için bir şeyleri hesaplamanın kolay olmasının nedeni budur. Fiziğin iki temel kanunu, yani enerjinin korunumu ve momentumun korunumu, uzay ile zamanın altında yatan simetrilere uyum gösterir.

Fakat biz burada kuantum simetrileriyle ilgileniyoruz; yani parçacıkların iç saatleri nasıl kurulmuş olursa olsun,

evrenin aynı şekilde davranması gerçeğiyle. Noether Teoremi'ne göre bu simetri aynı zamanda korunumlu bir nicelik bulunduğunu söyler ve bu nicelik, en başından parçacıkların simetriyi saklayan fotonlarla etkileşimine izin veren elektrik yüküdür. Dolayısıyla simetri elektromanyetik etkileşimi ve kütlesiz fotonları öngörmekle kalmaz, aynı zamanda elektrik yükünün korunduğu anlamına da gelir: Evrendeki toplam enerji miktarı değişmeyecektir. Bunu bir yüksüz fotonun bir negatif elektron ile pozitif antielektrona dönüşebildiği Feynman Diyagramlarında da görürüz; Toplam yük miktarı korunur; bu etkileşim boyunca aynı (bu durumda sıfır olarak) kalır.

Uydu seyir sistemleri ve yazı turalar

Simetriler, Standart Model'deki diğer tüm kuvvetlere de uygulanabilir. Dördüncü Bölüm'de güçlü kuvveti ve onunla özdeşleştirilen renk değişimini anlatmıştım. Bu yük, "üç boyutlu"dur (elektrik yükü yalnızca bir sayıdır fakat renk değişimi bir sayı ve bir yöndür. Bu yönler "kırmızı", "yeşil" ve "mavi" olarak isimlendirilir ve renk yükü bu yönlerden herhangi birine işaret edebilen bir rüzgârgülüne benzer.

Ancak parçacık adımsayarları için evrensel bir senkronizasyon olmadığı gibi, hangi yönün kırmızı, mavi veya yeşil olduğunun da evrensel bir tanımı yoktur. Yönler görelidir ve hangi yönün kırmızı olduğunun tanımı, farklı zaman ve yerlerde farklı olabilir. Örneğin arabalı birine yön tarifi yaparken sağdaki mağazanın önünden geçmesini söyleyebilirsiniz fakat aslında bu, şoförün hangi yolda yolculuk ettiğine bağlıdır. Sürücü daha sonra zıt yönden dönerken, mağaza solunda kalacaktır. Yönler evrensel değildir ve bizim nereye baktığımıza ya da gittiğimize göre değişir.

Parçacık adımsayarlarında olduğu gibi, bir kuarkın renk değişimi bizden daima saklanır. Bir kuarkın kırmızı, mavi veya yeşil olduğunu bilmek imkânsızdır. Bunun nedeni, bu renk yönlerinin mutlak tanımlarının önemsiz olmasıdır. Burada bir simetri vardır: Kuarkların davranış biçimi hangi yönü kırmızı, mavi veya yeşil olarak isimlendirdiğimize bağlı olamaz. Kuarklar için önemli olan tek şey, bağıl renkleridir. Bir hadron oluşturmak için bir kuark ile antikuark zıt renklerde olmalıdır. Buna kırmızı ve antikırmızı diyebiliriz fakat bu isimler gelişigüzeldir; onlara mavi ve antimavi de diyebiliriz fakat hadron ne olursa olsun, tamamen aynı şekilde davranacaktır. Bu isimler gelişigüzel olduğundan ve zaman ile mekânla değişebildiğinden, kuarkların bağıl renklerini bulmaları için bir iletişim araçları olmalıdır.

Dolayısıyla bir simetrinin işlemesi için, bir etkileşimin, renk yönleri için uydu seyir sistemi benzeri bir şeyin ortaya çıkması gereklidir ve bu güçlü kuvvet tarafından üretilir. Bu kuarklar arasında renk bilgisini ileten bir bozonla, yani gluonla gelir. Fotonda olduğu gibi, simetri gluonun kütlesiz olmasını gerektirir ve Nöther Teoremi gereğince, aynı zamanda bir korunumlu nicelik söz konusudur: Toplam renk yükü aynı kalmalıdır.

Son olarak zayıf kuvvete gelelim. Bu da aynıdır, sadece artık üç değil, iki "boyut" vardır. Dördüncü Bölüm'de parçacıkların, bir demir paranın yazı ve tura yüzleri gibi, çiftler halinde olduğunu anlattım. Burada da aynı mantık vardır. Neyin "tura" olduğunun evrensel, mutlak bir tanımı yoktur. Asıl önemli olan, iki parçacığın içinde bulunduğu bağıl durumdur. Biz "tura" ve "yazı"yı nasıl tanımlarsak tanımlayalım, evren değişmez kalmalıdır ve bu simetrinin işlemesi için yeni bir kuvvet, yeni bir bozon, W bozonunu sunmamız gerekir. Bu simetriyle beraber giden yeni bir korunumlu nicelik var-

dır ve bu zayıf yüktür. Bu noktada ilk sorun ortaya çıkar: Bir parçacığın iç adımsayarını veya bir kuarkın renk rüzgârgülünün gösterdiği yönü göremeyiz. Ancak zayıf kuvvetin yazı ve turası arasındaki fark gayet nettir: Bir elektron, bir nötrinodan tamamen farklıdır. Nedense bu simetri bizden gizlenmemiştir.

Tren rayı cebiri

Standart Model'in kuvvetlerinin ardındaki simetriler, mutlak anlamı olmayan isimlerle, farklı zaman ve yerlerde değişebilen tanımlarla; bir parçacığın iç adımsayarının ayarıyla, renk yükü rüzgârgülünün yönüyle ya da hangi yolu zayıf kuvvet için yazı veya tura olarak isimlendirdiğimizle ilgilidir. Bu tür simetriler ayar simetrileri olarak bilinir; bu terim, tren raylarının arasındaki mesafenin ölçülüp ayarlanmasından türemiştir. Ölçüm ve ayar yapmak için ne kullanılırsa kullanılsın ayarlanacak şey yani tren rayı, tren rayı olarak kalır. Fakat tren üretirken, hangi ölçüyü yani ray açıklığını kullandığınızı netleştirmek en doğrusudur çünkü aksi takdirde tren çalışmayacaktır! Buradan yola çıkarak, bu ayar simetrisi kuvvetleriyle özdeşleştirilen bozonlar, "ayar bozonları" olarak bilinir ve bunlar foton, gluon ve W'dir.

Simetrilere odaklanmış büsbütün ayrı bir matematik dalı vardır ve Standart Model bazen bu matematiksel gösterimle, "U(1)xSU(2)xSU(3)" şeklinde yazılır. Bu ifadenin ne anlama geldiği hakkında daha fazla bilgi sahibi olmak istiyorsanız Ek 2'ye bakınız. Burada en önemli şey, matematiğin bir başka problem ortaya çıkarmış olmasıdır. W bozonunun üç türü olmalıdır: Biri pozitif elektrik yükü, biri negatif elektrik yükü taşır, biri de hiç elektrik yükü taşımaz. Fakat biz yalnızca doğadaki pozitif ve negatif yüklü olanları görürüz; nötr olan kayıptır.

Dolayısıyla artık üç sorunumuz vardır. Birincisi, zayıf kuvvet renk yükü evresi ve parçacık adımsayarlarının aksine bizden gizlenmemiştir. İkincisi, bir bozonumuz eksikmiş gibi görünmektedir: Elektrik yüksüz üçüncü bir W olmalıdır. Ve son olarak, simetrinin işlemesi için ayar bozonlarının kütlesiz olması gerekmektedir. Bu foton ve gluon için geçerlidir fakat doğada gördüğümüz, bir protondan en az 85 kat ağır olan W bozonları son derece ağırdır. Zayıf kuvvetle ilgili bir şey tuhaf görünmektedir ve bu noktada ya simetri fikrini bir kenara atmamız ya da baştan başlamamız veya bunu işletmek için bazı numaralar bulmamız gerekmektedir.

Soruna ağırlık eklemek

Zayıf kuvvetle ilgili problemleri çözmek için gereken ilk ipucu 1964'te ortaya çıktı. Bu, ayar bozonlarının kütlesinin olmasına izin veren bir kaçamak noktası içeriyordu. Bu da yine eşzamanlı keşiflerden biridir: Matematiksel araçlar hazır olduğundan ve deneysel sonuçlar doğru yöne işaret ettiğinden, pek çok insan bağımsız olarak aynı hayal gücü sıçrayışını yaptı. Robert Brout ile François Englert fikri ilk olarak Ağustos 1964'te ortaya attı. Onları birkaç ay sonra Peter Higgs, birkaç ay sonra da Gerald Guralnik, Carl Hagen ve Tom Kibble takip etti (hepsi de Philip Anderson'ın eski çalışması ve Gerardus t'Hooft'un bağımsız çalışmasının yanı sıra, benzeri fikirler üstünde çalışan başka isimlerin çalışmalarından yola çıktı). Hepsinin bulduğu kaçamak noktası, bazen BEH (Brout, Englert & Higgs) Mekanizması olarak anılır ve Robert Brouth ne yazık ki o zamana kadar çoktan vefat etmişse de, 2013'te Nobel Ödülü'ne lâyık görülmüştür. Peter Higgs ise onu ABEGHHKt'H (Anderson, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble & t'Hooft) Mekanizması olarak anmıştır! Burada Hig-

gs'den insaflı davranarak ondan en kolay ismiyle, yani Higgs Mekanizması olarak bahsedeceğim.

Ayar bozonlarına kütle vermeyi içeren bu kaçamak noktası, şimdiye dek hiç karşılaşmadığımız, hepten yeni bir doğa kuvvetiydi: Diğer kuvvetler ayar simetrilerinin sonucuyken, bu kuvvet o simetrileri kırar. Higgs Mekanizması, tüm evren boyunca genişleyen bir kuvvet alanı, Higgs Alanı'ndan ve onun enerji dolu olduğundan bahseder. Bunun neden farklı olduğunu görmek için, onu kütleçekimi gibi başka bir kuvvetle karşılaştırabiliriz. Kütleçekimi sadece ortalıkta kütle olduğunda bir şey yapar. Dünya'nın çekimini hissederiz fakat uzaya çıktığımızda, tüm yıldız ve gezegenlerden uzakta, yerçekimi kuvveti olmayacaktır. Boş uzayda, kütleçekimi "kapanmıştır". Fakat boş uzayda, etrafta başka bir şey yokken bile Higgs Alanı daima "açıktır". Orada daima enerji vardır ve parçacıklar onun tuttuğu enerjiden istifade edebilir. Bu pek müthiş bir analoji olmasa da, Higgs Alanı'nı boş uzayı dolduran pekmeze benzetebiliriz. Bir kâse dolusu pekmezi karıştırmaya çalıştığınızda çok ağır gelen kaşığınızı hareket ettirmek zor olacaktır. Higgs Alanı'yla bu etkileşim, bu yapışma, parçacıkların kütlesi varmış gibi görünmesine neden olur. Bu analoji mükemmel değildir çünkü pekmezin içinde hareket eden bir şey yavaşlayıp duracaktır; Higgs Alanı'nda hareket eden bir parçacıksa kütle kazanacak fakat hareket etmeye devam edecektir. Higgs Alanı, eski esir fikrine benzemez çünkü bir yönü yoktur ve esasen hiçbir yerde "durağan" değildir, sadece kesintisiz bir enerji kaynağıdır.

Eğer Higgs Alanı varsa, zayıf kuvvetin bir ayar simetrisi olarak işlemesini sağlamak da mümkündür. W bozonu gerçek bir ayar bozonudur ve doğal olarak kütlesizdir. Fakat erken

evrende bir ara Higgs Alanı "açılmıştır" ve zayıf kuvvet ayar simetrisi kırılmıştır. W bozonu Higgs Alanı'na "yapışarak" veya onunla etkileşime girerek biraz kütle elde eder. Kaçamak noktası budur: W'nin kütlesi, (simetrinin izin vermediği) W bozonunun özelliği değil, onun Higgs Alanı'yla etkileşiminin bir sonucudur. Zayıf kuvvet ayar simetrisi kırıldığından, zayıf yükün farklı evreleri arasındaki simetri de kırılmıştır ve örneğin elektron ile nötrino arasındaki farkı söyleyebiliriz. Bu, kırık bir aynadaki yansımaya bakmaya benzer; simetrinin kırıldığı yerleri tespit etmek basit bir iştir.

Yapbozun son parçası, zayıf kuvvetin ayar teorisi tarafından öngörülen kayıp nötr W bozonudur. Onun nereye gittiğini ortaya çıkarmak, elektromanyetizmanın gerçekte ne olduğuna dair kavrayışımızda bir değişiklik daha yapmayı ve yeni bir teoriyi gerektiriyordu: Bu, elektrozayıf modeldi.

Elektromanyetizmaya ayar vermek

1964'te Higgs Mekanizması üzerine bir dizi yayından sonra, ayar bozonlarına kütle verme fikri doğada gerçekten var olan bir şeyden ziyade, matematiksel bir tuhaflık olarak kalabilirdi. Fakat 1968'de Abdus Salam ile Steven Weinberg, Higgs Mekanizması'nın, Sheldon Glashow'un Standart Model'de gördüğümüz yapıyı vermek üzere ortaya attığı daha eski bir teoriyle birleştirilebileceğini fark etti.

Bu bölümün başında, evrenin temel özelliklerine uyum gösteren ayar simetrileri fikrinden bahsetmiştim. Tüm parçacıklar için ortak bir senkronizasyon, renk yükü yönlerinin tek bir tanımı vs. yoktur. Elektromanyetik kuvvet gerçekten de bir ayar simetrisine, bir parçacığın iç adımsayarını ileriye ve geriye "sarmak"la ilgili bir simetriye uyuyormuş gibi görünür. Bu simetri evrende gerçekten var olsa da, tam anlamıyla

elektromanyetik kuvvet olarak algıladığımız şey olmadığı ortaya çıkmıştır.

Saran simetri, elektromanyetizmaya benzer bir kuvvet üretir ve bu kuvvet bir bozonla, B (bozonun baş harfi) bozonu içerir. B, fotona benzer biçimlerde davranır ve elektrik yüküne benzer bir yükle özdeşleştirilir. Fakat tam olarak aynı şey değildir. Bu epey incelikli bir ayrımdır: Parçacıkların güneş enerjili adımsayarlar kullandığını düşünmüş olabiliriz fakat aslında pille çalışırlar. Sonuçlar birbirine benzer fakat altta yatan bir fark vardır.

Bu gerçekten de gereksiz bir komplikasyon gibi görünür. Fakat artık Higgs Alanı oyuna girerek W bozonlarına kütle vermektedir. Bir başka ilginç şey daha olur: Kayıp nötr W bozonu (W^0) saran simetriden bu B bozonuna dolanarak birbirinden biraz farklı iki parçacık verir. Bu parçacıklar adeta iki hamur yumrusu gibidir: B hamurunun büyük kısmı, bir parça W^0 hamuruyla karışmış, yeni bir hamur, bildiğimiz kütlesiz fotonu meydana getirmiştir. B ve W^0 bozonlarının geriye kalan parçaları bir başka yumru, tıpkı yüklü W bozonları gibi çok ağır bir parçacık oluşturur. Bu Z bozonudur ve bu parçacıkla henüz karşılaşmadık. Hem yükü sıfır (*zero*) olduğundan hem de Standart Model hikâyesinin son parçası olduğundan ona "Z" denir. W^0 ile B doğada asla doğrudan görülmez, yalnızca iki farklı karışımda, foton ve Z'de görülür.

İkisi de bu karışımdan meydana geldiğinden, foton ile Z yakinen ilişkilidir. Neredeyse aynı şekillerde etkileşirler fakat tek bir fark vardır: Z aynı zamanda nötrinolarla da etkileşime girebilir. Feynman Diyagramlarının dilinde, Z tıpkı W ve foton gibi dalgalı bir çizgiyle gösterilir.

Fakat Z ile foton arasında önemli bir fark vardır. Z kütlesini Higgs Alanı'ndan alır. Bildiğimiz W bozonlarından ağırdır,

bir protondan neredeyse 97 kat ağırdır. Fotona, yani en çok aşina olduğumuz parçacığa, insan gözünün dünyayı görmesine izin veren ışık parçacığına gelince, bu aslında daha derinlerdeki iki şeyin, Higgs Mekanizması'nın birbirine bağladığı B ile W^0'ın karışımıdır. Sonuç olarak elektromanyetik kuvvet evrenin temel bir özelliği değildir ve bu elektrozayıf modelden ortaya çıkar.

Böyle şeyleri isteseniz uyduramazsınız.

Standart Model'i tamamlamak

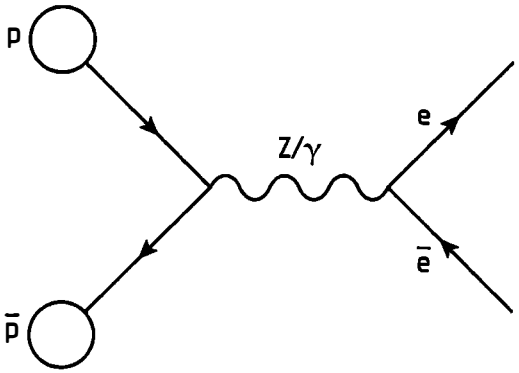
1968'de yazılan elektrozayıf teori günümüze dek değişmeden ulaşmıştır ve Standart Model'deki iki kuvveti açıklar. Güçlü kuvveti eklediğinizde tablo tamamlanır; her şey bu tablonun altında yatan ayar simetrilerine dayalıdır. 12 madde parçacığı ve 3 kuvvet vardır. Güçlü kuvvet, üç kurulumu olabilen bir yükle özdeşleştirilir: "Kırmızı", "yeşil" ve "mavi" renk durumları. Zayıf kuvvet, iki kurulumu olabilen bir yükle özdeşleştirilen bir simetriye dayalıdır: Zayıf çiftlerdeki iki parçacık (örneğin elektron ve elektron nötrino). Son olarak, yalnızca bir kurulumu, basit bir sayısı olabilen bir yükle özdeşleştirilen bir simetri vardır. Higgs Mekanizması, bu simetriden B bozonunu zayıf kuvvet simetrisinden W^0 bozonuyla karıştırır, yani bu parçacıklardan hiçbiri tek başına dünyada belirmez, bunun yerine onların iki karışımını elde ederiz: Bunlar foton ve Z'dir. Yüklü W bozonu ile Z, Higgs Alanı'ndan kütle alırken, foton kütlesiz kalır.

Higgs Mekanizması, zayıf kuvvet bozonlarıyla belirli bir problemi çözer ve elektrozayıf model aynı zamanda tüm parçacıkların, elektronun, müonun, taunun ve kuarkların aynı yolla kütle elde ettiğini söyler. Higgs Mekanizması, hepsinin anahtarıdır.

Peki, bunların herhangi biri, gerçek olayları betimler mi? Bu, elektrozayıf modelin sunumunun ardından on beş yıl boyunca yanıtsız bir soru olarak kalmıştır. Evrenin bu simetrilerini ciddiye almamız için bazı tuhaf şeylerin olması gerekiyordu: Evreni enerjiyle dolduran bu Higgs Alanı olmalıydı. Foton esasen B bozonu ile nötr W^0'ın tuhaf karışımıydı. Aynı zamanda kimsenin görmediği "ağır foton", Z bozonu da vardı.

Z'nin sorunu, W'nin sorunuyla aynıdır: Büyük kütle, etkileşimleri ender kılar. Z'yle özdeşleştirilen devasa bir "teslimat bedeli" vardır. Bu Belirsizlik İlkesi kullanılarak çözülebilir fakat ödenecek bedelin büyüklüğü, etkileşimin ender gerçekleştiği koşulların hâkim olmasını gerektirir. Aynı şey yüklü W bozonları için de geçerlidir: Beta bozunumu gibi süreçler, ancak W varsa meydana gelebilir. Fakat Z'yle mümkün olan pek çok etkileşim, aynı zamanda fotonla da mümkündür fakat bu kez bedel yoktur: Z'nin minicik fazladan katkısını tespit etmek, samanlıkta iğne aramaya benzer. Bazı ipuçları, fotonlar kullanılarak açıklanamayan nötrinoları içeren "nötr akım" etkileşimleri vardı, fakat kesin kanıt 1983'te elde edildi. CERN'deki Süper Proton Senkroton (SPS) Hızlandırıcısı, laboratuvarda W ve Z bozonlarını üretmeye yetecek kadar yüksek enerjiye ulaştı. Bir sonraki bölümde bu hızlandırıcıya döneceğim fakat protonlar ile antiprotonları yeterince yüksek enerjide çarpıştırarak W ile Z'nin teslimat bedeli ödenmiş olur ve onları içeren etkileşimler bir anda fazlasıyla mümkün hale gelir.

Bunun iyi bir örneği, aşağıdaki Feynman Diyagramında görülen, bir elektron ile pozitron üretimi aracılığıyla Z bozonunun keşfidir. Burada çarpışma protondan bir kuark ve antiprotondan bir antikuark içerir. Bunlar yok olarak bir foton

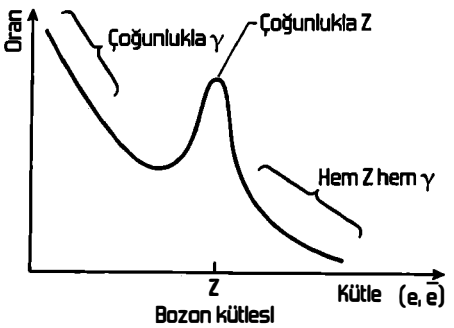


SPS'de elektron ve pozitronların üretilmesi.

veya bir Z bozonu oluşturur; bu Z/γ çizgisiyle gösterilmiştir çünkü hangisinin üretildiğini söyleyemeyiz. Bu Z veya foton daha sonra bir elektron ve bir pozitrona bozunur:

Üretilen elektron ve pozitronun enerjisini ölçerek çarpışmada ne kadar enerji olduğunu bulmak mümkündür. $E=mc^2$ ile o enerji Feynman Diyagramının ortasındaki sanal parçacığın kütlesine denktir (ayrı ayrı Feynman Diyagramları fiziksel planda olan bitenleri tam olarak anlatmaz fakat bu yine de burada mantıklı bir kestirimdir). Düşük enerjilerde pahalı Z büyük ölçüde bastırılır ve foton süreci öne çıkar. Bu tür etkileşimlerin toplam oranı, enerjinin veya sanal parçacığın kütlesinin artmasıyla birlikte düşer: Yüksek enerjide elektron ve pozitronlar bulma ihtimalimiz daha azdır çünkü sanal foton bunu gerçekleştirmek için enerji "ödünç" almalıdır.

Fakat enerji Z bozonunun kütlesine varıncaya dek artarken, borç almaya gerek yoktur. Gelen kuark ile antikuarkın yeterli enerjisi varsa, Z'yi yapmak için Belirsizlik İlkesi'nden borç almalarına gerek yoktur ve sürecin oranı yükselir. Bu Standart Model'in elektrozayıf kısmının ana öngörülerinden birini ispatlar: Z bozonu, "ağır bozon" gerçekten de vardır.



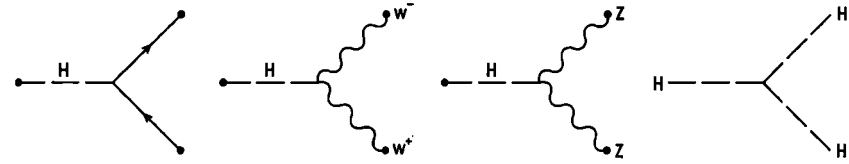
Farklı elektron + pozitron kütlesi kombinasyonlarında, LHC'de üretim oranı.

Bugün LHC'de çok daha yüksek enerjilere erişebiliriz. Z'nin çok üstünde birleşik bir kütlesi olan bir elektron ve bir pozitron görürsek, sürecin bir foton veya bir Z içerip içermemesi önemli değildir: İkisi de bu kütleye erişmek için fazladan enerji ödünç almalıdır. Sonuç olarak az çok eşit şekilde katkıda bulunurlar. Yeterince yüksek enerjide bu iki kuvvet arasındaki simetri yeniden sağlanır.

Bu tam da bizim gördüğümüz şeydir. Üç bölge görmeyi bekleriz: Fotonların hâkim olduğu sabit bir düşüş, Z için bir zirve, sonra da foton ile Z'nin neredeyse eşit şekilde katkı sunduğu bir bölge. Bunların üçünde de teori veriye uygundur.

Higgs avı

Z bozonunun keşfinden sonra bile, Higgs Alanı'nın gerçekten var olup olmadığı veya "elektrozayıf simetri kırılması"ndan başka bir şeyin sorumlu olup olmadığı sorusu varlığını sürdürüyordu. Parçacık kütlelerinin Standart Model'e nasıl dahil edilebileceğine dair pek çok fikir vardı ve Higgs Alanı için biraz doğrudan kanıt gerekiyordu. 1964'e geri dönersek, Peter Higgs'in makalesi "fizikle açık bir ilgisi olmadığı" gerekçesiyle bir dergi tarafından geri çevrilmişti! Böylece Higgs



Soldan sağa, Higgs bozonu Feynman Diyagramlarının bileşenleri: fermiyonlar, W bozonları, Z bozonları ve ötekl Higgs bozonlarıyla etkileşim.

ona bir bölüm daha ekledi ve farklı bir dergiye gönderdi. Bu sonradan eklediği kısım, doğrudan kanıtın ne olabileceğini ilk defa açıkça söylüyordu ve fikrin genellikle onun soyadıyla özdeşleştirilmesinin nedeni de muhtemelen budur. Higgs Alanı evrende gerçekten varsa, kendisiyle özdeş bir parçacığı da olmalıdır. Bu, Higgs Bozonu'dur. Bu parçacık, pekmezdeki bir dalgacık gibidir; tıpkı fotonun elektromanyetik alandaki bir dalgacığa benzemesi gibi. Higgs Bozonu'nu bulursanız, ayar simetrileri ve elektrozayıf model gibi çılgınca fikirlerin doğruluğu kanıtlanmış olurdu.

Higgs Bozonu, kütlesi olan herhangi bir parçacıkla etkileşime geçebilirdi (parçacıklar da zaten bu etkileşimlerle kütle kazanır); dolayısıyla Higgs Bozonu için bir dizi Feynman Diyagramı çizebiliriz. Higgs Bozonu'nun kendisi bir kütleye sahip olduğundan, ikiye bölünebildiği bir "öz etkileşim" verteksine de sahip olmalıdır:

Bu diyagramlar, Higgs Bozonu'nun nasıl davranacağını ve LHC'de nasıl bir sinyal üretebileceğini hesaplamamıza yarar. Ne yazık ki teori bize Higgs Bozonu'nun bu şekilde var olması ve davranması gerektiğini söylediyse de, onu nerede bulacağımıza dair pek az fikir sunuyordu. Bize Higgs Bozonu'nun ne kadar ağır olduğunu söylemiyordu. Yeterince güçlü bir parçacık hızlandırıcıyla onu oluşturmak, yani esasen Higgs Alanı'na yeterince sert çarpmak ve bu dalgacıklardan birini oluşturmak mümkün olmalıydı. Ne var ki, söz konusu parça-

cık hızlandırıcının ne kadar güçlü olduğu net değildi. 1983'ten sonra art arda makineler gitgide yüksek enerjilere ulaşırken ondan hiçbir ize rastlanmadı ve bu Standart Model'in son büyük gizemi olup çıktı: Higgs Bozonu diye bir şey gerçekten var mıydı? Eğer yoksa elektrozayıf model yanılıyor muydu? Bu durum, sanki Higgs Bozonu her şeyin anahtarıymış gibi, Nobel Ödüllü Leon Lederman'ın 1993 tarihli bir popüler bilim kitabında ondan "Tanrı Parçacığı" olarak bahsetmesine neden oldu. Belki de bu yayıncının fikriydi. Bir rivayete göre, Lederman aslında ondan "Tanrı'nın cezası parçacık" olarak bahsetmek istiyordu çünkü Higgs Bozonu çok aldatıcıydı; bu hikâyenin içinde doğruluk payı varmış gibi görünüyor ve günümüzde hiçbir parçacık fizikçisi ona Tanrı Parçacığı demiyor! Higgs Bozonu önemli olmasına önemlidir fakat Sekizinci Bölüm'de göreceğimiz gibi, önümüzde çok daha büyük sorular mevcuttur.

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı çok yüksek enerjide çalışacak şekilde tasarlandığından, en sonunda bu soruyu bir cevaba kavuşturabilirdi. Eğer Higgs Bozonu gerçekten de varsa, orada ortaya çıkacaktı. Eğer yoksa, LHC Standart Model'i kırılma noktasına itecekti: Higgs'in olmadığı bir teori, W bozonlarının fiziksel olmayan şeyler yapmaya başlayacağını öngörüyordu, bu da verilerde yeni bir şeyin, yani yeni bir parçacığın veya bütün dağınıklığı toparlayacak yeni bir etkileşimin ortaya çıkması gerektiği anlamına geliyordu.

Dolayısıyla LHC yirmi yıldan fazla süren planlama ve inşaattan sonra 2010'da açıldığında, çok fazla heyecan ve gerilim yaşandı. Üstelik sadece iki yıl sonra cevaba erişildi: ATLAS ve CMS deneylerinde Higgs Bozonu keşfedilerek 44 yıllık yapboz çözüldü ve en sonunda Standart Model tamamlandı. Bu keşiften bir sonraki bölümde daha çok bahsedeceğim.

Bu bölümde epey derin konulara girdik. Higgs Bozonu özel bir yaratıktır; CERN'deki önemli araştırmaların büyük kısmının merkezindedir ve karşılaştığın, LHC ve Higgs'den haberdar insan sayısı beni daima şaşırtmış ve mutlu etmiştir. Gelgelelim, onun gerçekten ne yaptığını anlamak, parçacık fiziğinde doktora yaptıysanız bile basit bir iş değildir. İşin gerçeği, Standart Model evrenin uyum sağlıyormuş gibi göründüğü bazı soyut ayar simetrileriyle inşa edilmiştir ve tüm kuvvetler o simetrilerin bir sonucudur. Buna göre, evren aynı zamanda bu Higgs Alanı'nda depolanan enerjiyle doludur. Bazı ayar bozonları bu alana yapışıp bir ayar simetrisini kırarak kütle elde eder. Tüm fermiyonlar artık aynı şeyi yapmak zorundadır. Bizim eski dostumuz foton da esasen ayrı ayrı asla göremediğimiz iki parçacığın, B ile W^0 bozonlarının tuhaf bir karışımıdır.

Diğer taraftan, Higgs bozonunun ne yaptığı kolayca tek satırda özetlenebilir: Higgs bozonu, diğer parçacıklara kütle verir. İtiraf etmek gerekirse, o ilginç "Tanrı Parçacığı" ismi epey akılda kalıcıdır. Ancak Higgs Mekanizması'nın gerçekte ne olduğunu ve tabloya nasıl oturduğunu biraz daha iyi anlamak, atomaltı parçacıkların tuhaf, soyut ve güzel dünyasına yeni bir pencere açar.

Higgs Mekanizması olmasaydı, evren çok farklı bir yer olurdu. Dördüncü Bölüm'de anlatıldığı gibi, QCD kuarkları küçük bir alana sıkıştıracağı için, proton, kütlesinin büyük kısmını korurdu. Bunun yanında, elektron dahil tüm temel fermiyonlar kütlesiz olurdu. Kütlesiz parçacıkların hepsi ışık hızında hareket eder, dolayısıyla atomlar muhtemelen oluşmazdı. Bütün kimya ve dolayısıyla bildiğimiz yaşam var olmazdı. Bunun üstüne, W bozonu kütlesiz olurdu, yani zayıf kuvvetin

baskısı olmazdı: Elektronlar devamlı nötrinolara, sonra yeniden elektrona dönüşürdü. Evreni Higgs olmaksızın ancak soğuk, karanlık gecede izole parçacıkların birbirinin yanından hızla geçip gittiği boş bir yer olarak hayal edebiliriz.

Üç bölümdür daldığımız ağır teorik fizik konularından sonra, biraz daha pratik bir konuya dönme vakti geldi. LHC gibi bir makine nasıl çalışır? ATLAS ve CMS deneyleri Higgs bozonunu nasıl bulmuştur ve şimdilerde aradığı yepyeni şeyler nelerdir?

YEDİNCİ BÖLÜM

EN BÜYÜK DENEY

Cenevre İsviçre'nin Fransızca konuşulan bölgesinde, Cenevre Gölü'nün kıyısında, kuzeyde Jura Dağları ile güneyde Alplerin karlı tepeleri arasında yer alır. Sade katedrali, John Calvin ile 16. yüzyıldaki Protestan Reformu'nun etkilerini taşır. Şehir bundan 400 yıl sonra dünya savaşlarından kaçan sanatçılar ile düşünürlerin yuvasına dönüşmüştür. Şimdi ise aralarında Kızılhaç ve BM'nin de bulunduğu bir dizi uluslararası şirket ve organizasyona ev sahipliği yapmaktadır. Kentin kuzeydoğusunda, Meyrin bölgesi yer alır. Bir zamanlar hoş bir kasaba olan Meyrin, betonun her sorunun cevabı gibi görüldüğü 20. yüzyıl ortasından itibaren çok katlı binalarla dolmuştur. Yazın ineklerin boynuna asılı çıngırak sesleri eşliğinde ayçiçeği tarlalarının arasından veya kışın, hiç dağılmayan alçak gri bulutların altından geçerek CERN'e ulaşırız.

Tam ismiyle Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, 1954 yılında kısmen ABD'deki Manhattan Projesi'ne cevaben ve bilimdeki büyük soruların yanıtlanabilmesi için artık daha önce hiç görülmemiş ölçekte büyük bir işbirliği yapılması gerektiğinin fark edilmesiyle kuruldu. Günümüzde yirmi bir Avrupa ülkesi ona üyedir, dünyanın dört bir yanından

başka ülkeler de çeşitli derecelerde katkıda bulunmaktadır. Binlerce kişi ana kampüste, daha fazlası da dünyanın dört bir yanındaki üniversiteler ve araştırma laboratuvarlarında çalışmalarını sürdürüyor. Meyrin gibi, CERN de brütalist mimariye selam durur ve fikirlerin neredeyse her ortamda yeşerebileceğinin kanıtıdır. Epey kasvetli ofis binalarına ve depolara bakarak, yerin altında olan bitenleri veya burada neden böylesine yoğun bir entelektüel enerji olduğunu tahmin etmek imkânsızdır. Ancak duvardan duvara kompleks histogramlar ve görseller sergileyen ekranlarla kaplı kontrol odalarından veya kocaman odaları sayısız işlemciyle kaplı bilgi işlem merkezlerinden birini ziyaret ettiğinizde burada sıra dışı şeylerin olduğunu net olarak anlarsınız. Bu şeylerden biri, yerin yaklaşık 100 metre altında ve 27 kilometre uzunluğundaki dünyanın en güçlü parçacık hızlandırıcısı olan Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'dır (LHC). Toprağın altında ana kampüsten Fransa sınırına dek uzanır ve geri döner. Higgs bozonunun keşfedildiği bu yer, evrenin bir sonraki sırrını bize açabilir.

Atomları parçalamak

LHC, dünyanın en son ve büyük parçacık hızlandırıcısıdır ve 20. yüzyılın başında başlayan teknolojik gelişmelerin güncel zirvesidir. Protonları evrenin mutlak hız limitine çok yakın bir hıza, ışık hızına (aslında ışık hızının %99,999999'una) ulaştırır, sonra da onları birbiriyle çarpıştırır. LHC, bu çarpıştırmaları daha önceki tüm deneylerden daha yüksek bir enerjide, hatta ABD'deki Tevatron'un rekorunun yaklaşık yedi katı bir enerji seviyesinde gerçekleştirir.

Bu rekor enerjiyi bağlama oturtmak gerekir. Bir protonun normal standartlardaki ağırlığını (aslında $1{,}7 \times 10^{-27}$ kilogramla

pek ağır değildir) hatırladığımızda LHC'deki çarpıştırmalarda harcanan büyük enerji çok daha önemsizleşir: Bu, kabaca, uçan bir sivrisineğin enerjisidir. Tek fark, LHC'nin bu enerjiyi her çarpışma için ayrı ayrı fotonlara koymasıdır. Bir protonun ne kadar küçük olduğunu düşündüğümüzde (daha doğrusu, 10^{-15} metreyle aşırı küçüktür) bunun anlamı enerji *yoğunluğunun* çok büyük olmasıdır. LHC her çarpışmada bir saniyenin binde birinde pek az miktarda enerjiyi çok daha küçük bir alana sokarak, bir laboratuvarda görülmemiş koşulları oluşturur.

Bu neden önemlidir? Bugün evren genişliyor. Öyle görünüyor ki eskiden çok daha küçüktü. Yaklaşık 13,8 milyar yıl önce her şey tek bir yerde, Büyük Patlama'yla başlamış olmalıdır. Büyük Patlama'da ne olduğu konusunda hiçbir fikrimiz yok fakat o noktada tüm evren son derece küçük bir alanda sıkışmıştı. Hiçbir şeyden, bir kum tanesine, bir topun, Dünya'nın, Güneş Sistemi'nin, Samanyolu'nun boyutlarına ulaşarak hızla genişledi ve bunların hepsi ilk birkaç saniye içinde meydana geldi. Evren genişlemeye ve soğumaya devam ediyor ve bugün görebildiğimiz parçası, yaklaşık 90 milyar ışık yılı boyutunda. Gezegenler, yıldızlar ve galaksiler arasında çok fazla alan var ve o alanın sıcaklığı şimdi 2,7 kelvin veya -270 santigrattır.

Büyük Patlama'dan hemen sonra evren çok farklı bir yerdi. Tüm galaksileri, yıldızları ve diğer her şeyi alıp bir ayakkabı kutusu boyutlarında bir alana sıkıştırmak, onu fazlasıyla sıcak ve yoğun kılmış olmalıdır. İşte bağlantı da budur: LHC'deki çarpışmalarda yaratılan enerji yoğunluğu, Büyük Patlama'dan saniyenin milyonda birinin milyonda biri sonrasındaki evrenin enerji yoğunluğuna eşittir. LHC'de oluşturduğumuz parçacıklar ve gördüğümüz etkileşimler, o zaman-

lar tüm evreni doldurmuştu. Bu çarpışmaları incelemek, bize evrene bugün sahip olduğu formu veren kuvvetlerle ve şu anda gördüğümüz her şeyi oluşturan parçacıkların ve henüz keşfetmediklerimizin kökenleriyle ilgili bir şeyler söyleyebilir.

LHC, en çok Higgs bozonunu keşfetmekle ünlüdür. Son bölümde Higgs'in teorisine girdim ve bu bölümde ise keşfin nasıl yapıldığını anlatacağım: Bir parçacık hızlandırıcı ve detektörü nasıl çalışır? Bu yeni parçacık ihtimali nasıl gerçeğe dönüşmüştür?

Demek erken evreni yeniden oluşturmak istiyorsun...

Erken evrenin koşullarını yeniden oluşturmak için LHC öncelikle protonlara ihtiyaç duyar. Bunlara rastlamak aslında epey kolaydır: Evrendeki en yaygın kimyasal element hidrojendir ve hidrojen atomları bir protonun etrafında dönen bir elektrondan meydana gelir; elektronu düşürün ve abrakadabra... CERN LHC'ye tedarik etmek için yaklaşık 5 kilogram hidrojen gazı taşıyan küçük bir hazne kullanır. Bu çok fazla görünmeyebilir fakat atomlar çok küçüktür: 5 kilogram, yaklaşık $3x10^{27}$ hidrojen atomu içerir. Bu, hayal etmesi çok güç o inanılmaz büyük sayılardandır; bir bağlama oturtmak gerekirse, eğer bu atomların her biri bir futbol topu büyüklüğünde olsaydı, bir araya koyularak kabaca Dünya'nın boyutlarında bir küre oluşturabilirdi. Bu hazne, LHC'nin bir milyar yıl boyunca proton kıtlığı çekmemesini sağlayacak kadar hidrojen barındırır.

Protonların bu hidrojenden elde edilmesi için elektronların çıkarılması gerekir ve bu da bir elektrik alanının yardımıyla yapılır. Elektrik yükü taşıyan bir parçacık için bir elektrik alanında durmak bir tepenin üstünde durmaya ben-

zer: Pozitif yüklü parçacıklar tepenin bir yanından (negatif voltajlı tarafa doğru), negatif yüklü parçacıklar da diğer yanından aşağı (pozitif voltajlı tarafa doğru) hızla inecektir. Bu, bir sürü Feynman Diyagramı hesaplamak zorunda kalmadan yüklü parçacıkların etkileşimlerini betimlemenin basit bir yoludur!

Bir hidrojen atomunda bir negatif elektron bir pozitif protonun etrafında döner. Eğer hidrojen atomunu zayıf bir elektrik alanına koyarsak pek bir şey olmayacaktır: Elektron ile proton "tepe"nin iki tarafından aşağıya inmek isteyecek ama sonuçta birbirlerine yapışık kalacaktır. Yalnızca "tepe" yeterince dikse (yani yeterince yüksek voltajlı bir elektrik alanı mevcutsa) proton ile elektron birbirinden kopacak ve kendi yollarına gidecektir. Bir hidrojen atomunu bir elektron ve protona bölmek için ise epey dik bir tepeye ihtiyaç vardır. LHC'nin ilk evresi, bir hidrojeni parçalara ayırmak için 90.000 volt kullanan görkemli "duoplazmatron"dur. (Süreç biraz daha karmaşıktır çünkü hidrojen atomları da hidrojen molekülleri, yani H_2 oluşturmak için birbirine yapışır fakat temel fikir aynıdır.) Bu voltaj normal şebeke gerilimi olan 110 veya 220 volttan çok daha fazladır; zaten evlerimize verilen voltajın atom parçalayabilecek kadar büyük olmaması herhalde iyi bir şeydir.

Protonlar, duoplazmatronda 90.000 voltluk tepeden aşağıya yuvarlanmıştır, hızla yolculuk edeceklerdir. Bu parçacık fiziğinde kullandığımız temel enerji birimini belirtmek için iyi bir fırsattır: eV veya elektron volt. Bir eV, onu 1 V kullanarak hızlandırdıysanız, bir elektronun kazanacağı enerji miktarıdır. Protonlar, elektronlarla aynı enerji miktarını taşır (fakat zıt işareti alır), dolayısıyla 1 V'de aynı enerji miktarını kazanır. Elektronlardan çok daha ağırdırlar, bu nedenle biraz daha ya-

vaş hareket ederler. Her halükârda, bu çok fazla bir enerji değildir. Normal standartlarda düşünürsek, bir kalori yaklaşık $4x10^{26}$ eV'dir ve bir muzda 100 kalori vardır.

Aynı zamanda "doğal birimler" de kullanarak ışık hızını (c=299.792,458 m/sn) 1 olarak yeniden tanımlarız. Bu, temel uzunluk ölçüsünü metreden, ışığın 1 saniyede kat ettiği mesafeye (kabaca 3,3 nanometre) yeniden tanımlamak demektir ve avantajı, $E=mc^2$'nin basitçe E=m haline dönüşmesidir. Artık kütle de (hatta momentum da) eV olarak ifade edilebilir. Örneğin bir elektronun kütlesi 511 keV, bir protonunki 938 MeV ve bir bozonunki 80 GeV'dir (ön eklerin açıklaması için Ek 1'e bakınız).

LHC şu anda 13 TeV (13 trilyon eV) enerjisinde çalışarak her protonu zıt yönlerde 6,5 TeV hızlandırıyor ve ardından onları kafa kafaya çarpıştırıyor. Bu bir muzda depolanmış enerjiden çok daha az olsa da, bu enerjiyi minik bir alana sıkıştıran parçacık çarpışmalarında önemli olan enerji yoğunluğudur.

Protonları bu enerjilere ulaştırmak için ciddi voltajlar gerekecektir.

Tarihin sularında sörf

Duoplazmatrondan sonra, protonlar CERN'de bir seyahate çıkar. Bu seyahat aynı zamanda parçacık hızlandırıcıların tarihinde kısa bir gezidir. Her biri bir zamanlar son teknoloji olan fakat şimdi sadece protonlara hız katıp onları bir sonraki evreye geçiren pek çok evre vardır. Birincisi, doğrusal parçacık hızlandırıcısı veya linaktır. Tam ismiyle Linak 2, tahmin edebileceğiniz gibi 1970'lerde Linak 1'in yerini almıştır. Tüm linaklar gibi, parçacıkları düz bir çizgi olarak hızlandırır. Linak 2'nin uzunluğu 33 metreden biraz fazladır. Stanford Ca-

lifornia'daki iki mil uzunluğundaki bir linak, "dünyanın en düz nesnesi" olma iddiasındadır ve 1968'de protonları kuarklara ayıracak kadar güçlü olan ilk parçacık hızlandırıcısıydı. Geleceği düşünürsek, LHC'den sonra ne inşa edileceği sorusunun muhtemel cevaplarından biri de yeni tür, büyük bir linaktır.

Linaklar ve onların dairesel kuzenleri sinkrotonlar, modern parçacık hızlandırıcıların iki temel tasarımıdır ve ikisi de parçacıkları hareket ettirmek için elektrik kullanır: Pozitif yüklü protonların aşağıya ineceği ve giderken hızlanacağı bir tepe kurarlar. Linak 2 protonları 50 MeV, yani 50 milyon elektron voltluk bir enerjiye hızlandırır. Buna ulaşmanın bir yolu, 33 metre uzunluktaki linak boyunca 50 milyon volt uygulayarak onu protonların aşağıya yuvarlanacağı kocaman bir tepeye dönüştürmektir. Fakat nasıl ki 90.000 V hidrojeni parçalamaya yetiyorsa, bu tür bir voltajı herhangi bir aygıta uygulamaya çalışmak, protonların bir şey yapmasına fırsat vermeden o aygıtı tamamen mahvederdi.

Bu sorunu halletmek için kullanılan numara çok zekicedir: Sabit bir voltajda tepeden aşağıya yuvarlanmak yerine protonlar, osilasyonlu (salınımlı) bir voltaj boyunca, tıpkı bir okyanus dalgasındaki sörfçüler gibi giderler. Bu osilasyonlu elektrik alanları, RF haznelerinde kurulmuştur. "RF", radyo frekansı demektir ve içerideki alan radyo dalgalarıyla neredeyse aynı frekansta, saniyede yüz milyonlarca kez osilasyon yapar. Hazneler, esasen boyutları 10 santimetre ile bir metre arasında değişen metal kutulardır. İki delikleri vardır: Biri protonların içeri girmesi için, bir diğeri de öteki taraftan çıkmaları içindir. Protonlar bir kere hazneye girdiğinde, arkalarındaki duvar pozitif yüklü, öndeki duvar da negatif yüklü olmalıdır, böylece küçük bir hızlanma çekimi alırlar. Sonra

kutudan çıkarken, yükler tersine dönecektir. İkinci duvar şimdi pozitif yüklü olmalıdır, böylece protonlar itilir. Bir sonraki proton girdiğinde voltajlar yeniden tersine döner ve süreç yenilenir. Art arda bir dizi RF haznesi, protonları hızlandırmak için bir hızlandırıcı voltaj üretecektir ve bugün hemen her parçacık hızlandırıcısı onları kullanır.

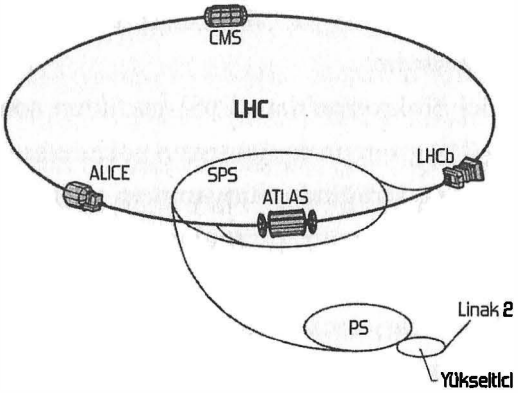
Linak 2'den aşağıya sörf ettikten sonra protonlar 50 MeV'ye ulaşır ve sonraki aşamalara gönderilir ve bundan sonra hepsi sinkrotondur. Bunlar tasarım olarak daireseldir, dolayısıyla protonlar artık seyahatleri sırasında aynı hızlandırıcı RF haznelerinden tekrar tekrar geçer ve her defasında küçük bir yükseltme alır. Genel olarak sinkrotonlar parçacıkları daha verimli bir yolla yüksek enerjiye itebilir fakat onları bir daire etrafında çekmemiz gerekir. Bu, manyetik alanlar kullanarak yapılır.

Bir elektrik alanı, parçacıkları hızlandıran bir tepe gibiyse, manyetik alanlar bir parçacığın yönünü değiştiren fakat hızını değiştirmeyen kümelenmiş köşeler gibidir. Üçüncü Bölüm'de ilk bulut odası deneylerinde mıknatıslar kullanılarak pozitif ve negatif yüklü parçacıkların nasıl zıt yönlere büküldüğünü anlatmıştım; aynı şey burada da olur. RF haznelerindeki elektrik alanları hızlanır ve büyük mıknatısların sunduğu manyetik alanları protonları bir daire etrafında yönlendirir. Gerçekte, bu son derece hassas bir dengeleme eylemidir: parçacıklar hızlandıkça manyetik alanın gücü artmalıdır çünkü onları aynı dairede hareket ettirmeyi sürdürmek için gitgide daha büyük bir kuvvet gerekir. RF haznelerindeki elektrik alanları, tam doğru zamanda hızlandırmayı dağıtmak için protonların konumlarıyla saniyenin milyarda birinde senkronize olmalıdır ("sinkrotron" ismi buradan gelir). Bilgisayarlar bunun uygulanabilmesi için elzem önemdedir fakat her şeyi

kontrol etmek esasen bir parçacık hızlandırıcı idare etme sanatının bir parçasıdır.

Proton İtici Sinkrotron'dan (PBS) geçtikten sonra Proton Sinkrotron'a (PS) giren protonlarımızın yolculuğuna dönelim. PS, 1959'da inşa edildiğinde dünyanın en güçlü hızlandırıcısıydı. Çevresi 628 metredir, protonları 25 GeV'ye hızlandırır. O, Üçüncü Bölüm'de bahsettiğim Gargamelle Kabarcık Odası'nda incelenen çarpışmaları sağlamakta kullanılan hızlandırıcıydı. PS'den sonra, "lafı dolandırmayan" bir isme sahip bir başka makineye, SPS'ye (Süper Proton Sinkrotron) geçeriz. 1976'da inşa edilen ve 7 kilometre genişliğindeki bu makine, protonları 450 GeV'ye hızlandırabilir. SPS asla rekor sahibi olmadı çünkü ABD'deki Fermilab'de bulunan bir hızlandırıcı o sıralar ondan biraz daha güçlüydü. Fakat SPS üzerine yapılan deneyler, W ve Z bozonlarını keşfeden ilk deneylerdi. Bu son bölümde bahsettiğimiz Higgs Mekanizması'na dayanan elektrozayıf teorisinin son derece önemli bir testiydi.

Son olarak, SPS'den protonlar LHC'ye geçer. LHC, 27 kilometreye yayılan bir canavardır ve protonlar desteler halinde toplanarak LHC'nin halkası etrafında zıt yönlere gönderilir. LHC onları 6,5 TeV'ye dek hızlandırır ve bu enerjide protonlar gidiş geliş yolculuğunu her saniye 10.000'den fazla kez yapar. Desteler yüklendikten sonra yaklaşık 12 saat boyunca etrafta hızla dolaşır. Protonların dolaşmalarını devam ettirmek için son derece güçlü mıknatıslar kullanılır: Toplamda 1232 adet olan bu mıknatısların her biri yaklaşık 35 ton ağırlığında, 14,3 metre uzunluğundadır ve tam 8,3 Tesla'ya varan bir alan sağlarlar. Bu, sıradan bir buzdolabı magnetinden yaklaşık 20.000 kat güçlüdür ve LHC'ye üstünde özlü sözler bulunan buzdolabı magnetleri sokmak pek pratik olmayacaktır. Bu tür bir manyetik alanı kontrollü bir yolla vermek için mıknatıslar



LHC'ye bağlanan CERN hızlandırıcı kompleksi.

süperiletkendir ve -271,25 °C'de veya mutlak sıfırın 1,9 derece üstündeki sıcaklıkta, yani dış uzaydan düşük bir sıcaklıkta tutulmaları gerekmektedir.

Destelerin çarpışmasını sağlamak için daha fazla mıknatıs kullanılır. Artık proton ışınları, bir saç telinden daha da incedir, halka etrafında belirli noktalarda yollarının kesişmeleri için yönleri hafifçe saptırılır. Protonları çarpıştırmak için gereken kesinlik, Londra ve New York'tan iki dikiş iğnesi ateşleyip Atlantik'in ortasında çarpışmalarını sağlamak için gereken kesinliğe benzer. Bu çarpışmaların olduğu noktalarda (Atlantik'in üstünde değil, LHC'de) parçacık detektörleri ATLAS, CMS, ALICE ve LHCb sonuçları incelemek için bekler.

İşte LHC'nin içinde bunlar olup biter fakat LHC neye benzer? LHC yerin yaklaşık 100 metre altında, yaklaşık 4 metre yüksekliğinde bir tünelde yer alır. O tünelin yalnızca çeyreği kadarını kaplar, dolayısıyla tünelde yürüyecek, hatta bisiklet sürecek yer bile vardır. Zaten bisiklet sürmek, bakım çalışmaları sırasında 27 kilometrelik alanda gidip gelmek için en çok tercih edilen yöntemdir. Protonlar, kabaca 6 santimetre çapında bir "ışın borusu"nda yolculuk eder. Bunlardan iki tane vardır; biri her yönde yolculuk eden proton desteleri içindir

ve bunların olabildiğince boş olması gerekir, aksi takdirde protonlar yolculuk ederken rastlantısal hava moleküllerıyle çarpışmalarda kaybolacaktır. Bu nedenle borular boş tutulur; hatta dış uzaydan bile boşturlar. Borular, hızlandırıcı hazneleri ile devasa mıknatıslarla çevrilidir, dolayısıyla eğer tünele girecek olursanız, göreceğiniz şeyler bunlardır. Mıknatısları, haznelerin yüksek voltajlı ekipmanı ve her şeyi gözleyen elektronikleri soğutmak için arasına biraz kriyojenik serpilmiştir. Tüm bunlar ciddi oranda güç gerektirir: LHC çalışırken yaklaşık 200 megavat enerji kullanır. Bu, 60.000 kişilik bir kentin tükettiği enerjidir.

Hassas makineler

Bu sürecin başında bir hidrojen atomu alıp onu protonlar ile elektronlara böldük. LHC, esasen bir torba dolusu kuark ve gluon olan protonları kullanır. Bir kuark veya bir gluonun her çarpışmada torbadan çekilip çekilmeyeceği veya protonun toplam enerjisinin ne kadarını taşıyacağını bilmek imkânsızdır. Mutlaka 6,5 TeV'den az olacaktır. Elektronlar temel parçacıklardır, bütün enerjilerini her çarpışmaya taşırlar. Dolayısıyla neden elektronlar yerine bu verimsiz protonların kullanıldığını merak etmek mantıklıdır.

Parçacıklar köşelerden döndüğünde fotonlar yayarak enerjinin bir kısmını kaybeder ve bu sinkrotron radyasyonu olarak bilinir. Parçacıklarımızın bir elektrik alanında sörf yapması benzetmesine dönersek, sinkrotron radyasyonu, sörfçü bir dönüş yaptığında yukarı yükselen sudur ve o suyu yükseltmek biraz enerjiye mal olur. Daha hafif parçacıklar, ağır parçacıklardan daha fazla sinkrotron radyasyonu üretir. Çok daha fazla. Oran, parçacığın kütlesinin karesinin karesiyle düşer. Bir elektron, bir protondan yaklaşık 2000 kat hafiftir ve

bir noktada, kaybettikleri enerji miktarı nedeniyle elektronların bir daire etrafında dönmeyi sürdürmelerini sağlamak imkânsızlaşır.

Örnek olarak, LHC tüneli daha önce elektronları ve antimadde eşleri pozitronları çarpıştıran LEP hızlandırıcısı tarafından kullanılıyordu. LEP 200 GeV'nin biraz üstünde bir enerjiye ulaşabilirken, aynı 27 kilometrelik tünelde çok daha ağır protonları hızlandıran LHC, o enerjinin 70 katına ulaşır. Dolayısıyla yüksek enerjilere erişecek bir elektron-pozitron çarpıştırıcısı için planlar, bir sinkrotrondan ziyade bir linak kullanır: Kilometrelerce uzunlukta bir linak inşa etmek, sinkrotron radyasyonuyla uğraşmaktan daha kolaydır. Öyle olsa bile, elektron makineleri asla proton makinelerinin enerjilerine ulaşmayacaktır. Proton hızlandırıcılar genellikle "keşif" makineleridir. Karmakarışık olmakla beraber, enerji sınırını iterler. Elektron makineleri ise "kesinlik" makineleridir. Daha düşük enerjiye erişirler fakat her çarpışmaya tam olarak ne gittiğini bilerek belirli etkileşimleri detaylı incelemek mümkündür.

Sinkrotron radyasyon hızlandırıcılarda biraz sorun olsa da, aslında çeşitli kullanımları vardır. Birleşik Krallık'taki Elmas Işık Kaynağı elektronları hızlandırır, sonra onları kasten bir dizi dar köşeden dönmeye göndererek çok saf, yüksek derecede uyumlu foton ışınları üretmelerini sağlar. Bu yeni ışık kaynakları, maddelerin yapısını daha da büyük bir kesinlikle incelemekte kullanılır; tıpkı Rosalind Franklin'in X-ışınlarını DNA'nın ikili sarmal yapısını ortaya çıkarmakta kullanması gibi. Bazen "yavaşlama ışıması" olarak tercüme edilen bir Alman yapısı olan Bremsstrahlung olarak bilinen sinkrotron radyasyonu parçacık detektörleriyle ilgili kısımda yeniden karşımıza çıkacak. Bu, İngilizce, Almanca, Fransızca, Yunan-

ca, Rusça ve başka dillerin yanı sıra kendi icat ettiğimiz dillerin de bir karışımı olan, uluslararası parçacık fiziği dilinin bir unsurudur. Farklı farklı uyruklardan pek çok kişinin görev yaptığı CERN'de çalışmanın sevdiğim yanlarından biri, sohbetlerden parçaların kulağıma çalınmasıdır. Çok heyecanlı (ve bana göre) hepten deşifre edilemez bir konuşma, tanıdık "müon", "NLO", "kalorimetre" veya "Higgs" sözcüklerini duyar duymaz size anlaşılır gelmeye başlar.

Çarpışma yeri inceleme

Nihayetinde LHC'de üretilen pek çok çarpışma aynı görünür. Beşinci Bölüm'de anlattığım gibi, biri bir üst kuark ile bir antikuark veya Altıncı Bölüm'de anlattığım gibi bir Z/γ veya mümkün olan binlerce başka şey üretebilir. Gerçi LHC protonları çarpıştırdığından, çarpışmaların büyük kısmı basitçe bir sürü kuark ve gluon üretir ve bunlar yeni hadronlar içinde hapistir.

Standart Model'deki daha egzotik parçacıklardan herhangi biri üretilirse, doğrudan ölçülmelerine fırsat kalmadan bozunacaklardır. Tüm bu bozunmalardan sonra çarpışma yalnızca kararınca uzun yaşayan parçacıkların bir serpintisi haline gelir ve bunların ne olabileceğinin listesi kısa bir listedir: Elektronlar ile müonlar, taular birkaç milimetre yolculuk ettikten sonra bozunur ve bazen bu uçuş mesafesinden tanımlanabilirler. Hadronların parçacık bahçesinden proton, nötron, pion, kaon ve başka birkaçı daha; alt veya tılsım kuarklar içeren bazı hadronlar da birkaç milimetre yolculuk ettikten sonra bozunur, böylece tau gibi tespit edilebilir. Bu hadronlar genellikle Dördüncü Bölüm'de anlattığım kolime edilmiş fıskiyeler halinde üretilir. Son olarak, fotona gelelim. Nötrinolar etkileşimde bulunmadıkları için

doğrudan ölçülemezler fakat var oldukları çıkarsaması yapılabilir. Buna bir sonraki bölümde döneceğim. Ve işte liste bu kadardır.

Tek bir çarpışma, bu tespit edilebilir parçacıkların yüzlercesine yol verebilir ve amaç bunları birbirine eklemek, olabilecekleri yeniden yapılandırmaya çalışmaktır. Bu minik bir çömlek parçası bulmak, sonra da onun bir tabağa mı, vazoya mı veya çok daha ilginç bir şeye mi ait olduğunu bulmaya çalışmak gibidir. (Bu bir arkeolog için belki bir heykelcik, bir fizikçi için ise bir Higgs bozonudur.) Ne kadar çok parça bulursanız işiniz o kadar kolaylaşır, dolayısıyla bir deney çarpışma etrafındaki alanı kapsamak ve olabildiğince çok parçacık yakalamaya çalışmak zorundadır. Daha sonra her parçacık hakkında bir o kadar bilgiye ihtiyaç duyarız: Onun ne tür bir parçacık olduğu, ne kadar enerjiye sahip olduğu, hangi yöne doğru gittiği vs. Her türlü bilgi yeniden yapılanmaya katkıda bulunur.

Benim çalıştığım deney olan ATLAS detektörünün büyük kısmı, İkinci Bölüm'de bahsettiğim Wilson Bulut Odası'yla aynı temel ilkeyi kullanır ve bu ilke iyonlaşmadır: Bir elektrik yüklü parçacık atomların yanından uçarsa, büyük ihtimalle bazı elektronları devirip serbest bırakacaktır. O elektronları süpürmek için bir voltaj kullanarak (aşağıya yuvarlanabilecekleri bir başka tepe kurarak), elde edilen toplam yük ölçülerek sayılabilirler. Aynı zamanda elektronlar atomlar tarafından yeniden yakalandığında yayılan fotonları saymak da mümkündür. ATLAS tüm bunları yaklaşık 100 milyon farklı sensörle yapar ve bu onu her saniye 40 milyon fotoğraf çekebilen 100 megapiksellik bir dijital fotoğraf makinesine çevirir. Hem de bu fotoğraflar üç boyutlu ve atomaltı parçacıkların

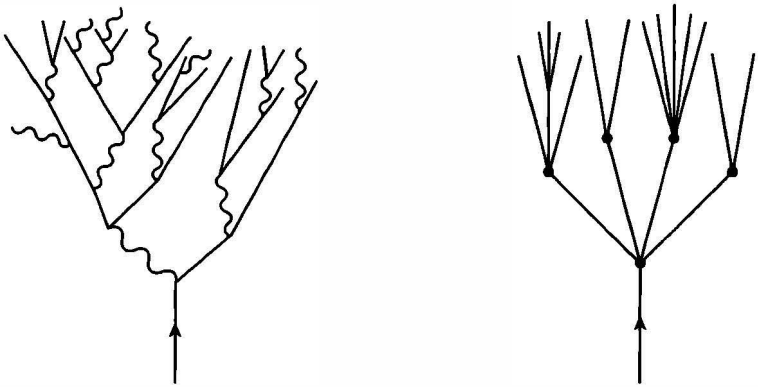
fotoğraflarıdır. Bu, Higgs bozonunu bulmak için gereken türde bir teknolojidir.

Bildiğiniz dijital fotoğraf makinelerinden değil

ATLAS'ta iki ana bileşen vardır: Geçip giden parçacıkları ölçen iz sürücüler ile parçacıkları durma noktasına getiren kalorimetreler.

Önce, modern deneylerde incelikli şekilde piksellere bölünmüş ince silikon katmanlarına benzeyen iz sürücü detektörler gelir. Bir çarpışma sonucu fırlayan yüklü bir parçacık bu katmanların arasında hareket ederken, çarptığı her pikselde küçük bir sinyal üretir. Art arda gelen bu sinyaller bir ekmek kırıntısı izi gibidir ve o parçacığın rotasını yeniden yapılandırmayı mümkün kılar. Mümkün olan en fazla bilgiyi almak için birinci katman çarpışmalara çok yakın, yaklaşık 3 santimetre öteye oturur. Bütün iz sürme detektörünün biçimi bir rigatoni makarnasını andırır, 2,3 metre genişlikte, 5,3 metre uzunluktadır. Tıpkı LHC'de dolaşan protonlar gibi, parçacıklar manyetik alanda kıvrılırlar ve bir yol boyunca eğimi ölçmek, yüklü bir parçacığın hızının (aslında momentumunun) yanı sıra yönünü ölçmemize izin verir.

İz sürme detektörünün dışında, bir parçacığın konumu ve toplam enerjisini o enerjiyi bir yığın iyonlaşmış elektrona dönüştürerek ölçen kalorimetre vardır. Ne yazık ki parçacıklar elektronları iyonlaştırarak pek fazla enerji kaybetmezler, dolayısıyla kilometrelerce uçup en sonunda dururlar ve buna yetecek kadar büyük bir detektörümüz olmadığı kesindir! Süreci hızlandırmak için parçacıkların bir "yağmur" oluşturmalarını sağlamamız gerekir. Çok enerjisi olan bir parçacığı, makul bir mesafede durdurulabilecek kadar az enerjisi olan pek çok parçacığa dönüştürürüz. Kalorimetreler bunu detektör



Kalorimetre içinde meydana gelen elektromanyetik yağmur (solda) ve hadron yağmuru (sağda).

katmanlarıyla demir, kurşun, hatta tükenmiş uranyum olabilecek bir yoğun emicinin katmanlarını değiştirerek başarır. Ve yağmuru başlatan da bu emicidir.

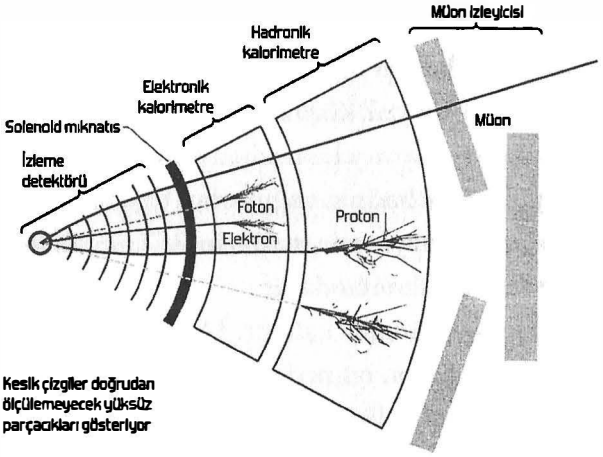
Bir kalorimetre tarafından durdurulabilecek ilk parçacıklar, elektronlar ve fotonlardır. Bunlar yoğun emiciden geçerken oradaki atomların elektrik alanlarıyla etkileşime girer: Bir elektron çok yüksek enerjili bir foton yayabilir, tıpkı LHC'deki senkrotron radyasyonu gibi. Bir foton bir elektron ve bir pozitrona dönüşebilir. Bunlar daha fazla foton yayabilir vb. İlk parçacıklardan biri hızla, durdurulabilecek ve detektörün sadece birkaç santimetresiyle ölçülebilecek düşük enerjili onlarca, yüzlerce foton, elektron ve pozitrondan oluşan bir "elektromanyetik yağmur"a dönüşür.

Bir elektrondan daha ağır parçacıkların, foton yayma ihtimalleri düşüktür. Sinkrotron radyasyonunda olduğu gibi, ışıma olasılığı bir parçacığın kütlesinin karesinin karesiyle düşer. Tüm hadronlar elektromanyetik yağmurlar başlatamayacak kadar ağırdır, dolayısıyla farklı bir yolla durdurulmalıdır: emicide bir atom çekirdeğine çarparak bir "hadron yağmuru" başlatırlar. Böylesi bir çarpışma, Dördüncü Bölüm'de anlattı-

ğımız güçlü kuvvet etkileşimine neden olur: Kuarklar ile gluonlar serbest kalırlar, en sonunda da bir avuç yeni hadrona hapsolurlar. Çekirdek çok küçük olduğundan, bu etkileşimler elektronlar ile fotonların elektromanyetik etkileşimlerinden çok daha enderdir ve hadron yağmurları başlatmak daha zordur. Onları yakalamaya çalışmak için ATLAS kalorimetresi yaklaşık 2,5 metre kalınlığındadır.

Böylece geriye müonlar kalıyor. Müonlar, elektronlardan yaklaşık 200 kat ağırdır, bu nedenle bir elektromanyetik yağmur başlatmazlar. Güçlü kuvveti hissetmezler, bu nedenle bir hadronik yağmur da başlatmazlar. Başka bir tabirle durdurulamazlardır! Onlar uçup geçerken, dünyada hızla uçuşurken ve onları ölçmek için kalorimetrenin dışına ikinci bir iz sürme detektörü koyulur; en sonunda detektörün dışında bozunurlar. Kozmik ışın çarpışmalarında üretilen müonlar atmosferde, hatta 100 metre genişliğindeki kayalıkların içinde bile seyahat edebilir ve LHC'nin detektörleri tarafından saptanabilir. 2009'da CERN'de üstünde çalıştığım ilk şey, LHC henüz açılmadan önce CMS detektörü kullanılarak bu kozmik ışın müonlarının bazı özelliklerini ölçmekti. Elbette, kozmik ışınları ölçmek için yeraltına gömülü bir detektör kullanmak biraz tuhaftır!

Şunlar her genel amaçlı parçacık detektörünün bileşenleridir: Çarpışmayı çevreleyen, parçacıkları rahatsız etmeden parçacık rotalarını takip eden ince detektörlerin meydana getirdiği katmanlara sahip bir iz sürme sistemi. Elektron ile foton yağmurlarını başlatmak ve yakalamak için bir elektromanyetik kalorimetre, daha sonra hadron yağmurlarını yakalamak için kullanılan daha büyük bir hadron kalorimetresi. Son olarak, müonları çıkarken kaydeden bir başka iz sürücü. ATLAS tüm bu unsurları, farklı bileşenleri bize üretilen par-



ATLAS gibi bir detektörde farklı parçacıkların ortaya çıkması ve ölçülmesi.

çacık türleri, enerjileri ve yönleri hakkında bilgi veren 25 metreyi aşkın yükseklikte ve 45 metre uzunlukta silindir biçiminde bir detektörde toplar.

ATLAS'ın merkezinde her saniye 40 milyon çarpışma olur; başka bir tabirle, çarpışmaların arasında 25 nanosaniye (ns) boşluk vardır. Bir çarpışma sonucu fırlayan parçacıklar, hemen her zaman ışık hızına çok yakın hızla hareket eder fakat bu hızda bile 25 ns'de yalnızca yaklaşık 7,5 metre yolculuk etmiş olurlar. Bir sonraki çarpışma sonucu fırlayan parçacıklar gelmeden önce detektörden çıkmaya bile fırsatları olmaz. Peş peşe çarpışmaların bir bulanıklıktan ibaret olmasını engellemek için ATLAS'ın tamamı son derece yüksek bir kesinlikte senkronize olmalı, her çarpışmadan elde edilen bilgiyi inanılmaz hızlı toplamalıdır. Çarpışmaların çoğu İkinci Bölüm'de bahsettiğim tetikleyiciler kullanılarak bir kenara bırakılır: Bunlar detektörün parçalarında görülen sinyallere dayalı ultra hızlı kararlardır. Her saniye gerçekleşen çarpışmaların en ilginç görünen yaklaşık 1000 tanesine ilişkin veriler daha sonra analiz edilmek üzere saklanır.

Bunu, bir parçacık detektörünün nasıl inşa edileceği açıkmış gibi sundum. Elbette öyle değildir. Her yeni tasarım öncekinden daha kesin, hassas ve hızlı olmuştur. Hepsi tek bir cihazda hem prototip hem de son üründür. Teknoloji, kullanılırken icat ediliyor; bu durum, LHC'de detektörü kontrol etmekte kullanılan hızlı elektronikler aracılığıyla proton ışınlarını bükmek için kullanılan mıknatıslardan, tüm veriyi işlemekte kullanılan programlama tekniklerine dek geçerli.

Bu deneyler öyle karmaşık hale geldi ki, onların işlemesini sağlamak için binlerce insan gerekiyor. Fakat bu 1992'de işbirliği oluştuğundan beri işin içindeki bilimci, mühendis, teknisyen, destek personeli ve diğerlerinin gerçek sayısının binde biridir. Bu karmaşık sistem ve ona bağlı masraflar, dünyada tek seferde sadece bir adet yüksek enerjili parçacık hızlandırıcı olması anlamına gelir. CERN, LHC'nin toplam bedelinin yaklaşık 4,2 milyar pound olduğunu tahmin ediyor, fakat bu bedel, uzun yıllar içinde pek çok ülke arasında paylaştırılmıştır. Karşılaştırma olsun diye, Londra'nın 2012 Olimpiyat Oyunları'nı gerçekleştirmek için bunun iki katına yakın para harcadığını belirtelim. Dolayısıyla evet, LHC pahalıdır fakat aynı şekilde pek çok büyük proje de öyledir ve LHC yıllar boyunca fizik araştırmalarında ön saflarda olacaktır.

Yine de haklı olarak sık sık bu denli akıl sır ermez derecede küçük ve gündelik hayattan son derece uzakmış gibi görünen şeyleri incelemek için harcanan parayı gerekçelendirmemiz istenir. Ben evren, kökeni, geleceği ve içindeki yerimiz hakkında daha fazla şey öğrenmenin böylesi araştırmalara yatırılan paraya değdiğini düşünüyorum. Fakat yol boyunca icat edilen yan ürün niteliğindeki teknolojiler de şu anda somut

faydalar sağlıyor. Parçacık detektörleri bir süredir röntgenden MR'a ve PET taramasına dek tıbbi görüntülemede sıklıkla kullanılıyor. Parçacık hızlandırıcılar artık aynı şekilde dünyanın dört bir yanında proton terapi merkezlerinde kanser tümörlerini yok etmekte kullanılıyor. Uzmanlaşmış elektronikler ve elbette yeni programlama teknikleri de (internet ve veri toplama şebekesi [*grid computing*]) başka yerlerde uygulanır. Bilimin en çağdaş alanında çalışmak elbette evreni daha derinlemesine kavramayı ve o kavrayışın ifadesi olan fikirlerin sınanmasında kullanılacak teknolojiye sahip olmayı gerektirir. Daha önce defalarca kez bunun gibi temel araştırmalara yatırım yapmanın sayısız fayda sağladığı gösterilmiştir; yalnızca neyin keşfedileceğini veya o faydaların ne noktada geleceğini öngörmek her zaman mümkün değildir.

Dünyanın en güçlü parçacık hızlandırıcısıyla yapılacak şeyler

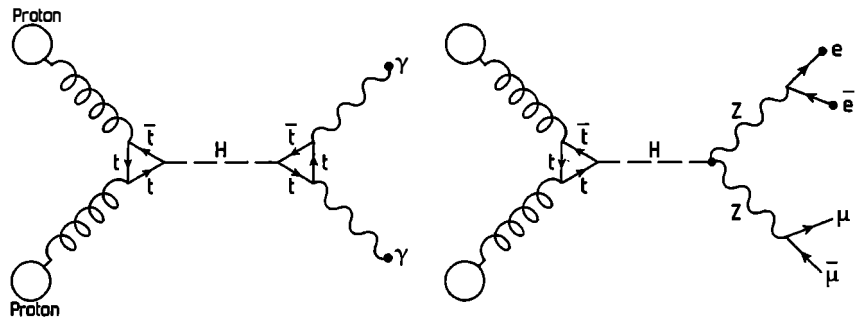
LHC'nin ilk hedeflerinden biri, Higgs bozonunun varlığını keşfetmek (veya onu hepten tablodan çıkarmak), dolayısıyla Standart Model'in merkezindeki elektrozayıf teorisini doğrulamaktı. Modelin geliştirilmesi ile keşif arasında kırk dört yıl olmasının nedeni, LHC gibi bir hızlandırıcı ve ATLAS gibi bir parçacık detektörü inşa etmek için gereken yüksek miktarda teknolojik ilerlemeydi. Bundan sonra arayış başladı.

Son bölümde de gördüğümüz üzere, Higgs bozonu çok tuhaf bir şeydir: Bir alanda meydana gelen ve tüm evreni enerjiyle dolduran bir dalgacıktır. Fakat deneysel açıdan, her şeyi çok daha pragmatik bir açıdan görebiliriz: O bir parçacıktır ve onu LHC'de yapmayı başarabilmemiz gerekir. Onu yapabilirsek, mutlaka ölçebileceğimiz şeylere bozunacaktır. Yalnızca verilerin tümünü inceleyip bu bozunmaların işaretini bulmamız gerekir.

Teori bize kabaca LHC'nin ne sıklıkta bir Higgs bozonu üretebileceğini söylemiştir: Her 10 milyar çarpışmada yaklaşık bir tane. O ender çarpışmayı bulmak, gerçekten de samanlıkta iğne aramaya benziyordu; üstelik bu durumda iğnenin var olup olmadığından bile emin değildik. Bunu bir orana koymak gerekirse, Birleşik Krallık'ta çekilen milli piyangoyu kazanma olasılığı yaklaşık 45 milyonda 1'dir. Her hafta iki çekiliş için de bilet alsam, her 430.000 yılda ortalama bir kez kazanabilirim. Bir Higgs bozonu üretme olasılığı, piyangoyu kazanma olasılığının 1/240'ı kadardır, dolayısıyla protonları sadece haftada iki kez çarpıştırmak işe yaramayacaktır. İşte bu yüzden, LHC bunu her saniyede 40 milyon kez yapar. Üstelik protonları tek tek değil, milyarlarcasını kapsayan öbekler halinde çarpıştırır. Bu, saniyede 1 ila 30'dan fazla çarpışma olabileceği anlamına gelir. Pek çok çarpışma kapsıyor olabilecek bu öbek geçişlerinin her birine bir "olay" deriz. Bu olayların, tüm bu karmaşanın her birinde yaklaşık her 4 dakikada bir bir Higgs bozonu çıkacaktır.

Teori bize aynı zamanda Higgs bozonunun neye bozunacağını da söyler: Kütlesi olan herhangi bir parçacığa bozunacaktır. Bu keşif, iki farklı vakaya bakılarak yapıldı: İlkinde Higgs iki Z bozonuna bozunuyordu, ardından bunlar elektronlar ile antielektronlar veya müonlar ile antimüonlara bozunuyordu; ikincisinde ise Higgs iki fotona bozunuyordu. Aşağıda bu süreçlerin diyagramlarını bulabilirsiniz. Bu arada, eğer kütlesiz fotonun Higgs bozonuyla nasıl etkileşime girebildiğini merak ediyorsanız söyleyelim; bunu bir döngü aracılığıyla yapar:

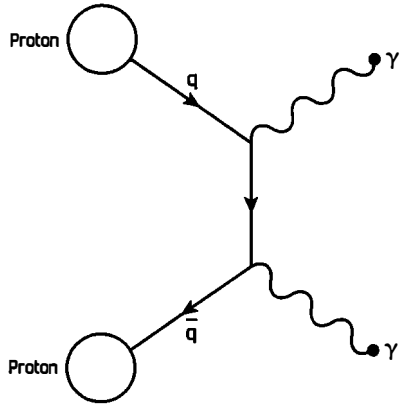
Bu iki farklı bozunum, detektörde iki farklı işaret üretir ve ayrı ayrı avlanır. Arayışın nasıl işlediğinin bir örneği olarak iki fotonlu vakayı kullanacağım. Öncelikle veri elenir ve iki



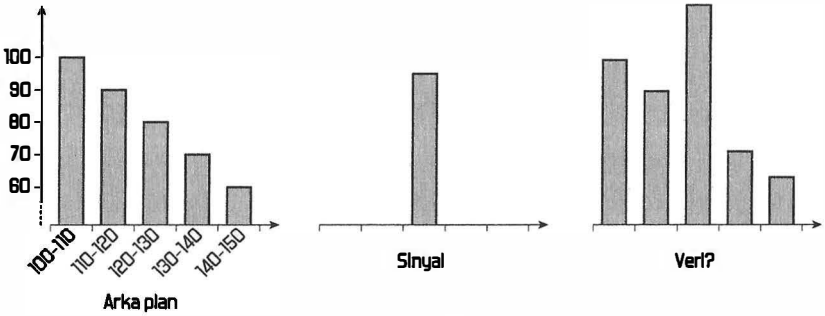
LHC'de Higgs sinyali için Feynman Diyagramı.

foton içeren tüm olgular ayrılır. Çok fazla vardır çünkü iki foton yapmanın birden fazla yolu vardır; örneğin, bir kuark ile bir antikuark birer tane yayar:

Higgs bozonu sinyalini taklit eden bu şeylere arka plan denir. Sinyali arka plandan ayırmak ana görevdir ve burada çok faydalı bir gerçek söz konusudur: Eğer fotonları kesin olarak ölçer ve enerjilerini birleştirirsek, onları meydana getiren şeyin enerjisini ortaya çıkarabiliriz. Arka plan olaylarında, bu protondan çekilen iki kuarkın epey rastlantısal enerjisi olacaktır. Düşük enerjili kuarklar epey sıradandır, yüksek enerjili



İki foton kanalında Higgs sinyalinin ana arka planlarından biri için Feynman Diyagramı.



Arka plan ve sinyalin diyagramdaki görünümü.

kuarklar ise pek öyle değildir fakat hemen her çarpışma farklı olacaktır. Sinyal olaylarında iki foton daima aynı şeye eklenecektir: Higgs bozonunun kütlesine.

Temel araç, "aralık" dediğimiz bir dizi gruptan oluşur. Diyelim beş aralıktan oluşan bir histogramımız var: 100-110 GeV, 110-120 GeV, 120-130 GeV, 130-140 GeV ve 140-150 GeV. Eğer iki fotonlu bir olay bulursak, iki foton enerjilerini eklersek ve 105 GeV alırsak, ilk aralığa bir sayaç ekleriz. Daha sonra iki fotonlu olay gelir: 129 GeV, üçüncü aralıkta bir sayaç. 112 GeV: İkinci aralık ve bu şekilde devam eder. En sonunda yalnızca her aralıktaki sayaçları toplarız. Arka plan, yüksek enerjiden çok düşük enerji vermeye eğilimlidir, dolayısıyla 110-120 GeV olanla başlayarak, her aralıktaki sayaçların dağılımı, şöyle bir şey olabilir: 101, 93, 78, 72 ve son olarak 140-150 GeV aralığında 64. Enerji yükseldikçe her aralıkta daha az sayaç olur.

Higgs Bozonu sinyali, her neyse, tamamen tek bir aralığa toplanmalıydı. Diyelim Higgs bozonunun kütlesi 125 GeV'ydi, bir Higgs bozonunun iki fotona bozunmasını içeren her olay, 120-130 GeV aralığına gidecektir. Sinyal olaylarının sayısı şöyle görünebilir: 0, 0, 42, 0, 0. Veride sinyal ile arka plan olayları yıl boyunca rasgele gelir, dolayısıyla bizim tek gör-

düğümüz birleşik sonuçtur: 101, 93, 120, 72, 64. Orta aralıkta beklediğimizden daha fazlası vardır. Düşen dağılımda bir çıkıntı, bir keşfin açık işaretidir. Ne yazık ki çıkıntılar gerçekte asla bu kadar belirgin değildir! Aynı zamanda teorinin bize söylemediği bir şey daha vardı: Pozitrona bu çıkıntının belireceği noktayı veren, Higgs bozonunun kütlesi.

Çıkıntı avı

LHC'de çalışmak nasıl bir şey? Deneylerimizi yürütmek için her birimize makinede çalışmak için bir zaman aralığı mı veriliyor? Verileri paylaşıyor muyuz? Londra'da yaşarken deneye nasıl katkıda bulunabiliyorum? Bu soruları sık sık duyarım.

LHC'de, her yıl neredeyse altı ay boyunca günde yaklaşık yirmi dört saat parçacıklar çarpıştırılır ve her deney (mevcudu on kişiyi bulmayan) küçük bir ekiple, kontrol odasında yürütülür. Ekip verilerin kaydedilip kaydedilmediğini, detektörde sorun olup olmadığını vs. kontrol eder. Bir şeyler ters giderse diye hazırda birkaç uzman bulunur fakat genellikle tüm işler pürüzsüz yürür. Genellikle günde birkaç kez, LHC'deki proton ışınları doldurulurken, ara verilir. Ayrıca aşağı yukarı bir hafta süren, teknik çalışmalar için verilen daha uzun aralar da vardır. Kış boyunca elektrik LHC'yi çalıştıramayacak kadar pahalıyken, detektörler ile tünelde tamir ve geliştirme çalışmaları yapılır; LHC çalışırken tünele hiç kimsenin girmesine izin verilmez!

Daha sonra, kaydedilen olaylara ilişkin veriler işlenir. En son kalibrasyon ve yeniden kurma teknikleri uygulanır ve (aynı anda meydana gelen pek çok çarpışmayı kapsayabilen) her olayı detektörde meydana gelen bir şeyin resmi yerine, nesneler ile özelliklerinden oluşan bir listeye dönüştürür: 15

dereceli, 45 GeV enerjiye sahip bir elektron, 75 derecede, 218 GeV'lik bir fıskiye, 230 dereceli 14 GeV'lik bir müon vb. gibi. İşlenen tüm olgular daha sonra analiz için deneydeki herkese açılır ve belirli şeyleri ölçmekle ilgilenen gruplar halinde organize oluruz. Verilerin kopyaları dünyanın dört bir yanında işbirliği yapılan üniversite ve enstitülere gönderilir. Analiz daha sonra tamamen bilgisayarlarda yapıldığından, her yerde gerçekleştirilebilir: CERN'den, benim Londra'daki ofisimden, (internet bağlantısı iyi olan) bir sahilden. CERN'de olmanın kesinlikle pek çok avantajı vardır ve ben de düzenli olarak oraya giderim çünkü pek çok kişi orada çalışmaktadır ve kahve arasında bir araya gelip son bilgileri paylaşmak çok daha kolaydır. Fakat her farklı analize, sayıları bir avuç insandan yüz kişiye kadar değişen pek çok kişi katkıda bulunabilir ve bu kişiler dünyanın herhangi bir yerinde yaşıyor olabilirler.

İki fotonlu Higgs araştırması gibi kamuoyunca iyi bilinen bir analizde pek çok kişi çalışıyordu (ben o sırada başka bir analiz üstünde çalışıyordum fakat işlenmiş veriyi dağıtmakta bir katkım oldu). Fakat bu kişiler arkalarına yaslanıp verinin gelmesini beklemediler. Günümüzde deneysel fizikçinin temel görevlerinden biri, detektörü anlamak ve kalibre etmek için yeni ve daha iyi algoritmalar, yığınlarca veriyi ayıklamak, ölçümler ve keşifler yapmak için sinyalin beklenen işaretleri ile arka plan arasındaki ince farklardan faydalanmak için araçlar ve talimatlar tasarlamaktır. Teorik tahminlerin (bir çarpışma sırasında LHC'de olanlarla ilgili kesin hesaplamalar) önemli olduğu nokta da budur. Beklenecek şey için bir öngörü olmadan potansiyel olarak yeni her sinyali izole etmek için bir algoritma geliştirmek çok daha zordur.

Her gün zamanımızın büyük kısmını, temel araştırma ile "veri bilimi"nin kesiştiği bu algoritma geliştirme ve veri analizine ayırırız; biz "büyük veri"yle, bu terim popüler olmadan çok önce uğraşmaktaydık. Bilgisayarların öğrenmesini sağlayan en yeni araçlara varana dek bir dizi basit istatistik tekniği kullanırız, teorik öngörüleri, bilgisayarları olayları sınıflandırmaları ve sinyali arka plandan ayırmaları için eğitmekte kullanırız.

Higgs arayışında, veri hızla işleniyordu ve gösterge çıkıntısı arayışı devamlı güncelleniyordu. Herhangi bir önyargıyı engellemek için bunun gibi tüm arayışlar "karartılır": Potansiyel sinyalin bulunuyor olabileceği bölge, analiz teknikleri son haline getirilene dek veriden çıkarılır. Ancak o zaman "kutuyu açarız" ve içeride bir çıkıntı olup olmadığına bakarız.

Analiz zanaatının bütün numaralarını kullandıktan sonra, iş sayılara gelip çatar: Çıkıntının belirgin olmasına yetecek kadar veri toplanmalıdır. Çarpışmalar kuantum süreçleri olduğundan, Higgs bozonlarının tam olarak ne zaman üretildiğini bilmiyorduk. Bazen şans eseri, arka plan olayları kümelenir ve bir çıkıntıya benzer bir şey üretir. Bu biraz demir parayı yazı tura atıp art arda beş kez tura denk gelmesine benzer. Böyle bir şey olabilir ve demir paranın özel olduğu anlamına gelmez. Devam ederseniz tura ve yazı sayısı dengelenecektir. Daha çok veri toplarsanız bu olası çıkıntılar düzleşecektir.

Biri hariç hepsi. 2011'de veri topladıktan sonra, 125 GeV'lik bir kütledeki olayların kümelenmesinin ipuçlarına rastlandı. İpuçları Higgs bozonunun gözlenmesi muhtemel aralıktaydı fakat bir şey iddia etmeye yetecek kadar önemli değildi. Eski bilim klişesine dönmek gerekirse, daha fazla veriye ihtiyaç vardı. Kış tatilinden sonra bu veri geldi ve hızla analiz edildi.

4 Haziran 2012'ye gelindiğinde hem ATLAS hem de CMS bulduklarını ortaya çıkarmaya hazırdı. CERN'de sabah saat 9'da (İngiltere'de 8, California'da ise gece yarısı!) dünyanın dört bir yanında yayınlanacak bir seminer düzenlendi. İnsanlar içeri girebilmek için geceleyin oditoryumun önünde sabahladı. Benim gibi birçoğu tıka basa dolu odalardan birinde onu video linkinden izledi.

İstatistik, lanet istatistik ve Higgs

Gerçek çıkıntıları sahte olanlardan ayırt etmek, istatistiğin gücünü gerektirir. Öncelikle belirli bir yere kaç olayın düşmesi gerektiğini bilmeliyiz. Burada arka planlardan beklenenler için teorik öngörüler elzemdir; normal sayılacak şeyi bilmiyorsak sıra dışı bir şeyi tespit etmemiz çok daha zorlaşır. Politikacılar veya gazeteciler bağlamı vermeksizin istatistik aktardığında kendimi sık sık bunu düşünürken bulurum. "Yeni bir araştırmaya göre bu ay otuz kişi kalp krizi geçirecek!" Bu fazla mı? Normalde kaç kişi kalp krizi geçiriyor? Bu sayının bir anlam ifade etmesi için ne beklememiz gerektiğini bilmeliyiz.

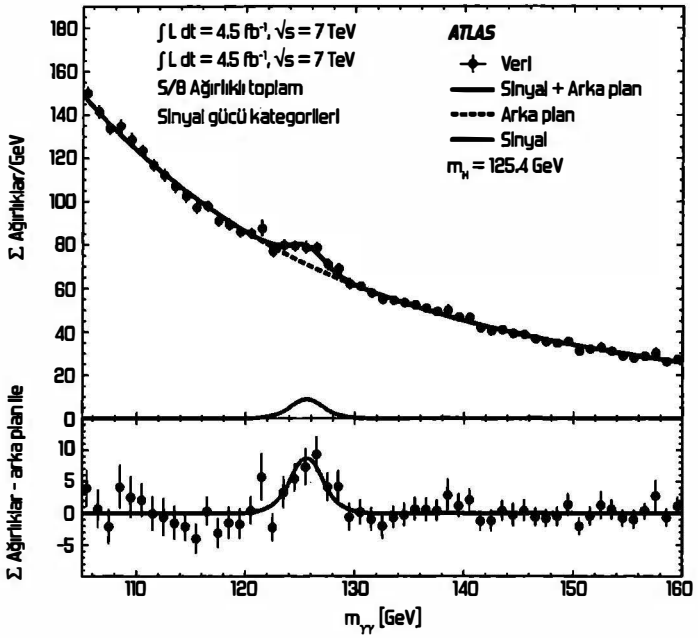
Daha sonra kuantum mekaniğinin rastlantısallığını hesaba katmalıyız. Diyelim verinin bir bölümünü aldık ve daha önce bahsettiğim histogramı yaptık. Her aralıktaki olay sayısı şöyle gelebilir: 101, 93, 86, 72, 64. Verinin bir başka bölümünü alırsak şöyle bir şey çıkabilir: 103, 89, 85, 73, 62. Daima her aralıkta aynı sayıyı ve tam beklediğimiz sayıyı elde etmeyiz. Pek çok veri parçası almak, muhtemelen her defasında biraz daha farklı bir sonuç üretecektir. Sıra dışı bir şey olmuyordur, yalnızca her çarpışma rastlantısaldır. Bir demir parayı 10 kere havaya atarsanız 6 kez tura gelebilir, bunu bir kere daha yaparsanız 3 kez tura gelebilir; bu aynı etkidir. Dolayısıyla her

aralığa bir "istatistiksel belirsizlik" veririz ve bu bir şeyi kolayca biraz daha yüksek veya düşük ölçebileceğimiz, bunun tamamen şansa bağlı olduğu anlamına gelir. Bu belirsizlik, rastlantısallığa bağlı olarak bekleyebileceğimiz değer dağılımının %68'ini örtmek için seçilmiştir ve σ (sigma) simgesiyle gösterilir.

Bir de bu σ'ya eklenen ve mantıklı olarak verinin düşmesini bekleyebileceğimiz olası dağılımı artıran sistematik bir belirsizlik vardır. Bunu değerlendirmek, genellikle her türlü analizin %90'ını alır ve pek çok olası şeyi kapsar. Detektör asla tamamen kusursuzca kalibre edilemez, dolayısıyla ölçülen foton enerjilerinde daima küçük bir belirsizlik vardır. Eğer farklı bir teorik model kullanırsak, algoritmalarımızın kaç tane olgu seçeceğine dair biraz farklı bir öngörümüz olacaktır. Ve bu böyle gidecektir. 4 Haziran 2012 tarihli seminerler hâlâ internette bulunabilir ve bu sistematik belirsizliklerin detaylarını ve çıkıntı avını nasıl etkilediklerini tartışmaya ne kadar çok zaman harcandığını kendiniz de görebilirsiniz.

Son olarak, elimizde beklenen sayıda fon olguları ve veride görülen gerçek olgu sayısı vardır. Eğer bir veya daha fazla aralıktaki gerçek sayı beklenenin 5 σ üstündeyse, yani birleşik istatistiksel ve sistematik belirsizliklerin 5 katıysa, o zaman ilginç bir şey meydana gelmiş demektir. Arka planın rastlantısal olarak bu kadar büyük bir değişim üretebilmesi 3,5 milyonda 1 olasılıktır; bu bir demir paranın art arda 22 kez tura gelmesi gibidir. Dolayısıyla çıkıntının gerçek olduğunu iddia etmek için belirlediğimiz eşik budur.

ATLAS ile CMS deneyleri de 4 Haziran 2012'de bunu duyurdu. Deneyler iki foton içeren ve iki Z bozonu içeren olaylarda Higgs bozonunun işaretini aramakla meşguldü. Ve bu



ATLAS tarafından kaydedilen çarpışmalar arasında
iki fotonlu olaylarda Higgs çıkıntısı.

olguların ikisinde de bir çıkıntı belirdi; üstelik yaklaşık 125 GeV ile aynı kütlede. İki çıkıntı birleştirilerek büyülü 5σ eşiği aşıldı. İki deney şimdiye dek birbirinden bağımsız yürümüştü, dolayısıyla her sonucu bağımsız olarak doğrulayabilirlerdi. İkisinin de aynı kütlede, yani 125 GeV'lik, 5σ'lık bir çıkıntısı vardı. Higgs bozonu en sonunda bulunmuştu ve oditoryum alkışlara boğuldu.

Keşif, Standart Model'i tamamladı. 2013'te LHC iki yıl sürecek geliştirme çalışmaları için kapatıldı. O zamana dek, tedbir olarak gücünün yarısının biraz üstünde (2010-11'de 7 TeV'de, 2012'de ise 8 TeV'de) çalıştırılıyordu: 2008'de LHC ilk olarak açıldığında, süperiletken mıknatıslardan biri fazla ısınmıştı. Mıknatısı soğuk tutan likit helyum buharlaşmış, hızla yayılarak tamiri bir yıl alan ciddi bir hasara neden olmuştu.

2015'te geliştirmeler tamamlandı ve LHC daha önce söylendiği gibi 13 TeV'de çalıştırıldı. Bunu 14 TeV'e çıkarmak mümkün olabilir fakat bu mıknatısların pek çoğunun kullanılmasını gerektirir. Şimdi daha önce erişilmemiş büyüklükte çarpışma enerjilerinden veri elde ediyoruz ve ortaya çıkabilecek şeylerin listesi upuzun. Bunların bazılarından bahsedeceğim ancak şimdi Standart Model'in kendine has sürprizleri olan ve en az bilinen parçasına, yani nötrinoya bir bakalım.

SEKİZİNCİ BÖLÜM

HER NÖTRİNONUN PARLAK BİR DÖNEMİ OLUR

Evrende bir sürü yıldız vardır; sadece bizim galaksimizde 100 milyardan fazla yıldız bulunmaktadır. Bu, akla hayale sığmayan o büyük sayılardan biri olduğundan, onu bir örnekle ele almaya çalışalım. Dünyada yaklaşık 7 milyar insan yaşıyor ve bu insanların her biri her saniye bir yıldız saysaydı, Samanyolu'ndaki her yıldızı toplamak yalnızca iki buçuk dakika alırdı. Fakat bizimki evrendeki milyarlarca galaksiden yalnızca biridir. Saniyede bir yıldız olmak üzere, dünya üzerindeki 7 milyar insanın evrende görünen her yıldızı sayması 40.000 yıl alırdı. Yukarıda gerçekten bir sürü yıldız var.

Yıldızlar diğer her şey gibi atomlardan meydana gelir. Hem de bir sürü atomdan. Bir yağmur damlasında, evrendeki yıldızlar kadar çok atom vardır, bu nedenle saniyede bir yıldız sayarsak, bir yağmur damlasındaki atomları saymak, dünyadaki insanların 40.000 yılını alırdı. Bunu bir bardak sudaki, dünyadaki veya evrendeki atomlara yükseltirseniz... bir sürü elektron, yukarı kuark ve aşağı kuark eder. Evrende gerçekten de afallatıcı sayıda parçacık bulunmaktadır.

Fakat tüm evrendeki tüm kuark ve elektronlardan daha bile bol bulunan bir fermiyon vardır: nötrino. Parçacıkların en esrarengizi olan nötrino, halihazırda Standart Model'deki ilk çatlakları ortaya çıkarmıştır ve fizikteki pek çok cevapsız sorunun anahtarını elinde tutuyor olabilir. Ve nötrino hakkında daha fazla şey öğrenmek, LHC'yi çok geride bırakmak anlamına gelir.

Her yerde nötrino var

Nötrino 1930'da Wolfgang Pauli tarafından beta bozunumunda salınan enerjiyi dengelemenin bir yolu olarak tahayyül edildi fakat Pauli "küçük nötr olan"ın gerçekten de ölçülebileceğini düşünmüyordu. Pauli'nin çağdaşlarından bazıları şüphelerini bir adım öteye götürüp bu kadar tuhaf, tespit edilemez bir parçacığın gerçek olabilmesinin imkânsız olduğunu düşündüler.

Nötrinoları ölçmeyi bu kadar zorlaştıran, elektrik yükü taşımamaları, dolayısıyla elektromanyetik kuvveti hissetmemeleridir: etrafımızdaki dünyayla etkileşim kurarken kullandığımız ve çeşitli biçimlerde her parçacık detektörü tarafından kullanılan kuvvet. Başka bir tabirle biz ve her parçacık detektörü nötrinoya karşı kördür. Nötrinolar yalnızca zayıf kuvvet aracılığıyla etkileşim kurar, bu da zar zor etkileşimde bulundukları anlamına gelir fakat zayıf kuvvet pek çok başka parçacığın bozunumu için elzem olduğundan nötrinolar yine de büyük sayılarda üretilir.

Bunun Büyük Patlama'dan sonraki saniyenin ilk anında meydana geldiğini biliyoruz. Yüksek enerjide birbirine çarpan parçacıklar ağır tau leptonlar, W ve Z bozonları, üst kuarklar ve Higgs bozonları oluşturmuştur. Çok yoğun olan erken evrende bu parçacıklardan bazıları hızla antiparçacık

eşleriyle buluşarak bir bozona dönüşmüş olmalıdır. Saniyenin ilk anından sonra geri kalanı bozunacaktır. Ve bir W bozonu içeren her bozunmada o W tıpkı bir müon gibi bir yüklü leptona ve onun nötrino eşine bozunabilir. Büyük Patlama'da trilyonlarca nötrino üretildi ve şimdi evrende süzülüyorlar.

Bugün başka bir nötrino kaynağı var ve Büyük Patlama'yla hiçbir ilgisi yok. Evren genişleyip soğuduğunda hayatta kalan proton ve elektronlar en temel atomdan, hidrojenden meydana gelmeye başladılar. Milyonlarca yıl boyunca pek fazla şey olmadı fakat kütleçekimi yavaş yavaş işlemeye başlamıştı. Hidrojen bulutlar halinde toplanmaya, o bulutların içinde de yoğun yığınlar halinde toplanmaya başladı. Bu yığınlar gitgide daha yoğun hale gelince bir ateş topuna dönüştü: Büyük Patlama'dan aşağı yukarı 100 milyon yıl sonra ilk yıldızlar oluştu.

Yıldızlar devasa nükleer füzyon reaktörleridir. Bir yıldızın içindeki yerçekimi kuvveti protonları parçalayarak aralarındaki elektromanyetik geri tepmeyi bastırır. Bunu öyle yakın yapar ki, güçlü kuvvet ipleri eline alır ve onları birbirine bağlayarak yeni bir atom çekirdeği meydana getirir ve aynı anda enerji salar. Jüpiter yaklaşık 10 kat daha büyük olsaydı, o da protonları eritmeye başlardı ve güneş sistemimizde iki yıldızımız olurdu. Bu devasa yerçekimi kuvvetleri olmadan burada, Dünya'da füzyona erişecek teknolojiyi geliştirebilseydik, bize neredeyse sınırsız, çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağı sağlardı. Şimdiye dek, bunun başarıldığına dair birtakım asılsız iddialar ortaya atıldı fakat artık Fransa merkezli ITER (Uluslararası Termonükleer Deneysel Reaktör) gibi büyük uluslararası işbirliklerinin en sonunda füzyon gücünü gerçeğe dönüştürme yolunda olduğu sanılıyor.

Füzyonun ilk sonucu iki pozitif yüklü proton içeren yeni bir çekirdektir ve iki pozitif yüklü parçacık birbirini itecektir. Dolayısıyla bu çekirdek, o protonlardan biri bir beta bozunumdan geçerek bir nötrona dönüştüğünde ve bir antielektron ile elektron nötrino formunda biraz daha enerji saldığında daha kararlı hale gelir. Füzyon devam ederek helyum çekirdeklerine (2 proton, 2 nötron), sonra lityuma (3 proton, 5 nötron), ta demire dek (26 proton, 30 nötron) büyür ve bu sırada daha fazla enerji ile nötrino salar. Dolayısıyla nötrinolar her yönde ve büyük sayılarda yıldızlardan taşar. Biz Güneş'ten 50 milyon kilometre uzakta olsak da, her insanın içinden saniyede yaklaşık 10 trilyon füzyon nötrinosu geçer. Bir yıldız patlar, süpernova olayı olursa, hızla son dakika füzyonu meydana gelir ve demirden bile ağır elementlerin çekirdeklerini üreterek onları en sonunda Dünya benzeri gezegenler oluşturacakları galaksiye saçar. Süpernovalar gece göğündeki en parlak şeylerden biridir ve yıldızın içinde yaşadığı tüm galaksiden daha parlak bir ışık flaşı üretir. Fakat o flaşta ne kadar enerji bulunursa bulunsun (ki çok fazla enerji vardır) her süpernovadan son nötrino akınında onun yaklaşık 100 katı enerji salınır.

Her ne kadar tespit etmesi zor ve aldatıcı olsa da, nötrinolar aslında her yerdedir. Etkileşimleri ve davranışları evrenin meydana gelişinde ve evrim sürecinde büyük role sahiptir. Standart Model atomaltı dünyayı tanımlamakta başarılı olduğunu kanıtladığından, bu tuhaf parçacıklar hakkında daha fazla şey öğrenmek gitgide daha önemli hale gelmiştir.

Nötrino bilgisi

Önce Standart Model'de nötrinolarla ilgili bilinenlere bakalım. Nötrinolar yüklü leptonların her biri için bir tane olmak

üzere üç çeşitte gelir çünkü leptonlar elektron, müon ve taunun zayıf kuvvetli eşidir. Nötrinolar elektrik yükü veya renk yükü taşımadıklarından yalnızca W ve Z bozonuyla etkileşime girerler. Aynı zamanda herhangi bir fermiyondan çok daha hafiftirler ve Standart Model'de tamamen kütlesiz olmaları gerekir. Parçacık fiziğindeki pek çok şey gibi, bu bir başka simetriye, pariteye bağlıdır.

Yedinci Bölüm'deki tartışmaya dönecek olursak, bir şey ancak bir dönüşüm tarafından değiştirilmemişse simetriktir ve parite dönüşümü, sadece bir aynadaki yansımadır. Pek çok şey, aynadaki görüntüsüyle aynı görünür: Daire gibi basit şekiller ve futbol topu, gökdelen vb. her gün gördüğümüz nesneler. Aynı zamanda öyle olmayan da bir sürü şey vardır ve tam gözümüzün önünde böyle bir örnek vardır: sol ve sağ ellerimiz birbirinin ayna görüntüsüdür. Parçacık fiziğinde ayna görüntüsü simetrisi, Yunanca "el" sözcüğünden gelen "kiralite"dir. Ellerimiz iki "kiral durum" içindedir (sol ve sağ) ve bir yansıma veya parite dönüşümü, birinin diğerine benzemesini sağlar.

Parçacıkların son derece küçük olduğu düşünülürse, yansımanın bir önemi olmazmış gibi gelebilir: Son derece küçük bir noktanın ayna görüntüsü, hâlâ son derece küçük bir noktadır. Fakat parçacıkların henüz ortaya çıkmayan bir özelliği daha vardır: Spin. Her ne kadar son derece küçük noktalar gibi görünseler de, temel parçacıklar aynı zamanda spin atıyormuş yani kendi eksenleri etrafında dönüyormuş gibi davranırlar. Onları fırıl fırıl dönen son derece küçük topaçlar olarak düşünebiliriz. Wolfgang Pauli bu fikri 1924'te ortaya attı, sonra 1928'de Dirac denklemi keşfetti ve bu doğal olarak spini de kapsıyordu ($i\gamma.\partial$ kısmında bulunmaktadır) ve onun her fermiyonun yapısal özelliği olduğunu gösteri-

yordu. Bozonlar, bildiğimiz spin atmayan tek temel parçacık olan Higgs bozonu dışında, fermiyonların iki katı hızlı spin atar.

Spinin bir yönü olur. Sağ elinizi el sıkışacakmış gibi uzatıp parmaklarınızı kıvırarak yumruk yapın. Başparmağınızı bir saatin merkezi olarak hayal ederseniz, parmaklarınız başparmağınız etrafında saat yönünün aksine hareket eder. Bunu sol elinizle tekrarladığınızda parmaklarınız saat yönünde hareket eder. Tüm saatler aslında "solak"tır: Kollar saat yönünde döner. Şimdi bir parçacığa baktığımızı hayal edelim. Parçacık bize doğru hareket ediyorsa ve saat yönünde spin atıyorsa "solak"tır, saat yönünün aksine spin atıyorsa "sağlak"tır. Bu iki spin yönü, bir parite dönüşümüyle ilgilidir. Bir aynada normal bir "solak" saate bakarsanız, ayna görüntüsündeki kollar saat yönünün tersine hareket eder; yani "sağlak" olur.

Elektromanyetik kuvvet ve güçlü kuvvet için bu çok önemli değildir çünkü fotonlar ve gluonlar iki yönde de spin atan fermiyonlarla etkileşir. Zayıf kuvvet farklıdır çünkü W bozonları ancak solak parçacıklarla etkileşim kuracaktır. Higgs bozonu da farklıdır: Fermiyonlara kütle veren Higgs alanında devamlı sürüklenme, aynı zamanda solak ve sağlak arasında gidip gelerek devamlı evre değiştirmelerine neden olur. Güçlü ve elektromanyetik kuvvetler parçacıkları dostane bir sarılmayla karşılar, zayıf kuvvet kısa bir el sıkışma için sol elini uzatır ve Higgs alanı onları kucağına alıp döndüren neşeli amcadır.

Zayıf kuvvetin solak ve sağlak parçacıklar arasında neden ayrım yapması gerektiğini tam olarak bilmiyoruz; gerçi muhtemelen bunun mantıklı cevabı, sadece bunu yapabilmesidir. Kiral simetri zayıf kuvvette ortaya çıkar. Bunu Standart Mo-

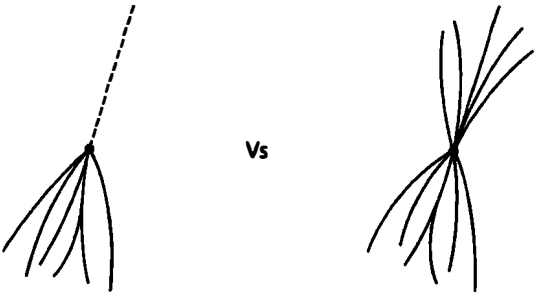
del'de çok iyi betimleyebiliriz fakat henüz neden orada olduğuna dair derin bir açıklamaya sahip değiliz.

Nötrinolara gelince, bu ilginç bir duruma yol açar. Nötrinolar yalnızca sadece solak parçacıkları gören zayıf kuvvetle etkileşir. Bir parçacık Higgs alanıyla etkileşmek ve kütle kazanmak için iki ele de sahip olmalıdır fakat nötrino öyle hafiftir ki, bunu yapmıyormuş gibi görünür. Tüm bunların bir açıklaması, sağlak nötrino olmaması olabilir ve Standart Model işte böyle inşa edilmiştir: Nötrinolar kütlesizdir ve yalnızca tek bir yönde spin atar.

Nötrinoları bulmak

Yeniden söylemeye değer: Nötrinoları ölçmek gerçekten çok zordur. Görünüşe bakılırsa kütleleri yoktur, bu da ışık hızında yolculuk ettikleri, çok nadiren etkileştikleri ve her türlü maddenin içinden ona hiç dokunmadan geçtikleri anlamına gelir. Fakat bir parçacık tespit etmek ve özelliklerini öğrenmek için etkileşmek, bir şeye çarpmak zorundadır. Nötrinoların ne sıklıkta etkileştiklerini (bu pek sık olan bir şey değildir), dolayısıyla bir detektörün şansının yaver gitmesi ve kendisine bir nötrino çarpması için ne kadar büyük olması gerekeceğini bulmak mümkündür. Bu detektör, bir ışık yılından uzun olmalıdır. Başka bir ifadeyle, bir nötrinoyu detektörümüze ateşlesek, bu detektörün onu tespit etmek için %50 şansı olacaksa, en yakın yıldız olan Alfa Centauri'ye olan mesafenin çeyreği uzunluğunda olması gerekirdi.

Bu, nötrinoları tespit etmenin inanılmayacak kadar zor olduğunu söylemenin bir başka yoludur. Nötrinolar LHC'de daha ağır bir parçacığın bozunmasıyla üretildiklerinde, çarpışma sonucunda fark edilmeksizin uçuverirler. Fakat bu yine de karakteristik bir işaret verir çünkü çarpışmalar genellikle

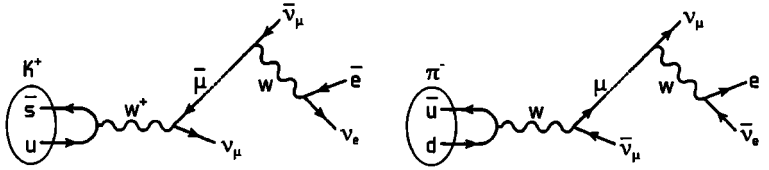


Tespit edilmemiş bir nötrino (kesik çizgilerle gösterilliyor) üreten bir çarpışmadan çıkan parçacıklar ile bir nötrino üretmeyen bir çarpışmadan çıkan parçacıkların karşılaştırılması.

dengelidir: Momentumun korunumu bize bazı parçacıklar bir yönde gittiğinde, zıt yönde giden eşit momentumlu bir veya daha fazla parçacık olması gerektiğini söyler. Nötrino "kayıp enerji" olarak belirir. Çünkü nötrinoyu ölçemiyorsak, bir çarpışma dengesiz görünecektir. Diğer her şeyi ölçerek nötrinonun ne kadar enerjiye sahip olduğunu, hangi yöne seyahat ettiğini ve daha sonra nasıl üretilmiş olabileceğini neredeyse kesin olarak hesaplayabiliriz.

Gelgelelim, kayıp enerji nötrinonun kendisiyle ilgili pek bir şey söylemez, örneğin üç olası türden (elektron, müon veya tau) hangisi olabileceğini veya nasıl davranabileceğini bize anlatmaz. Nötrinoları gerçekten incelemek için onları hareket halinde yakalamamız gerekir ve bu kesinlikle sayılarla yapılacak bir iştir. Tek bir nötrinoyu ölçmeye çalışmak için ışık yılları uzunluğunda bir detektör inşa etmek yerine, etrafımızda daima trilyonlarca nötrino olduğu gerçeğine yaslanırız ve arada bir trilyonlarcasından yalnızca biri ölçebileceğimiz bir şey yapacaktır.

Dolayısıyla nötrinolarla ilgili bir şey öğrenmek için onları yeterli sayılar halinde üreten dört ana fabrika vardır ve bize incelememiz için dört tür nötrino verir:



Bir kaon ve pion'un bozunması. Müon bozunmadan önce kilometrelerce yol alabilir.

1) Güneş nötrinoları: En bereketli kaynak olan bu nötrinolar, Güneş'in kalbinde meydana gelen nükleer füzyon süreçlerinin ürettiği elektron nötrinolardır.
2) Reaktör nötrinoları: Nükleer santraller, nükleer fisyonda, büyük kararsız atom çekirdeklerinin parçalanmasıyla üretilen enerjiyle çalışır. Genellikle Güneş'teki füzyonun tersidir ve elektron antinötrinolar üretir. Nötrinolar ilk kez Cowan ve Reines'in Güney Carolina'da bir reaktörün yanında bulunan 1956 tarihli deneyinde keşfedilmiştir. Saatte yaklaşık 3 nötrino tespit etmeyi başarmışlardır (o sırada 10^{21} adetten fazlası detektörden uçarak geçmiştir).
3) Atmosfer nötrinoları: Yüksek enerjili bir kozmik ışın Dünya'nın atmosferine çarptığında bir parçacık yağmuru oluşur. Bu reaksiyonlar, Güneş'teki nükleer süreçlerden çok daha yüksek enerjide meydana gelir ve yüklü pionlar ile kaonların zayıf bozunumunda bol bol ağır müon üretilir. Bunun sonucu genellikle müon nötrinolar ve biraz elektron nötrinolardır.
4) Hızlandırıcı nötrinoları: LHC'den bir ışın gibi, hızlandırılmış bir proton ışını alıp onu katı bir hedefin içine ateşlemek, bir kozmik ışın çarpışmasına benzer. Pionlar ve kaonlar üretilir, onlar daha sonra müonlara ve bir sürü nötrinoya bozunur. Avantaj, hem yön hem de enerji üzerinde kontrolü olan yoğuşuk bir ışın üretme-

nin hâlâ mümkün olmasıdır. Ayrıca hedefe daha yüksek enerjili bir proton ışını ateşleyerek tau nötrinolar üretmek, taulara (ve onlara eşlik eden nötrinoya) bozunabilen daha ağır parçacıklar yapmak da mümkündür. Tau nötrinolar, en sonunda 2000'de ABD'deki Fermilab'deki DoNuT Hızlandırıcısı Nötrino Deneyi'nde gözlemlenmiştir.

Herkesin en sevdiği nötrino hikâyesinde de hızlandırıcı nötrinoları başroldedir. Kısa bir süreliğine nötrinolar ışık hızından daha hızlı giderek evrendeki en temel kurallardan birini kırıyormuş gibi görünmüştür. Böyle bir şey, Einstein'ın 1905 tarihli Özel Görelilik Kuramı'ndan beri imkânsız görünüyordu. CERN'deki bir parçacık hızlandırıcı kullanılarak, nötrinolardan oluşan bir ışın üretildi ve bu ışın doğruca, İtalya'da Alplerin altında ve güneyinde 730 kilometre mesafedeki bir yeraltı laboratuvarına gönderildi; burada OPERA Deneyi (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus - Emülsiyon İzleme Aparatı Salınım Projesi) onları tespit edecekti. Işık hızındaki bu seyahat, onlar için saniyenin 2 milyonda biri kadar sürmeliydi fakat nötrinolar yaklaşık saniyenin 60 milyarda biri kadar erken ulaşıyordu. Bu şayet doğruysa, modern fiziğin temellerinden birini sarsacak ciddi bir devrim niteliği taşırdı.

OPERA Deneyi'yle bir bağlantım yok fakat benim dahil olduğum kimi deneylerde de anormal sonuçlar ortaya çıktığı olmuştur. Böyle sıra dışı bir şey meydana geldiğinde, deneyciler sonucu kamuoyuna açıklamadan çok önce onu fark ederler. İlk varsayım, bir sistematik belirsizlik kaynağının analizde gözden kaçırıldığıydı. Kalibrasyonda, hatta belki

modellemede bir hata vardı; bu hata herhangi bir yerde olabileceği için sayısız kontrol yapıldı. Fakat olası tüm kaynaklar elendikten sonra ne yapmak gerekirdi? Sevmediğiniz bir sonucu bir kenara atmak bilimsel yönteme aykırıdır ve ayrıca sonucu kamuoyuna açmak, daha fazla incelemeye ve sorunun nerede olabileceğine dair daha fazla fikre açık olmak demektir. Ve işte OPERA da bunu yaptı. Sunulan sonuçlara baktığımda, onları devrimci bir yeni fizik iddiası değil, daha olağan bir açıklaması olması gereken tuhaf bir sonuç olarak gördüm. Ve sonunda zaten buydu: Ekipmanı gereken kesinlik seviyesine senkronize ve kalibre etmek son derece zordur ve cevaba bir yıl içinde ulaşılmıştır. Meğer sorun, küçücük bir zamanlama hatasıymış. Nötrinolar tuhaf olabilirler ama o kadar da değil!

Nötrinoların sorunları

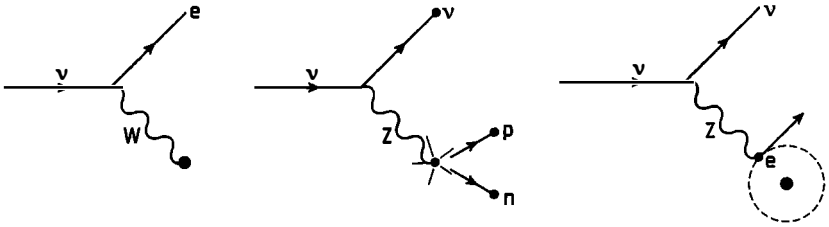
Bir kaynak bulunca halletmeniz gereken bir sonraki iş nötrinoları ölçmektir. Sizin bunu yapabilmeniz için de onların bir şeyle etkileşmesi gerekir.

O halde problem, tespit edilebilecek olayların az sayıda olmasıdır. Tatmin edici sayıda etkileşim elde etmek için detektörlerin devasa olmaları gerekir. İlk nötrino detektörlerinin en meşhuru, birincil bilimcinin ismini alan "Ray Davis Deneyi"dir. Bu deney, 6 metre genişlikte ve 15 metre uzunlukta, yaklaşık 800 ton (epey klor içeren) kuru temizleme sıvısıyla dolu devasa bir silindirik tankta gerçekleştirildi. Fikir, W etkileşiminden geçen güneş elektron nötrinoları tespit etmekti. Bir nötrinonun yaydığı W, bir klor atomunun çekirdeğine emilir ve bir protona dönüştürülür. Bu, 17 proton içeren klor atomunu, 18 proton içeren argona dönüştürür. Argon soy gazdır, dolayısıyla tankın tepesine süzülür.

Her saniye trilyonlarca nötrino saçan bu devasa tankta bile, bir günde üretilen argon atomu sayısı ikiyi bulmaz. Sayı çok küçük olduğundan, deneyin yanlış sinyaller üretebilecek bir arka plan radyasyonundan ve kozmik ışınlardan korunması gerekiyordu, böylece deney düzeneği yerin 1,5 kilometre altına, Homestake, Güney Dakota'daki eski bir altın madenine kuruldu. Her birkaç haftada bir, üretilen azıcık argon toplanarak, o süreçte meydana gelen nötrino etkileşimlerinin sayısı hesaplanabildi.

Deney 1970'ten 1994'e dek sürdü ve bir madenin dibinde kuru temizleme sıvısıyla dolu devasa bir tank her ne kadar LHC'deki parçacık fiziği deneyinden çok farklı olsa da, bu deney LHC'nin yapamadığı bir şeyi başardı: elektron nötrino etkileşim oranlarının kesin ölçümlerini sundu. Bunlar öylesine kesindi ki, beklenmedik bir sonuç ortaya koydu: Güneş'le ilgili bildiğimiz her şey düşünüldüğünde, çok fazla nötrino tespit edilmiş olmalıydı. Bunların yaklaşık üçte biri kayıptı. Bu, Güneş Nötrinosu Problemi olarak bilinmektedir ve deney üzerinde gerçekleştirilen bir sürü kontrolden sonra, ya bizim Güneş'in çalışma biçimini kavrayışımızda ya da nötrinoların davranışlarında çok büyük bir sorun olduğu neticesine varıldı.

Bu problemi çözmek için, bu kez Sudbury, Kanada'da eski bir nikel madeninde bir deney daha yapmak gerekti: 1999 ila 2006'da işletilen ve 1000 ton arıtılmış "ağır su" (çekirdeği sadece tek bir proton yerine bir proton ile bir nötrondan oluşan bir hidrojen izotopu olan döteryumdan yüksek seviyede ihtiva eden su, H_2O) içeren Sudbury Nötrino Gözlemevi'nin (Sudbury Neutrino Observatory, SNO) iki temel avantajı vardı: Haftalar boyunca sonuçları biriktirmek yerine tek başına nötrino etkileşimlerini gerçek zamanlı tespit edebiliyordu ve bir $\dot{W}$ veya Z içeren nötrino etkileşimlerine karşı hassastı. W



SNO detektöründe üç farklı nötrino etkileşimi.

etkileşimlerinde, bir elektron nötrino bir elektrona dönüşür; W daha sonra detektör tarafından emilir. Z etkileşimleri her türden nötrinonun yakındaki bir atomdan elektronları çıkarmalarına veya bir döteryum çekirdeğini parçalayıp bir proton ve nötrona ayırmalarına izin verir. O halde iki sinyal vardır: Nötron bir başka çekirdek tarafından yakalandığında üretilen gama ışınları ile başıboş elektronlar.

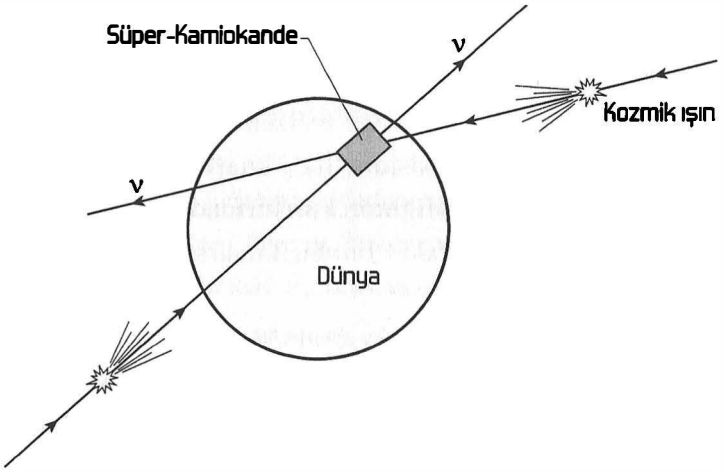
Gama ışınlarını detektörden çıkarken tespit etmek kolaydır. Tek elektronlar o kadar uzağa gidemediklerinden ve onları devasa bir su tankından çıkarmak imkânsız olduğundan, Cherenkov radyasyonuyla ölçüldüler. Kâşifi Pavel Cherenkov'un soyadını alan Cherenkov radyasyonu suda bir pruva dalgasının veya havada ses patlamasının elektromanyetik dengidir. Işık her maddenin içinden geçerken boş uzayda olduğundan biraz daha yavaş seyahat eder. Bir bardak sudaki bir pipete baktığınızda pipet sıvıya girdiği noktada bükülmüş gibi durur. Bu havaya göre suda yavaşlayan ışığın yön değiştirmesinin oluşturduğu bir optik illüzyondur. Bir boşlukta ışık hızına (evrendeki gerçek hız sınırı) çok yakın seyahat eden yüksek enerjili parçacıklar, SNO'daki sıvı detektör gibi bir maddede ışıktan hızlı seyahat edebilir. Bu meydana geldiğinde tipik olarak mavi bir ışık olan Cherenkov radyasyonu üretilir; tıpkı havada sesten hızlı hareket eden bir uçağın bir ses patlaması oluşturması gibi. Işık detektörleri (foto çoğaltıcı

tüpler, yani PMT'ler) hem gama ışınlarını hem de Cherenkov radyasyonunu aldığından, aynı zamanda nötrinoları da tespit ederler.

Z'ler saçan herhangi bir türdeki (elektron, müon veya tau nötrino) belirli sayıda nötrinoyu elektron nötrino W etkileşiminden ayırt eden SNO, problemi buldu: Güneş yalnızca elektron nötrinolar yaymalıydı fakat bunlar dünyaya ulaştığında 2/3 elektron nötrinolar ile 1/3 diğer türlerden (müon ve tau nötrinolar) oluştukları anlaşıldı. Müon veya tau nötrinolar W etkileşimleri üzerinden alınmıyordu çünkü daha ağır yüklü eşlerine dönüşme enerjileri yoktu. Bu sonuç, nötrinoların seyahat ederken ve hiçbir şeyle etkileşmeden tür değiştirdiği anlamına geliyordu. Standart Model'deki başka hiçbir parçacık bunu yapamaz ve bunun olmasına izin veren elektromanyetik, güçlü veya zayıf kuvvet için de hiçbir etkileşim, hiçbir Feynman Diyagramı çizemezsiniz.

Bu sırada, Japonya'da bir başka devasa su detektörü atmosfer nötrinolarıyla, yani kozmik ışınların ürettiği müon nötrinolarla ilgili bir başka problem buldu. Atmosfer nötrinoları genellikle güneş nötrinolarından daha yüksek enerjili ve daha az olduğu için çok daha büyük bir tanka ihtiyaç vardı. 3000 tonluk Kamiokande detektörü 1987'de tamamlandı ve onu 1996'da, kabaca 40 metre genişliğinde, 40 metre yüksekliğinde, 50.000 ton arıtılmış su dolu, SNO'nun kütlesinin 50 katı olan devasa Süper-Kamiokande izledi. İnternette Süper-Kamiokande'nin inşaatı ve işletilmesini gösteren ve bilimcilerden oluşan ekibi küçük bir şişme botun içinde, yavaş yavaş dolan tankın kenarından PMT'leri temizlerken gösteren müthiş fotoğraflar bulunmaktadır.

Fakat bu devasa tankta bile etkileşimler hâlâ çok nadirdir. Çoğu nötrino hiçbir şey yapmadan Dünya'dan öylece uçup



Süper-Kamiokande her yönden gelen kozmik ışınlarda bulunan nötrinoları tespit edebilir. (Çizim, tabii ki, ölçekli değil!)

geçerek uzaya çıkar. Aynı zamanda kozmik ışınlar Dünya'ya her yönden çarptığı için, atmosfer nötrinoları da her yönden geliyordu: Kozmik ışınlar Japonya'nın tepesinde atmosfere çarptıysa dimdik aşağı iniyor ve başka ışınlar diğer açılardan da ulaşıyordu. Farklı yönlerden nötrinoları karşılaştırarak başka bir sorun bulundu: Aşağıya inen nötrinoların oranı beklenene yakındı fakat yukarı çıkanların oranı çok düşüktü. Bu atmosfer nötrinosu problemidir ve daha sonraki deneyler nötrinoların hâlâ orada olduklarını fakat müon nötrinolardan başka bir türe dönüştüklerini göstermeyi başarmıştır.

Güneş ve atmosfer nötrinosu problemleri bize nötrinoların gerçekten de uçuşlarının ortasında tür değiştirdiğini söyler ve bu Standart Model'de yasaktır. Bu keşif, hayaletimsi nötrinoları kavrayışımızda öyle önemlidir ki, 2015 Nobel Fizik Ödülü, SNO'dan Arthur B. McDonald ile Süper-Kamiokande deneyinden Takaaki Kajita'ya verilmiştir. Bu bazen Standart Model'in ötesindeki fiziğin ilk işareti olarak görülmüştür çünkü bize nötrinoların kütlesi olması gerektiğini söyler.

Tür değiştiren nötrinolar meselesinin çözümü, daha önceki sayfalarda karşımıza çıkan üç malzemeyi gerektiren epey incelikli bir kuantum etkisidir. İlki, kuarklarla ilgili olarak Beşinci Bölüm'de değindiğimiz karıştırmadır: Kuarklar çiftler halinde düzenlenir fakat bunlar kusursuzca zayıf yüklü çiftlere denk gelmezler. Bu da demek oluyor ki, bir W bozonu farklı çiftlerden kuarkları karıştırabilir ve örneğin bir tılsım kuarkını bir aşağı kuarka dönüştürebilir. Daha önce bunun leptonlarda olmadığını yazmıştım. Nötrinolar kütlesizse bu doğrudur. Fakat eğer nötrinoların kütlesi varsa, karıştırma imkânsızdır.

İkinci malzeme parçacıkların hareket etme biçimlerine bağlıdır ve Altıncı Bölüm'de açıklandığı üzere, bu parçacık seyahat ederken dönen bir kolu olan bazı hayali adımsayarlar içerir. Daha önce açıklamadığım bir kısım var ve burada ondan bahsetmek gerekiyor: Bir adımsayarın kollarının hızı, esasen parçacığın kütlesine bağlıdır. Ağır parçacıklar için adımsayar, aynı mesafede seyahat eden daha hafif bir parçacığa göre daha hızlı döner.

Son malzeme, İkinci Bölüm'e dönmemizi gerektiriyor: Biz bir parçacığı ölçmediğimiz sırada o her şeyi yapar. Bir nötrino için, zayıf bir etkileşimi bir "ölçüm" olarak görebiliriz çünkü bu etkileşimleri tespit edebiliriz. Dolayısıyla, bir nötrino W ile Z bozonları yaydığı dönemler arasında her şeyi aynı anda yapmaktadır.

Bu malzemeleri birleştirin ve kayıp nötrino problemini çözün. Örneğin, bir proton bir nötrona dönüşürken üretilen ve bir W bozonu yayan bir güneş nötrinosunu ele alalım. W, bir antielektron ile bir nötrinoya bozunur: Bu ilk ölçümdür. Leptonlar aslında karıştırabildiğinden, bu nötrino esasen bir

elektron nötrino olmak zorunda değildir; bir müon nötrino veya bir tau nötrino olabilir. Biz nötrinoyu doğrudan ölçmediğimiz için, tüm bu olasılıkların hepsini aynı anda göz önünde bulundurmalıyız.

Nötrino şimdi Dünya'ya doğru uçuyor. Bunu yaparken, hayali adımsayarlar çalışıyor. Fakat mümkün olan üç nötrinoyu birden göz önünde bulundurmamız gerektiğinden, bunu üç kollu bir adımsayar olarak hayal edebiliriz ve böylece üç kol farklı hızlarda hareket eder.

Bunu dairesel bir pistte yarışan üç araba gibi düşünebilirsiniz. Arabaların isimlerinin "e", "mü" ve "tau" olduğunu düşünelim. Yarışın başında arabalar birbiri ardına dizilmiştir. Fakat biraz kısmen farklı hızlarda ilerliyorlardır ve "tau" arabası yavaşça diğerlerinin önüne geçiyordur. Yarışın ilerleyen kısmında arabalar karışabilir, "yau" arabası diğerlerine yaklaşabilir ve bir süre pistte onların gerisinde kalabilir, derken en sonunda atak yaparak tekrar öne geçebilir.

Şimdi, yarışın farklı noktalarında şöyle sorabiliriz: Başlangıç çizgisini geçecek bir sonraki araba hangisidir? Yarışın başında, bu "e" arabası olacaktır. Yarışın ilerleyen kısmında, "tau" arabası öne geçmiş olacaktır. Daha sonra ise pistte onların gerisinde görünen "tau" arabası onlara yetişecektir ve "e" ile "mü" arabalarının ondan sonra çizgiyi aşmaları daha büyük olasılıktır. Başka bir tabirle, arabalar daha çok mesafe kat ettikçe, pistte gitgide daha çok tur tamamladıkça ve birbirlerine göre pozisyon değiştirdikçe, cevabımız da değişir.

Bu analojide hangi arabanın başlangıç çizgisini geçen bir sonraki araba olacağını sormak, bir nötrinonun bir sonraki ölçümde nasıl davranacağını sormakla aynıdır: Bir W yayarak bir elektrona, müona veya tauya dönüşecektir. Yarışın başında bir elektron nötrinomuz vardır: "e" arabası diğerle-

rinin önündedir, böylece çizgiyi ilk o geçer. Fakat arabalar farklı hızlarda seyahat ettiğinden, pistteki arabalar sıralamayı değiştirir; nötrinolar belirli bir mesafe kat ettikten sonra tür değiştirir. Bir elektron nötrino olarak başlayan şey, bir müon nötrinoya dönüşebilir. Güneş ve atmosfer nötrinolarında, aslında diğer tüm nötrinolara da olan şey budur: Seyahat ederken bir türden diğerine "salınırlar."

Tüm bunların işlemesi için, Standart Model'e pek çok yeni bilgi parçası eklememiz gerekir. Öncelikle, üç arabanın farklı hızlarına denk gelen üç farklı nötrino kütlesi vardır. Eğer üç kütle aynı olsaydı (veya hatta ilk düşünüldüğü gibi hepsi sıfır olsaydı), arabaların pistte aynı hızla seyahat ederek kusursuz bir senkronizasyon içinde kalması gerekirdi. Bir elektron nötrino, bir elektron nötrino olarak kalırdı çünkü "e" arabası başlangıçta en önde olur ve bitiş çizgisini daima ilk o geçerdi.

Bundan sonra, karıştırma miktarı veya bir W bozonunun bir elektronu bir müon nötrinoyla karıştırma olasılığını düşünmek gerekir. Farklı nötrino türleri arasında çeşitli karıştırma miktarlarını kontrol eden dört sayı vardır ve bilgi, PMNS Matrisi (bu isim Bruno Pontecorvo, Ziro Maki, Masami Nakagawa ve Shoichi Sakata'nın soyadlarından gelir) denen bir şeyde bulunmaktadır. Eğer dört sayının her biri sıfırsa, karıştırma olmaz; bu, pistte tek bir araba olmasına benzer: Eğer bir elektron nötrinoyla başlarsak, daima bir elektron nötrinomuz olacaktır. Eğer sayılar küçükse, diğer arabalar yarışın büyük kısmını pitte geçirir ve piste arada bir çıkar; dolayısıyla nötrinolar nadiren tür değiştirir. Sayılar büyükse, tüm arabalar her zaman pisttedir.

Teori bize karıştırmanın olabileceğini söylese de, onu kontrol eden sayılar hakkında bir şey söylemez. Onlar esasen, bir sonraki bölümde döneceğim Standart Model'deki 26 serbest

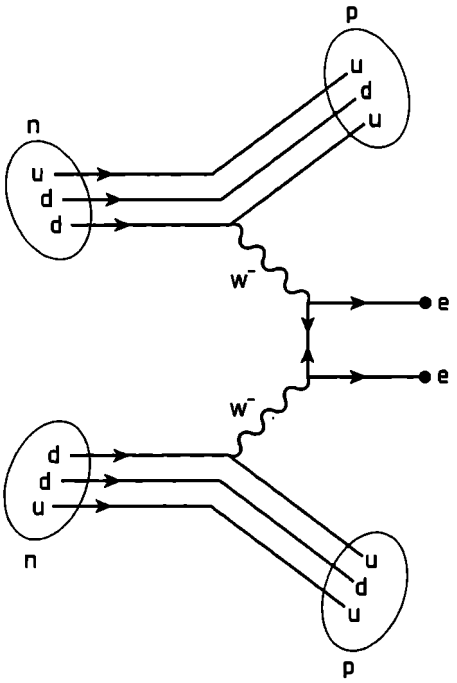
parametrenin dördüdür. Artık reaktör ve hızlandırıcı nötrinoların yanı sıra güneş ve atmosfer nötrinoları da kullanan, bize eninde sonunda nötrino salınımlarının evreni biçimlendirmede nasıl bir rol oynamış olabileceklerini söyleyecek olan bu sayıları ölçen pek çok farklı nötrino deneyi yürütülmektedir. Fakat esrarengiz nötrino hakkında çok daha temel bazı sorular bulunmaktadır.

Anti-antinötrinolar

Nötrinolara ilişkin elimizdeki bilgilere değindikten sonra, artık spekülasyon dünyasına adım atma vakti geldi. Öncelikle, bir nötrinonun elektrik yükü taşımadığı olgusu, tuhaf bir olasılığı gündeme getirir: Belki de nötrino, kendi antiparçacığıdır.

Standart Model'deki her fermiyon için, parçacık ve antiparçacık zıt yüklere sahiptir. Pozitif elektrik yüklü pozitron, negatif elektrik yüklü elektronun antiparçacığıdır; negatif yüklü antiyukarı kuark, pozitif yüklü yukarı kuarkın antiparçacığıdır vs. Peki nötr nötrino ile nötr antinötrino esasen aynı şey olabilir mi? Aynı zamanda kendi antiparçacığı olan bir parçacık, bir Majorana fermiyonu olarak bilinir. Bu parçacık türü, Enrico Fermi'nin soyadını alırken, aynı zamanda 1937'de bu olasılığı ortaya atan Ettore Majorana'nın da soyadını alır. Ayrımı netleştirirsek, diğer tüm fermiyonlar teknik olarak Dirac fermiyonlarıdır. Bu ilginç bir fikirdir fakat nötrino etkileşimlerinin ne kadar ender olduğu düşünülürse, onların Majorana parçacıkları olup olmadığını söylemek neredeyse imkânsızdır. Bunu bulmanın en iyi yolu, "nötrinosuz çift beta bozunumu" denen şeydir.

Çift beta bozunumu, bir çekirdeğin iki nötron eşzamanlı olarak protonlara dönüştüğünde daha kararlı hale gelebildiği



Nötrinosuz çift beta bozunumu Feynman Diyagramı.

kimi radyoaktif izotoplarda doğal şekilde meydana gelir. Bu daha önce gördüğümüz beta bozunumudur: bir elektron ile bir antinötrinoya bozunan W bozonları yayan kuarklar. Fakat eğer nötrino kendisinin antiparçacığı ise, başka bir şey meydana gelebilir: İlk beta bozunumdaki nötrino, ikinci beta bozunum için gelen bir antinötrinonun rolünü oynayabilir. Bu durumda, iki elektron üretilirken, hiç nötrino üretilmeyecektir. Bu "nötrinosuz çift beta bozunumu"dur ve sadece nötrino kendi antiparçacığı ise olması muhtemeldir.

Normal çift beta bozunumu ile nötrinosuz çift beta bozunumunu ayrıştırmak kolay değildir çünkü eğer oradalarsa nötrinoları ölçme olasılığımız inanılmaz düşüktür. Kilidi açan şey, iki elektrondur: Nötrinosuz çift beta bozunumda, bunlar

etkileşimin tüm enerjisini alıp götürürler; nötrinolu versiyonda ise dört parçacık, yani iki elektron ile iki nötrino aynı enerjiyi paylaşır. İki elektronu kesin olarak ölçerseniz, nötrinosuz olanı tespit etmek mümkün olacaktır.

Bu son derece isabetli bir elektron ölçümü ve inanılmaz temiz bir ortam gerektirir. Nötrinosuz çift beta bozunum gerçekten de meydana gelirse, son derece ender bir durum olacaktır ve doğal radyasyon kaynaklarından ileri gelen her türlü rastlantısal beta bozunumu, deneyin kesinliğini bozacak yanlış pozitifler verebilir. Birkaç muzun doğal radyasyonu çok fazla olacaktır ve bilimciler bu durumdan tamamen uzak durmalıdır; sıradan bir insan bir muzdan 350 kat daha radyoaktiftir!

Çift beta bozunumu tespit etmek için geliştirilen son teknoloji, 2003 ila 2011'de çalışan Nötrino Ettore Majorana Gözlemevi NEMO'nun daha büyük bütçeli versiyonu SüperNEMO'dur. Bu farklı türde bir deneydir; yüksek hassasiyetli detektörlerle çevrili büyük bir radyoaktif madde örneğidir. SüperNEMO, şu an Fransız Alplerinin altındaki bir madende inşaat halindedir ve önümüzdeki birkaç yıl içinde nötrinoların gerçekten de kendi antiparçacıkları olup olmadığını tespit edebilir. Durum buysa, nötrinolar daha da tuhaf demektir.

Sağel

Standart Model'in ilk formülasyonuna göre, nötrinolar yalnızca solak parçacıklardı ve bu nedenle Higgs alanıyla etkileşime giremezdi. Nötrino kütlesiz olmalıydı. Salınımlar, nötrinoların kütleye sahip olduğunu gösterdiğine göre, bu aynı zamanda bir sağlak nötrino da olması gerektiği anlamına mı gelir? Böyleyse, sağlak nötrino neredediir? Veya nötrinolar kütlelerini Higgs alanı dışında bir şeyden mi almaktadır?

Sağlak nötrino varsa çok tuhaf bir parçacık olmalıdır. Standart Model'deki hiçbir kuvvetle etkileşime girmezdi: Elektrik veya renk yükü taşımazdı ve sağlak bir parçacık olduğundan, zayıf kuvveti hissetmezdi. Bu nedenle, (üç solak nötrino için üç tane olması gereken) sağlak nötrinoya steril nötrino denir.

Sıradan, solak nötrinoyu tespit etmek ne kadar zorsa, sağlak nötrinoyu tespit etmek daha da zor olmalıdır. Hatta imkânsız olmalıdır. Fakat onun nötrino karıştırması üstünde etkisi olabilir: eğer bir nötrino bir steril sağlak duruma salınırsa, bu solak nötrinonun üç türünü tespit etme olasılığını değiştirebilir. Deneyciler, bu steril nötrino etkisinin izlerini arayarak bu salınımları saptamaya çalışmaktadır.

Sağlak nötrino, tüm nötrinoların Higgs alanıyla etkileşerek kütle kazanması anlamına gelirdi. Son bilmece, nötrinoların neden diğer tüm parçacıklardan çok daha hafif (kendisinden sonraki en hafif parçacık olan elektrondan en az bir milyon kat daha hafif) olduğu sorusudur. Bunun muhtemelen bir açıklaması vardır fakat önce antinötrinolar hakkında birkaç şey eklemeliyim. İkinci Bölüm'de, bir Feynman Diyagramını döndürerek antimaddeyi tanıtmıştım. Bir tepeye seyahat eden bir parçacık, dışarıya seyahat eden bir antiparçacığa dönüşür ve antiparçacıklar, zamanda geri giden parçacıkların eşitidir. Şimdi, bir saati videoya çekip kaydı geri oynatırsanız, saatin kolları geriye doğru, yani saat yönünün tersine hareket edecektir. Zamanda ileriye giden solak bir saat, zamanda geriye giden sağlak bir saate dönüşür. Bu parçacıklar için de geçerlidir: Solak bir nötrinonun antimadde eşi, sağlak bir antinötrinodur. Eğer sağlak bir nötrino da varsa, solak bir antinötrino eşi olacaktır.

Durum kafa karıştırıcı olmaya başladı fakat nötrinolar Majorana parçacıklarıysa, işler bir yandan kolaylaşırken diğer yandan daha karmaşıklaşır. Majorana parçacıkları, kendi antiparçacıklarıdır fakat eğer bir sağlak nötrino varsa, burada iki durum var demektir: sağlak antinötrinoyla aynı parçacık olan solak nötrino ile solak antinötrinoyla aynı parçacık olan sağlak nötrino.

Dolayısıyla eğer bu iki durum da varsa, "ileri geri mekanizması" denen şey meydana gelir. Solak ve sağlak nötrinoların birleşerek diğer Standart Model parçacıklarına benzer şekilde kütle elde etmesi yerine, denge sarsılabilir. Solak nötrino çok hafif hale gelebilir (bu gördüğümüz, açıklamak isteyeceğimiz şeydir) ve sağlak nötrino son derece ağırlaşabilir; bildiğimiz her parçacıktan aşağı yukarı bir milyar kat daha ağır hale gelebilir ve şimdiki deneyler ona erişmeyi başaramaz (bu yine gördüğümüz veya bu durumda görmediğimiz şeye uymaktadır; şimdiye dek hiç sağlak nötrino ölçmedik). Bu derli toplu bir açıklamadır fakat doğru olması için öncelikle nötrinoların Majorana parçacıkları olup olmadıklarını tespit etmemiz gerekir.

Büyük nötrino deneyleri

Nötrinoları ölçmenin olağanüstü zorluğu, nötrino detektörleriyle ilgili kimi olağanüstü fikirlerin ortaya atılmasına yol açmıştır. Eğer büyük bir su detektörü, bu tuhaf parçacıkları tespit etmemizi sağlıyorsa, denizi kullanabiliriz demektir. İşte, Fransa'nın güney kıyısı açıklarında, suyun 2,5 kilometre altına kurulan ANTARES teleskobunun yaptığı da budur. Bir dizi hafif detektör (PMT) içeren bu aygıt suyun içinde asılı durmakta ve devasa miktarda suda her türlü nötrino etkileşimlerinden gelen Cherenkov radyasyonunu aramaktadır. Gele-

cekte çok daha büyük olan KM3NeT (Kilometreküp Nötrino Teleskobu) inşa etme planları vardır ve deniz yatağının altında duracak bir detektörle uğraşmanın yanı sıra suda bulunan diğer yaratıkların yol açabileceği zorluklar olsa da, bu kadar büyük miktarda suyu taramak, çok yüksek enerjilerde nötrinolar arayışına hassaslık getirir.

Elbette, Antarktika'da buzun altında pek fazla şey yaşamamaktadır; bu nedenle orada da nötrino deneyleri yapılmaktadır. Buz Küpü Deneyi (IceCube Experiment), Güney Kutbu'nda buzun derinliklerine dalan, bir kilometreküpü kapsayan ve buzdaki nötrino etkileşimlerinden kaynaklanan Cherenkov radyasyonunu tespit edebilen PMT zincirlerinden oluşur. Bir adım ileri giden ANITA Deneyi, Güney Kutbu'nun 35 kilometre üzerinde uçan bir helyum balonundan detektörler sarkıtır; buradan, geniş bir alan boyunca buzdaki herhangi bir nötrino etkileşimini tespit edebilir (bu kez radyo sinyalleri üretir) ve etkin şekilde güney buzunun büyük kısmını devasa bir nötrino tuzağına dönüştürür.

Bu devasa detektörlerin avantajı, inanılmaz yüksek enerjili nötrinolara karşı hassas olmalarıdır. Bu nötrinolar evrenin en şiddetli bölgelerinde üretilir: süpernovalarda, aktif galaksi çekirdeklerinde, kara deliklerde ve başka pek çok ilginç fenomende. Nötrino astronomisi çok yakında geleneksel foton astronomisinin yerini almayacaksa da, farklı bir bakış açısı sunduğu açıktır. Bazı protonlar, gaz bulutları ve yolu tıkayan başka şeyler yüzünden Dünya'ya ulaşamaz; nötrinolar, tabii ki, çoğunlukla tüm bu engellerin içinden uçarak geçiverir ve bize kozmostaki en muhteşem olaylardan bazıları için açık görüş hattı verir. Nötrino dedektörleri çalıştığından beri, Samanyolu'nda veya ona yakın galaksilerde yalnızca bir süpernova meydana gelmiştir: SN 1987A. 1987'de Dünya'dan

görünen bu süpernova, 160.000 ışık yılı uzakta (ve dolayısıyla 160.000 yıl önce) meydana gelmiştir. Kamiokande, bu süpernovadan yaklaşık 13 saniye içinde 11 nötrino tespit etti: yalnızca 8 ışık dakikası uzaklıkta olan Güneş'ten bu kadar çok nötrino tespit etmek normalde yaklaşık bir hafta sürerdi. Bu yine bir süpernovada üretilen afallatıcı nötrino sayısını gözler önüne seriyor: SN 1987A için tahminler, onu aşağı yukarı 10^{58}'e koyuyor. Nötrinolar aynı zamanda süpernovanın ışığından birkaç saat önce de ulaştı. Nötrinolar ışık hızından hızlı yolculuk ettiğinden değil, fotonlar yol boyunca etrafa saçıldığı ve patlamadan kaçması daha uzun sürdüğünden. Günümüzde büyük nötrino deneyleri, yalnızca Standart Model'i yeni biçimlerde irdelemekle kalmıyor, aynı zamanda astronomlara bir sonraki süpernova için erken uyarı vermeye de hazırlar!

Farklı bir parçacık fiziği

Nötrinolar büyüleyicidir. Gerçekten de Standart Model'in hayaletleridir ve uzun zaman boyunca erişilmez olmuşlardır. Onları tanımak, LHC'ninkinden büsbütün farklı bir yaklaşım gerektirir: madenlerin dibinde devasa su tankları, kilometrelerce katı kaya boyunca ateşlenen parçacık ışınları, Güneş'in merkezinde meydana gelen nükleer reaksiyonları gözlemlemek, gama ışınlarını ve Cherenkov radyasyonunu tespit etmek. Detektörler çok sessiz çalışır ve böylece, LHC'de olduğu gibi her saniye milyonlarca çarpışmayı elekten geçirmek yerine sadece birkaç olayı yakalamaya odaklanır.

Fakat nötrinolar, bir kez daha doğanın beklediğimizden daha tuhaf olduğunu kanıtlayarak, artık evrenle ilgili yeni şeyler ortaya çıkarıyorlar. Nötrino detektörleri de çok nadiren etkileşime geçen bir başka parçacık arayışındaki deneyler

için şablon oluşturuyor. Söz konusu parçacık, karanlık maddedir. Karanlık maddenin doğası, günümüzde fizikteki en zor ve yanıtsız sorulardan biridir. Yeni bölümde bu soruları ele alacağız.

DOKUZUNCU BÖLÜM

KARANLIĞA YOLCULUK

Parçacık fiziği, artık yabancı topraklara adım atmaktadır. Standart Model, 1960'lar ile 1970'lerde inşa edildiğinden beri yol gösterici olmuştur, daha fazla kuark ile lepton, W ile Z, en sonunda da Higgs Bozonu keşfedilmiştir. Nötrino kütlesi bir sürpriz olmuştur fakat hikâyeye eklenmiştir. Ve söz konusu hikâye, artık neredeyse tamamlanmıştır: 12 parçacık, 3 kuvvet, Higgs mekanizması ve atomaltı dünyasının fevkalade başarılı bir betimlemesi.

Bu bölümde, Standart Model'i bağlamına yerleştireceğim. Önceki sayfalarda bahsedilen büyük başarıları arkamızda bırakıp açık problemlere, Standart Model'in eksik olduğunu bilme sebebimize odaklanma vakti geldi. Standart Model'in tahminlerini ele aldığımızda, onları çoğaltarak üstünde bulunduğumuz dünyada bulduklarımızla karşılaştırınca neler olduğunu görmeliyiz. Bunlar, büyük problemlerdir.

Tüm antimadde nerede?

Şu kanıksadığımız bir şeydir: Dünya maddeden meydana gelmektedir. Dirac ilk olarak antimaddeyi 1928 denkleminin sonuçlarından biri olarak öngörmüş ve kaçınılmaz olarak ileride

şu sorunun sorulmasına yol açmıştır: Onu hiç görmediysek bu tuhaf şey nasıl var olabilir ki? Standart Model'in başlıca unsurlarından biri olan antimadde madde ile daima eşit miktarlarda üretilir. Yüksek enerjili bir foton bir elektron ile bir pozitrona dönüşebilir. Yüksek enerjili bir gluon, bir kuark ile bir antikuarka dönüşebilir. Bir madde parçacığı ile bir antimadde parçacığına. Bugün, her şey sadece maddeden oluşur, antimadde yoktur. Dolayısıyla, antimadde hakkındaki soru, baş aşağı edilmiştir: hepsi nereye gitti? Evrendeki her şeyin yarısını nasıl kaybedebildik?

Bunun olası bir açıklaması vardır; fakat bu açıklama doğruysa, madde ile antimadde biraz farklı davranmalıdır. Büyük Patlama'dan hemen sonra, evren eşit şekilde madde ve antimaddeyle dolmuştu. Yüksek enerjili fotonlar, gluonlar, W bozonları, Z bozonları ve Higgs bozonları oluşuyor ve parçacık-antiparçacık çiftlerine bozunuyorlardı. Fakat madde ile antimaddenin davranış biçimlerinde minicik bir fark olduysa, bu %50 madde ile %50 antimadde dengesi hafifçe, belki %50,001-%49,999 oranında maddenin lehine değişmiş olabilir. Çoğu madde ve antimadde parçacığı sıcak, yoğun erken evrende karşılaşıp yok olarak tekrar bozonlara dönüştü. Fakat bu çok hafif dengesizlik nedeniyle, küçük miktarda madde geriye kaldı. Bu "minik" artık, şimdi bizim görebildiğimiz tüm evreni oluşturur.

Bu resmin oturması için, madde ile antimadde arasında küçük bir fark olmalıdır. Standart Model'in dilinde, bazı etkileşimler, ikisini ayıracak bir Feynman Diyagramı olmalıdır. Fakat problem de budur: Öyle bir diyagram yoktur.

Antimaddeden ilk olarak İkinci Bölüm'de, bir Feynman Diyagramındaki bir tepeyi basitçe döndürerek bahsetmiştim Bunu yapmak, zamanda ileriye hareket eden bir elektronu

zamanda geriye giden bir elektrona dönüştürmeyi gerektirdi. Bu antielektron, bir elektronun zıttı yüke sahiptir fakat temel olarak hâlâ bir elektrondur. Sokakta hangi yöne giderse gitsin, bir araba daima esasen bir arabadır.

Parçacıklar da spin yapar ve solak ile sağlak versiyonları vardır. Gerçi farkı yalnızca zayıf etkileşim söyleyebilir (zayıf etkileşim, Standart Model'deki pek çok güçlüğün kaynağıdır!) Son bölümde bahsettiğim gibi, bir parçacığın zaman içindeki hareket yönünü değiştirmek, aynı zamanda bir parite dönüşümü gerçekleştirir: W bozonları yalnızca solak parçacıklar ve sağlak antiparçacıklarla etkileşime girer.

Dolayısıyla, Standart Model'de mümkün her etkileşime, tüm Feynman Diyagramlarına bakar ve parçacıklar ile antiparçacıkların yerini değiştirirsek, yük ve paritelerini, yani CP'lerini değiştirmiş oluruz. Ve bu değişikliğin olması durumunda, hesaplayabildiğimiz etkileşimlerin hiçbiri değişmeyecektir. Bu CP simetrisi olarak bilinir. CP simetrisine göre, madde ile antimadde gerçekten de benzer biçimlerde davranır ve CP simetrisi doğruysa, evrenin yarısı madde, yarısı da antimadde olmalıdır.

Evrenimizin neden yalnızca madde içerdiğini, antimaddenin neden kaybolduğunu açıklayacaksak, bu CP simetrisi bir şekilde kırılmalıdır: Bu sürece "Yük-Parite İhlali" denir. Evrendeki antimadde eksikliğini açıklamaya çalışmak, temel olarak parçacık etkileşimlerinde CP ihlali aramayı içermiştir.

Standart Model'in CP simetrisini ihlal etmediğini yazmış olsam da, aslında bunun olabildiği bir yer vardır: Dördüncü Bölüm'de kuarklarla, Sekizinci Bölüm'de ise nötrinolarla ilgili olarak karşımıza çıkan karışma. Karışma, Standart Model'deki fermiyon çiftleri (örneğin elektron ile elektron nötrino, yukarı ile aşağı kuark) ve zayıf yük çiftleri arasında meydana gelen

basit bir yanlış hizalanmadır. Bu, W bozonlarının kuark çiftleri arasına karışarak tüm ağır kuarkların bozunmasına izin vermesi ve lepton çiftleri arasına karışarak uçarken nötrinoların tür değiştirmesine izin vermesi anlamına gelir. Görünüşe bakılırsa bu karışma, madde ile antimadde için biraz farklı şekillerde meydana gelebilir.

Kuark karışması, kapsamlı şekilde incelenmiştir ve CP ihlalinin de varlığı onaylanmıştır. Madde ile antimadde farklı davranır. Bunun bir örneği, ya bir pozitif pion, negatif elektron ve elektron antinötrinoya ya da bir negatif pion, pozitif antielektron ve elektron nötrinoya bozunabilen kaonun bozunumlarıdır. Bu iki farklı bozunum, aynı oranda meydana gelmelidir fakat bir elektron üreten bozunma, bir pozitron üreten bozunmadan yaklaşık % 0,3 daha sık gerçekleşir. Bu bizim aradığımız türden bir etkidir fakat tıpkı kuarklarla CP ihlalinin her işareti gibi, o da yalnızca birkaç parçacığı etkiler ve bu içinde yaşadığımız madde baskın evreni açıklamak için fazlasıyla küçüktür.

Kuarklar bu problemin cevabı değilse, belki de nötrinolar cevabıdır. Onlar CP simetrisini çok daha büyük bir ölçüde kırabilir fakat nötrinoları ölçmek çok daha zor olduğundan, henüz bilmiyoruz. Cevap bulmak, parçacık fiziğinin en büyük önceliklerinden biri ve yapılacak pek çok nötrino deneyinin hedefidir. Ve nötrinolar CP simetrisini büyük miktarda kırmazlarsa, kayıp antimadde için yeni bir açıklamaya ihtiyacımız olacak.

CP ihlali hikâyesinde esrarengiz bir şey daha vardır. Standart Model'de madde ile antimaddeye farklı davranan, sadece zayıf kuvvettir fakat öyle olmak zorunda değildir; güçlü kuvvet de bunu yapabilir. Bunu yapsaydı, evrenimizi tamamen madde hâkimiyetinde olması için iten fazladan etki olabilirdi.

Ne var ki güçlü kuvvet, CP simetrisine kusursuz bir saygı gösteriyormuş gibi görünmektedir ve bunun nedenini şu anda bilmiyoruz. Güçlü CP problemi olarak bilinen bu mesele de fizikteki cevapsız sorulardan biridir.

CP ihlali, kayıp antimaddenin tek mümkün cevabı değildir. Bazı teoriler, antimaddenin kütleçekime farklı bir yolla tepki verdiğini öne sürer: Madde ile antimadde birbirini itebilir. Evrenin bizim bulunduğumuz kısmında antimadde olmayabilir çünkü buradaki madde onu uzağa itmiş olabilir! Gelgelelim, yeterince antimadde üretmek ve kütleçekime nasıl tepki verdiğini ölçmek son derece zordur; dolayısıyla bu tuhaf bir fikir olsa da, şimdiye dek üstünü çizemediğimiz tek fikirdir.

Peki, neden Standart Model?

Pek çok açıdan Standart Model verimlilik modelidir. Dünyayı yalnızca 12 fermiyon kullanarak betimler ve esasen bunların sadece üçü önemlidir: birleşerek atomları oluşturan elektron, yukarı kuark ve aşağı kuark. Fakat Standart Model "neden"in değil, "nasıl"ın cevabını verir; bu 12 parçacığın neden var olduğunu değil de, bu parçacıkların nasıl davrandığını söyler.

Dirac denklemini ayar simetrileriyle ve Higgs mekanizmasıyle birleştirmenin pek çok yolu vardır. Doğanın Standart Model'de neden bu belirli bileşimi seçtiği veya doğada neden üç kuvvet, yani elektromanyetik, zayıf ve güçlü kuvvet olduğu net değildir. Veya zayıf kuvvetin neden solak ile sağlak parçacıklar arasında ayrım yaptığı. Kuarkların neden fraksiyonel elektron yükü, elektronun tam bir birim taşıdığı ve nötrinonun ise hiç taşımadığı. Neden kuarklar renk yükü taşırken leptonların taşımadığı. Neden bir tanesi yeterli olabilirmiş gibi görünürken, üç nesil madde olduğu. Bunlara ek

olarak, sağlak nötrinoların olup olmadığını veya nötrinoların Majorana parçacığı (yani aynı zamanda antiparçacık olan parçacıklar) olup olmadığını da henüz bilmiyoruz.

Başka deyişle, Standart Model ampiriktir; deneylerde gördüklerimize uymak üzere inşa edilmiştir. Öğeleri tek tek anlarız fakat neden bu şekilde bir araya koyulduklarını anlamayız. Tüm bunların altında yatan bir şey, doğanın daha temel bir tanımı olmalıdır. Sadece biz bunun ne olduğunu henüz bilmiyoruz.

Şimdilik Standart Model'in yapısını kabul etsek bile, 26 "serbest parametre" içerir ve bu 26 sayıyı henüz açıklayamayız, onları ölçmemiz gerekir. Hepsinden bu kitabın çeşitli kısımlarında bahsettim, dolayısıyla hepsi tek bir yerdedir:

- güçlü, zayıf ve elektromanyetik kuvvetlerin güçleri ("eşleşme sabitleri").
- Higgs alanının gücü (boş uzayda depolanan enerji veya "boşluk beklenti değeri").
- Higgs bozonunun kütlesi.
- bu parçacıkların Higgs alanıyla ne kadar güçlü etkileştiği olarak yorumlanabilecek, 6 kuark ve 6 leptonun kütleleri.
- kuark karışmasını kontrol eden üç sayı ve kuark CP ihlalini kontrol eden dördüncü bir sayı.
- güçlü kuvvette CP ihlalini kontrol eden sayı; gerçi görünüşe bakılırsa, bu sayı tamı tamına sıfırdır.

Tüm bu sayıları ölçtükten sonra, onları Standart Model'in denklemlerine yerleştirebilir ve fevkalade isabetli tahminler hesaplayabiliriz (bunlara W ile Z bozonlarının kütleleri de dahildir). Fakat bu tatmin edici olmaktan alabildiğine uzaktır.

Tüm bunlar için daha derin bir açıklama olması gerektiğini düşünmek için 26 neden.

Bu 26 nedene ekleme yapacak olursak, ışık hızı gibi, Standart Model'in ötesine uzanan başka temel sayılar da bulunmaktadır. Bu kadar çok eksik parçası olan, açıklanmadan kalan bunca şeyin bulunduğu bir teori, elbette tamamlanmış sayılamaz. Yine, eğer doğanın daha derin bir kavrayışına, Standart Model'in yapısını açıklayan bir teoriye sahip olursak, bu teori aynı zamanda bu sayıların bir kısmını da açıklayabilir.

Standart Model: Döngülere dolaşmak

Standart Model'in tam kalbinde aynı zamanda çürümüş bir şey de vardır. Bu ilk olarak, bilim tarihindeki en isabetli teori olan fakat 1930'larda hiçbir şey öngöremeyen kuantum dinamiğinde bulundu. Hesaplamalar yanlış gidiyordu. Görünüşe bakılırsa bu yeni fikirlerin ilk vaadi bir sürü mantıksız matematiğin altında çöküyordu. Döngülerde bir problem vardı.

Döngüler, biraz daha karmaşık Feynman Diyagramlarında, geçici olarak bir parçacığa, sonra antiparçacığa, sonra da yeniden bir parçacığa dönüşen bir bozon veya bir bozon yayıp ardından onu neredeyse anında yeniden emen bir fermiyon içeren diyagramlarda meydana gelebilir (İkinci Bölüm'de gördüğümüz gibi). Döngüler içindeki parçacıklar sanal parçacıklardır. Bir Feynman Diyagramının içine hapsolan sanal parçacıkları doğrudan ölçemeyiz. Belirsizlik İlkesi, bir şartla bu sanal parçacıkların kuralları bükmesine, enerji ödünç almasına izin verir: Ne kadar fazla enerji ödünç alınırsa, o kadar kısa süreliğine ödünç alınabilir. Ve bu döngülerin havaya uçma, gitgide daha küçülerek daha fazla enerji ödünç alma, en sonunda da sınırsız bir enerji miktarı ödünç alma eğilimi vardır. Bir hesaplama sınırsız bir cevap getirdiğinde, bu genellikle bir

şeyin fena halde yanlış gittiği anlamına gelir. Ve 1930'larda gidişat da böyleydi: QED teklemişti.

Bu sonsuzluklarla ilgili problemleri çözmek için kuantum mekaniğinde "yeniden normalleştirme" olarak bilinen bir dal geliştirildi. Böylece sorunlar halının altına süpürülüyor ve "normal" bir cevap bulunuyordu. Yeniden normalleştirme esasen döngülerin aslında sonsuz yüksek enerjilere kaçamayacağını söyler çünkü bir noktada farklı bir etkileşim türü kontrole geçmelidir. Bunun ne olabileceğine dair bir sürü fikir vardır (Süpersimetri veya sicim teorisi gibi) fakat asıl mesele onun beta bozunumu veya LHC'deki çarpışmalar gibi şeyleri hesaplarken aslında bunlarla alakalı olmamasıdır. Bu, bir araba gezintisine çıkınca dünyadaki tüm yollarda ilerleyen tüm arabaların şoförlerinin davranışlarından endişe duymaya benzer. Evet, hepsi oradadır ve gelecekte hangi yollarda araba kullanacağımızı kim bilir? Fakat bu henüz önemli olmayan bir detay seviyesidir ve esasen araba kullanmayı öyle karmaşıklaştırır ki, en sonunda bu imkânsız hale gelir. Herhangi bir yere arabayla gitmek için bir kestirme yol dayatırız; yalnızca içinde bulunduğumuz arabayı ve görebildiğimiz arabaları düşünmemiz ve geri kalanı için endişelenmememiz gerekir.

Aynı şey yeniden normalleşmede de olur: Bir kestirme yol uygulanır, ani bir frenle döngülerin sonsuza gitmesi engellenir. Artık aşırı yüksek enerjide ne olduğu hakkında endişelenmemize gerek yoktur, yalnızca onun Standart Model dışında bir şey olduğunu söylememiz yeterlidir. QED'in matematiği tekler çünkü onu kıymetli olmadığı bir yerde kullanmaya çalışıyoruz, bu nedenle o noktaya ulaşmadan önce onu durduralım. Bu yaklaşım Paul Dirac'ı hiçbir zaman mutlu etmedi çünkü bu yapay kestirmenin, kendi denkleminin güzelliğini mahvettiğini hissetti. Bu tekniklerin pek çoğunun öncüsü olan

Richard Feynman bile yeniden normalleşmeye "hokus pokus" demiştir. Fakat "yeniden normalleşme" elzemdir. O olmasaydı Standart Model'de hiçbir şey hesaplayamazdık.

Yeniden normalleşme, aslında bize Standart Model'in yalnızca bir yaklaşık gösterim olduğunu söyler. Yaklaşık gösterimler aşırı yüksek enerjilerde tekler çünkü orada işe yaramaz. Tüm bunların ardında daha derin bir açıklama olmalıdır. Ve gelecekte bir noktada belki de bir sonraki nesil parçacık hızlandırıcısında, çok ileri bir tarihte, bu yeni şeyi keşfedeceğiz. Standart Model, o teorinin düşük enerjili yaklaşık gösterimi olarak yaşamını sürdürecektir. Tıpkı Newton Yasaları'nın Görelilik'in düşük enerjili yaklaşık gösterimi olarak yaşamını sürdürmesi gibi.

Karanlık madde

Serbest parametreler ve yeniden normalleşme daha derin bir teori için koşullara bağlı bir kanıtsa, aynı zamanda bir açık delil de vardır. Şu anda en iyi kanıt, atomaltı dünyasından değil, evrendeki en büyük şeylerden birinden, galaksilerden gelmektedir.

Galaksiler çok güzeldir. Devasa dönen sarmallar, diskler ve yıldız topları, kütleçekimle bir arada durur. Dünyamız Samanyolu içinde galaksinin merkezinden dışına dek olan mesafenin üçte ikilik kısmının aşıldığı yerde bulunur ve merkezin etrafında saatte yaklaşık 800.000 kilometre hızla döner. Bir tam tur yapması yaklaşık 200 milyon yıl alır. Bir rotasyon geriye dönerseniz, dinozorların kat ettiği bir dünyayla karşılaşırsınız. Fakat bu aynı zamanda bir sorundur: Samanyolu, neredeyse diğer tüm galaksiler gibi, çok hızlı dönmektedir. Bu güzel spiraller öyle hızlı dönüyorlar ki, aslında parçalanmaları, yıldızların her birinin fırlayıp gitmesi gerek.

Bu problem, ilk olarak 1930'larda fark edildi fakat Vera Rubin'in 1960'lardaki çalışmaları herkesin fark etmesini sağladı. Şöyle: Bir galaksinin ne kadar parlak olduğuna bakarak, onun ne kadar yıldız (genellikle yüz milyarlarca yıldız) ve dolayısıyla kütle içerdiğini tahmin etmek mümkündür. Galaksinin kütlesi ve boyutundan da kütleçekim kuvvetini bulmak mümkündür. Kütleçekimi kuvveti ne kadar büyükse, yıldızlar da o kadar hızlı hareket eder. Aynı fikir dönüş halindeki her şey için geçerlidir: Uluslararası Uzay İstasyonu Dünya'nın yaklaşık 400 kilometre üzerinde döner ve saniyede yaklaşık 7,6 kilometre hızla yolculuk eder; Ay, neredeyse 400.000 kilometre uzaktadır ve sadece saniyede 1 kilometre hızla yolculuk eder. Galaksinin merkezinden farklı mesafelerde bulunan yıldızların beklenen hızını çizmek, bir "rotasyon eğrisi" verir.

Bir olasılık, hesaplamaların yanlış olmasıdır çünkü kullanılan kütleçekim modeli (Einstein'ın Genel Görelilik Teorisi) hikâyenin tamamı değildir. Kütleçekim denklemlerinde veriyi açıklayana dek değişiklikler yaparak amaca yönelik bir model geliştirme, problemi bu şekilde çözme girişimleri olmuştur. Bu türden model inşası yaklaşımının yanlış bir tarafı yoktur: Max Planck da kuantum teorinin ilk kullanımını 1900'de böyle geliştirdi. MoND (Modified Newtonian Dynamics - Değiştirilmiş Newtoncu Dinamikler) 1980'lerden beri sahnede olan, kütleçekiminin galaksilerin çok büyük boyutları düşünüldüğünde biraz farklı işlediğini söyleyen bir teoridir ve rotasyon eğrilerini açıklamayı başarmıştır.

Bir başka açıklamaya göre, galaksilerde çok daha fazla miktarda bulunan bir şey vardır fakat biz karanlık madde denen bu şeyi göremeyiz. Bu düşünce, 1920'lerden beri sahnededir. Onu göremediğimiz için karanlık madde kütleçekim

kuvvetlerini hesaplarken hesaba katılmaz ve dolayısıyla bu kuvvetler eksik değerlendirilir. Hesaba biraz karanlık madde kattığınızda, rotasyon eğrileri için yine ölçülen şeye gayet uygun olan farklı bir açıklama bulmak mümkündür.

Karanlık madde ile MoND fikirleri arasında karar vermek için daha fazla veriye ihtiyaç vardı ve bu veri kütleçekimsel merceklenme ölçümlerinden elde edildi. Kütleçekimsel merceklenme, kütlenin uzay ve zamanın eğilmesine neden olduğunu söyleyen Genel Görelilik'in eşsiz öngörülerinden biridir. Bu eğilme kütleçekim etkisi olarak görünür fakat aynı zamanda çok ağır bir nesnenin yanına giden fotonların yollarını da değiştirir. Bol miktarda kütleyle dolu bir uzay bölgesi, bir banyo penceresindeki buzlu cam gibi davranıyor, arka taraftaki manzarayı bozuyor olabilir. Yıldızları bir galaksi gibi ağır bir nesnenin ardından gözlemlemeye çalıştığımızda görüntüleri bozulacaktır: Bu kütleçekimsel merceklenmedir. Kırılma, o kütleyi doğrudan görmeksizin, evrendeki kütleyi haritalandırma fırsatı verir ve karanlık maddenin en güçlü kanıtlarından birini kabaca 3,7 milyar ışık yılı uzaklıktaki bir galaksi kümesi olan Mermi Kümesi formunda sunar.

Mermi Kümesi, aslında kafa kafaya çarpışmış iki galaksi kümesidir ve teleskoplar hidrojen gazı bulutlarının birbirine çarpmasını gözlemler: Atomlar iyonlaşır ve X-ışınları yayılır. Bu X-ışınları bize sıradan maddenin nerede olduğunu söyler. Fakat kütleçekimsel mercekleme ölçümleri, başka bir hikâye anlatır: Bu galaksilerin kütlesinin büyük kısmı, çarpışmaya hiçbir şekilde karışmadan uçup gitmiştir. Fazladan kütle, ancak bu mercekleme etkileri aracılığıyla görülebilir ve X-ışını bilgisiyle birleştirildiğinde, ortak kanı galaksilerde iki tür madde olması gerektiğidir: normal madde ile karanlık madde. Karanlık madde aynı zamanda galaksi rotasyon eğri-

lerinin cevabıysa ondan bir sürü olmalıdır; bizim Samanyolu'muz gibi bir galakside, normal maddenin yaklaşık on katı karanlık madde olmalıdır.

Peki, karanlık madde nedir? İlk fikir, onun yalnızca bizim göremediğimiz normal madde olmasıydı: yıldızlar gibi ışımayan çok ağır, kısmen küçük cisimler, gezegenler, kara delikler, asteroidler vb. Rotasyon eğrileri ve diğer etkileri açıklamak için muhtemelen galaksilerin kenarlarında (halelerinde) yaşarlar, dolayısıyla onlara Büyük Kütleli Astrofizik Sıkışık Hale Cisimleri (Massive Astrophysical Compact Halo Objects), yani MACHO'lar denir. Problem, gözlemlenen etkilerin ortaya çıkabilmesi için, bu galaksilerin nasıl oluştuğuna ilişkin bildiklerimiz düşünüldüğünde, var olabilecekleri sayıdan çok daha fazla sayıda MACHO'nun gerekli olmasıdır. MACHO'lar cevap değildir. Bugün karanlık maddenin ilk adayı onun tersi, yani WIMP'lerdir (Weakly Interacting Massive Particles - Zayıf Etkileşimli Büyük Kütleli Parçacıklar).

Eğer WIMP'ler doğru cevapsa, onlar hakkında halihazırda birkaç şey biliyoruz demektir: Elektromanyetik kuvveti değil, kütleçekimini hissederler (dolayısıyla saydam madde karanlık maddeden daha isabetli bir isim olabilir). Onların da güçlü kuvveti hissetmediğini biliyoruz, aksi takdirde atom çekirdekleriyle etkileşirlerdi. Zayıf kuvveti hissediyor olabilirler; bu, onların nötrinolara epey benzemelerine neden olurdu. Hatta son zamanlarda onların gerçekten de kütleye sahip olduklarını keşfettiğimizden beri, nötrinoların aslında zayıf etkileşimli büyük kütleli parçacıklar olduğunu da fark ettik. Evrende her bir galaksiden uçarak geçen sayısız nötrino olduğundan, belki de karanlık madde için egzotik bir açıklamaya ihtiyacımız yoktur. Bu madde sadece hayalet nötrinolardan ibaret olabilir!

Elbette cevap bu kadar basit değildir. Karanlık madde, dönen galaksileri bir arada tutmak için fazladan kütleyi ve dolayısıyla fazladan kütleçekimini sağlıyor. Bunu yapmak için karanlık madde epey yavaş hareket ediyor olmalıdır; eğer çok hızlı hareket ederse, tıpkı uzaya uçan bir roket gibi galaksiden uçar giderdi. Ve nötrinolarla ilgili bildiğimiz bir şey, çok hızlı hareket ettikleridir. Öyle hafiftirler ki, neredeyse ışık hızıyla yolculuk ederler. Bu kadar hızlı yolculuk eden herhangi bir şey, sorun olmaksızın galaksilerden uçabilir ve bu nötrinoların karanlık madde olamayacağı anlamına gelir: Tıpkı kaynar suyun bir su ısıtıcısından taşması gibi, nötrinolar da bir yerde galaksileri bir arada tutabilecekleri kadar uzun kalmazlar. Karanlık madde "sıcak" olamaz.

Dolayısıyla karanlık madde WIMP'leri "soğuk" olmalıdır. Yani yavaş hareket ediyor olmalıdır ve bu aynı zamanda ağır olmaları gerektiği anlamına gelir. Çok ağır değil; aksi takdirde bir başka sorun ortaya çıkardı: Öyle yavaş hareket eder, kütleçekim kuvveti altında öyle iyi kümelenirdi ki, galaksiler gözlemlediğimizden çok daha küçük ve yoğun görünürdü. Evrenin kesin modelleri, karanlık maddenin aşağı yukarı elektrozayıf ölçeğe tabi olacak büyüklükte kütleye sahip (yaklaşık 100 GeV) WIMP'ler olduğunu öne sürer. Standart Model'de böyle bir şey yoktur. Karanlık madde her yanımızdadır, tüm galaksilere ve evrenin tamamına yayılmıştır. En sevdiğiniz kahve fincanını alın, muhtemelen her an içinden yaklaşık beş tane WIMP geçiyordur. Buna karşın, onun ne olduğu konusunda en ufak bir fikrimiz yok.

Fakat modeller bize daha fazla şey öğrenme umudu verir: Bu WIMP'lerden Büyük Patlama'dan sonra doğru miktarlarda üretilmiş olması için, muhtemelen zayıf kuvveti hissetmeleri

gerekirdi. Bu da, tıpkı nötrinolarda yaptığımız gibi, onu tespit etmek için bir şansımız olduğu anlamına gelir. Bu "WIMP mucizesi" olarak bilinir çünkü önümüzdeki birkaç yıl boyunca yapılacak deneylerin onu laboratuvarda ölçebileceğini ve en sonunda karanlık madde bilmecesinin cevabını bulabileceğini öne sürmektedir. Söz konusu deneyler hakkında önümüzdeki bölümde daha fazla bilgi vereceğim.

Karanlık enerji

Kütleçekimsel etkiler bize karanlık maddenin varlığına ilişkin en güçlü ipuçlarını verse de, aynı zamanda bizzat kütleçekiminin de beklenmedik bir şey yaptığına dair işaretler vardır.

1925 gibi yakın bir tarihte, galaksimiz Samanyolu'nun tüm evrendeki tek galaksi olduğuna dair bir fikir birliği olduğuna inanmakta zorlanıyorum. Ancak o yıl Amerikalı astronom Edwin Hubble gece göğünde görünür olan yıldız kümeleri ile nebulaların ölçümlerini yaptı ve onların başta sanıldığından çok daha uzakta, büsbütün ayrı galaksiler olmaları gerektiğini kanıtladı. Hubble daha sonra bu uzak galaksilerin "kırmızıya kayma" değerlerini ölçerek bize göre nasıl hareket ettiklerini incelemeye koyuldu. Kırmızıya kayma, Doppler etkisine benzer: Polis arabası size doğru geliyorsa siren sesi daha tizdir fakat uzaklaşıyorsa daha bastır. Yıldızlardan gelen ışıklar, yıldızlar bize doğru hareket ediyorsa daha yüksek frekanslı olur (maviye kayma), uzaklaşıyorsa daha düşük frekanslı olur (kırmızıya kayma). Uzak galaksilerin değişimlerini ölçen Hubble, hepsinin bizden uzaklaştığını buldu. Eğer şimdi bizden uzaklaşıyorlarsa, geçmişte bize çok daha yakın olmalıydılar. 13,8 milyar yıl önce, her şey tek bir yerde yoğunlaşmış durumda olmalıydı: Büyük Patlama denen bir olay olmuş, yani bildiğimiz şekliyle evren doğmuş olmalıydı. Sadece

madde değil, uzay ve zaman da bu noktadan dışarıya doğru genişlemiş olmalıydı.

Eğer Büyük Patlama büyük bir dışarı doğru patlama ise, kütleçekim onun zıddıdır: daima çeker; maddeler daima birbirlerini çeker. Kozmolojideki en büyük sorulardan biri, kütleçekimi en sonunda zafer kazanarak tüm evreni bir "Büyük Çöküş" ile yeniden bir araya mı getirecek, yoksa Büyük Patlama çok güçlü olduğundan evren sonsuza dek genişleyecek mi sorusuydu. Fakat 1990'larda bu soru uzak galaksilerin kırmızıya kayma değerleri büsbütün beklenmedik bir şeyi ortaya çıkarınca ilgi çekici olmaktan çıktı. Çünkü evren hızlanıyordu! Bir kuvvet kütleçekimini etkiliyor, her şeyi gitgide daha uzağa itiyor olmalıydı. Bu kuvvete, onu henüz anlayamadığımızı belirtmiş olmak amacıyla, "karanlık enerji" denmiştir.

Einstein, 1917'de Genel Görelilik Teorisi'yle uğraşırken kütleçekimine bazı beklenmedik şeyler yaptırmanın bir yolunu bulmuştu. Bu, Hubble diğer galaksileri keşfetmeden önce, bir Büyük Patlama fikri ortaya çıkmadan ise çok önceydi. O zamanlar evrenin epey sabit olduğu, bugün de milyarlarca yıl önce göründüğü gibi göründüğü konusunda fikir birliği vardı. Fakat şimdi bir sorun vardı: Kütleçekimi, cisimleri bir araya getirme, kümeleme eğilimindedir ve bu kümeleme, evrenin görünümünün değişmesi gerektiği anlamına gelir. Dolayısıyla Einstein, Genel Görelilik denklemlerine, kütleçekiminin kümeleme etkisine direnecek ve evrenin zaman içinde aynı görünmesini sağlayacak, "kozmolojik sabit" (Λ) olarak isimlendirdiği bir terim daha ekledi.

Hubble evrenin genişlediğini keşfedince, Einstein kozmolojik sabit fikrinden vazgeçmiştir (ve sonraları ondan "en büyük yanılgım" diye bahsetmiştir). Fakat bugün karanlık enerji, Einstein'ın 1917'de hayal ettiği şeyi yapıyormuş gibi

görünmektedir: o, kütleçekimi etkisine aykırı yönde işleyen esrarengiz bir kuvvettir ve şimdi evrenin genişlemesini hızlandırmıştır. Dolayısıyla kozmolojik sabit gerçekten de doğru bir fikir olabilir; hatta sabit olmayabilir bile: evrenimiz hızlanarak genişlemeye yalnızca 7 milyar yıl önce başladı. Bu fikir artık karanlık madde (Λ), soğuk karanlık madde (CDM) ve normal maddeden (yani yıldızlar, gezegenler ve biz) meydana gelen ve ACDM olarak bilinen Kozmoloji Standart Modeli'nin temel bir parçasıdır. Bu model, evrenin Büyük Patlama'dan günümüze nasıl evrildiğini açıklar ve karanlık enerji, şimdilik evrendeki en önemli şeydir. Yıldız ve galaksiler üzerinde yapılan en kesin incelemeler bize evrenin %68'inin karanlık enerjiden, %27'sinin karanlık maddeden ve yalnızca %5'inin normal maddeden meydana geldiğini söylemektedir. Parçacık fiziğindeki Standart Model'in malzemesi sadece bu %5'lik kısımdır.

Gelgelelim, parçacık fiziği karanlık enerjiyle ilgili bir şey söyleyebilir. Higgs alanı, enerji içerir ve tüm evrene yayılır. Belirsizlik İlkesi'ne göre, kuantum döngüleri, parçacık ve antiparçacık çiftleri, boş uzayda bile var olup yok olabilir. Başka deyişle, boş uzay aslında kuantum seviyesinde boş değildir ve kütleçekimi etkisine ters yönde işleyen şeyin bu enerji olması mümkündür. Ona karanlık enerji deriz. Fakat karanlık enerjiye ilişkin kuantum tahmini biraz tuhaf bir rakam telaffuz eder: Karanlık enerjinin etkisi kütleçekimi etkisinden 10^{120} kat fazladır! Boşluk faciası olarak bilinen bu çarpan, fizik tarihinin en kötü tahminidir. Eğer bana dünyada kaç kişi olduğunu soracak olsanız ve ben "7" diye cevap versem, gerçek rakamın milyarda (10^9'da) biri olan bir rakam söylemiş olurum. Eğer bana tüm evrende kaç yıldız olduğunu sorsanız ve ben "1" diye cevap versem, gerçek sayının 10^{29}'da birini söylemiş

olurum. Fakat bu 10^{120}'nin yanından yöresinden bile geçmez; bu çarpan kesinlikle ve müthiş derecede yanlıştır. Öyle yanlıştır ki, muhtemelen bize kuantum mekaniği ile Genel Görelilik Teorisi'nin nasıl uyumlu olabileceğini anlamaktan çok uzak olduğumuzu söylemektedir. Bu da karanlık enerjinin bir süreliğine daha bir gizem olarak kalacağı anlamına gelir. Bu da evrenin kaderinin de bir gizem olduğu anlamına gelir. Galaksiler ve yıldızlar gitgide ayrık hale gelirken, evren hızlanarak genişlemeyi sürdürebilir. Veya karanlık enerji yeniden "kapanarak" kütleçekim kuvvetinin her şeyi yeniden geri çekmesine izin verebilir. Karanlık enerjinin doğasını kavramadığımız sürece, hangisinin olacağını bilmemizin hiçbir yolu yoktur.

Parçacıklar neden bu kadar hafif veya kütleçekimi neden bu kadar zayıf?

Böylece gözümüzün önündeki aşikâr gerçeğe gelmiş bulunuyoruz: kütleçekimi. Gündelik yaşamlarımızda bize en aşikâr gelen doğal kuvvet kütleçekimidir fakat bunun nedeni, yalnızca Dünya dediğimiz devasa bir kütle topağının üstünde oturmamızdır. Parçacıklara göre, kütleçekimi önemsizdir ve Standart Model onu hepten görmezden gelir.

Standart Model, farklı güçlere sahip üç kuvvetle uğraşır: Güçlü kuvvet tipik olarak elektromanyetik kuvvetten yaklaşık 100 kat güçlüdür ve zayıf kuvvet arada bir yerdedir. Kütleçekimi kuvveti, Standart Model'deki kuvvetlerden çok daha zayıftır; onların 100'de 1'i veya 1000'de 1'i kadar değil, 10^{37}'de 1'i kadardır. LHC, Büyük Patlama'dan beri her gün her saniye milyarlarca proton çarpışması üretseydi bile, hâlâ bir kütleçekimsel etkileşim görmemiş olurdu. Kütleçekimi, Standart Model'de yoktur çünkü basitçe onu parçacıkları kullanarak

inceleyemeyiz. Bu aynı zamanda hiyerarşi problemi veya kütleçekiminin diğer tüm kuvvetlerden daha zayıf olmasının nedeni olarak bilinir.

Bu soruyu başka türlü ifade edersek parçacıkların neden bu kadar hafif olduğunu sormalıyız. Eğer tüm parçacıklar daha fazla kütle taşısaydı, aralarındaki kütleçekimsel etkileşimler, elektromanyetik etkileşimler kadar yaygın olurdu. Kuantum etkileri ile kütleçekiminin kabaca eşit olduğu noktaya Planck Ölçütü denir ve çok büyüktür: Böyle bir durumda parçacıklar protondan yaklaşık 10^{19} kat ağır olurdu (yani kabaca 20 mikrogram veya bir kum tanesi kadar olurdu; bu bizim için çok fazla olmasa da, bir parçacık için çok büyük bir ağırlıktır!) Parçacıklar neden bundan çok daha hafiftir? Bu bilhassa Higgs bozonu için bir sorun teşkil eder. Bu bozonun kütle üretmekte oynadığı eşsiz rol nedeniyle, Higgs için Feynman Diyagramlarında ortaya çıkan herhangi bir döngü, onun kütlesini artırmaya eğilimlidir. Tüm Standart Model parçacıklarının çok hafif olduğunu kabul etsek bile Higgs Bozonu aşırı ağır, bu döngüler nedeniyle Planck ölçütüne yakın olmalıdır. Ama öyle değildir.

Görünüşe bakılırsa, elimizde üç ölçüt vardır: kütleleri bir eV'den çok küçük olan nötrinolar, elektrondan en ağır parçacık olan üst kuarka kadar, kütleleri 0,5 MeV - 173 GeV arasında değişen Standart Model'in diğer parçacıkları ve yaklaşık 10^{19} GeV olan Planck ölçütü. Doğada neden bu yapı olduğunu bilmiyoruz ve Standart Model parçacıkları ve Planck ölçütü arasındaki boşluk heyecan verici yeni şeylerle dolu olabilir veya devasa boş bir enerji çölü de olabilir. LHC ve diğer deneyler, çöle bazı akınlar yaparak enerji ölçütlerini birkaç TeV'ye yükseltiyorlar fakat daha kat edecek çok yol var. Peki,

yol boyunca yeni parçacık vahaları var mı, yoksa bir sonraki keşif çok uzaklarda mı yatıyor?

Bir Her Şeyin Teorisi var mıdır?

Büyük soru, Planck ölçütünde ne olduğudur. Evren bu enerjiyle (hatta muhtemelen daha yüksek bir enerjiyle) başlamış olmalıdır ve bu noktada kuantum mekaniği ile kütleçekimi eşit bir rol oynamış olsa gerektir. Fakat bunu nasıl göreceğimiz, şimdiki kütleçekimi teorimizi (Genel Görelilik) ve kuantum mekaniğini nasıl birleştireceğimiz konusunda en ufak fikrimiz yok. Bunu yapmak, yıllardır teorik fizikçilerin rüyası olagelmiştir ve hiyerarşi problemini çözebilir, karanlık enerjinin gerçek doğasını gözler önüne serebilir ve bize gerçek Her Şeyin Teorisi'ni veya en azından şimdiye kadar bildiğimiz her şeyin teorisini verebilir.

2016 yılının başında, esasen Louisiana ile Washington'daki iki detektörün bileşimi olan, iyileştirilmiş LIGO (Lazer İnterferometre Kütleçekimi Dalga Gözlemevi) Einstein'ın Genel Görelilik öngörülerinden biri olan ve neredeyse 100 yıl önce yayınlanmış kütleçekim dalgalarını ilk kez gözlemlemeyi başardı. Kütleçekim dalgaları uzay ve zamandaki dalgalanmalardır, dolayısıyla bir dalga geçerken uzay ve zaman bozulur: nesneler arasındaki mesafe genişler ve daralır. LIGO tarafından tespit edilen kütleçekim dalgaları, iki kara deliğin birleşip tek bir kara delik oluşturmasından kaynaklanıyordu ve bu birleşme, 1,3 milyar ışık yılı uzakta, dolayısıyla 1,3 milyar yıl önce meydana gelmişti ve ışık hızında yolculuk eden kütleçekim dalgalarının bize ulaşması bu kadar zaman almıştı. Bahsedilen sayılar afallatıcıdır. Bir kara delik bizim Güneş'imizden 29 kat, diğeri ise 36 kat ağırdır. Kütleçekim dalgaları, birleşmeden 1/1000 saniye önce üretilmişti ve o an salınan enerji, görünen

tüm evrenin ürettiği enerjiden daha büyüktü. Gelgelelim, kütleçekim dalgaları bize ulaştığında, uzayda bir protonun yaklaşık binde biri boyutunda bir dalgalanmaya yol açtılar. Bu denli küçük dalgalanmaları tespit etmek, gerçekten de müthiş bir başarıydı ve LIGO bunu bir lazer ışını kullanarak yapmıştı. Bu ışın, ikiye bölünür; iki ışın 4 kilometrelik bir detektör boyunca farklı yönlere gönderilir, sonra yeniden birleşirler. Geçen kütleçekim dalgasına bağlı olarak detektörün uzunluğunda herhangi bir değişim, yeniden birleşen lazer ışınında, bir müzik aleti diğerine oranla biraz akortsuz olduğunda işitilen armoni gibi ortaya çıkar. İki detektörün sinyallerini karşılaştırmak, ikisinin de aynı minik dalgalanmayı aldığını gösterir. Bu Samanyolu'nun diğer tarafında 1 metre hareket eden bir şey görmek gibidir ve nihai kanıtı vermiştir. Bu gözlemden sonra, LIGO her yıl bunun gibi birkaç olgu tespit etmeyi başarmalıdır; evrene hepten yeni bir pencere açacaktır. Zaten çarpışan kara delikleri incelemenin bir başka yolu da yoktur!

Eğer Genel Görelilik uzay ve zamanda yumuşak bir eğilmeye dayanıyorsa, kuantum mekaniği şeylerin münferit miktarlarda geldiği fikrine dayanır. Eğer ışığı yakından inceleyecek olursak, onun esasen ayrı topaklardan, fotonlardan oluştuğunu görürüz. Kütleçekiminin kuantum teorisi, bize bunun kütleçekim dalgaları için de geçerli olduğunu söylerdi: Onları yeterince yakından inceleyebilseydik, ayrı topaklardan, gravitron olarak bilinen, kuantum kütleçekimi bozonundan meydana geldiğini görürdük. LIGO'nun gözlemlediği ilk kütleçekim dalgaları bir kuantum teorisine gerek kalmadan, Genel Görelilik tarafından tahmin edildiği gibidir fakat artık kütleçekim dalgalarını nihayet ölçebildiğimize göre, ilerleme kaydetmeye yakınız demektir.

Bununla birlikte, kuantum mekaniğinin nasıl işlediğini biliyoruz ve uzun zamandır bize diğer tüm kuvvetlerin başarılı

bir açıklamasını vermekte kullanılıyor, peki o zaman neden bugün kütleçekimi kuantum teorisini yazamıyoruz? Öncelikle kavramsal bir fark var. Kuantum mekaniği daima evrenin temelini oluşturan uzay ve zaman dokusu üzerinde işler. Parçacıklar daima bu yumuşak fonun önünde hareket eder, etkileşir. Fakat Genel Görelilik, dokunun kendisiyle ilgilidir. Madde ile enerjinin uzay ve zamanı nasıl birleştirdiğiyle ilgilidir ve kütleçekimine ilişkin bir kuantum teorisi, uzay ve zamanın "kuantize" olduğunu, yani topaklar halinde olduğunu söylerdi. Maddenin topaklar, yani parçacıklar halinde olduğunu söylemek, uzayın topaklar halinde olduğunu söylemekten büsbütün farklıdır. Bu, soluk mavi gökyüzündeki bulutları incelemeye ve gökyüzünün katı bir şey olmadığını, yalnızca atomların saçtığı fotonların bir koleksiyonu olduğunu fark etmeye benzer.

Bunu gözünüzde canlandırabildiğinizi varsayarak, Standart Model'deki diğer kuvvetlere benzer bir kuantum kütleçekimi teorisi inşa etmek mümkündür. Bu belirli bir dereceye kadar işler fakat kütleçekimi önemli olduğu anda, yani Planck ölçütüne yaklaştığında, yıkılır. Bu kuantum kütleçekimi matematiği, sonsuz cevaplar verir fakat artık yeniden normalleştirme teknikleri bile işe yaramamaktadır. Sonsuzlar bir türlü kaybolmaz. Biz gerçekten bir kuantum kütleçekim teorisi inşa etmeden önce, büsbütün farklı bir yaklaşıma, kuantum dünyasını kavramak için tamamen yeni bir alet çantasına, Her Şeyin Teorisi'ne ihtiyaç duyabiliriz.

Standart Model'in ötesinde

Şu anda parçacık fiziğinin durumu budur. Atomaltı dünyası iyi anlaşılmıştır fakat karanlık madde nedeniyle, oralarda bir yerde başka bir parçacık daha olduğunu biliyoruz. Ve kütle-

çekimi nedeniyle, şimdiki çerçeveye uymayan bir kuvvet olduğunu biliyoruz. Kuantum mekaniğinin kurallarını baştan mı yazmamız gerekiyor? Yoksa karanlık enerji bize kütleçekim kurallarını baştan yazmamız gerektiğini mi söylüyor? Bu ucu açık sorular, içinde yaşadığımız zamanı heyecan verici kılıyor; özellikle de artık atomaltı dünyasını evrenin büyük ölçekli yapısıyla bağlantılandırmanın yeni yollarını aradığımız için; işte parçacık astrofiziğinin alanı budur. Bu soruların bazıları çok geçmeden cevap bulabilir fakat kuantum kütleçekimi gibi diğer sorular, uzun zaman yanıtsız kalabilir. Deneysel bir fizikçi için, bu günler eşsiz önemdedir: Şu noktada yapılacak her yeni keşif, gerçekten de kavrayışımızda yeni bir devrime yol verebilir. Bu kitabın son iki bölümü, bir sonraki keşfin ne olabileceği ve ona nerede ulaşabileceğimize dair kimi fikirleri aktarıyor.

ONUNCU BÖLÜM

DEVRİM BURADA BAŞLIYOR

Standart Model eksiksizdir ve güzelce işler, ama bir noktada tıkanır. Onun tıkandığı noktaların kanıtlarını evrende görürüz: antimaddenin eksikliği, hiyerarşi problemi, karanlık madde, karanlık enerji vs. Bu problemlerin bazılarını çözmek için yeni bir fiziğe, daha önce görmediğimiz bir fiziğe ihtiyaç duyuyoruz. 20. yüzyılın ilk yarısındaki kozmik ışın deneyleri veya onu takip eden parçacık çarpıştırma deneylerinin fiziğine değil. Hatta en ender etkileşimleri arayan çok hassas nötrino deneyleri veya dünyanın dört bir yanında isabetli ölçümler gerçekleştiren diğer sayısız parçacık fizik deneyinin fiziğine değil.

Standart Model'deki problemler öyle çeşitlidir ki, pek çok farklı şey mi, yoksa hepsini çözecek bir keşif mi aradığımızı bilmek zordur. Elbette fikir kıtlığı yoktur ve bu bölümde en büyük teorilerin bazılarından, fizikte bir sonraki devrimin öncü adaylarından bahsedeceğim.

Süpersimetri

Şu sorunları çözer: Standart Model'in yapısı, hiyerarşi problemi, karanlık madde.

Parçacık fiziğinde en çok sevilen ve en nefret edilen teori olduğu için Süpersimetri'yle başlamalıyım. Kimilerine göre, Süpersimetri'nin var olmadığını bulmak, evrenle ilgili en şaşırtıcı keşiflerden biri olacaktır. Kimileri ise onu öldürüp yola devam etmek için sabırsızlanmaktadır.

Standart Model simetriler üzerine inşa edilmiştir. Ayar simetrileri, doğanın kuvvetlerine zemin teşkil eder ve CP gibi diğer simetriler, parçacıklara nasıl davranacaklarını dikte eder. Standart Model'in nasıl yapılandırıldığına bakarsak, orada birkaç tane daha olası simetri görürüz. Bunlar matematikte mümkün olan simetrilerdir fakat henüz doğada var olup olmadıklarını bilmeyiz. Süpersimetri, isminin önerdiği üzere, büyük olandır.

Dünyada iki tür parçacık vardır. Fermiyonlar (elektronlar, kuarklar vb.) tüm maddeyi meydana getirir. Bir de kuvvetleri ileten bozonlar (fotonlar, gluonlar vb.) vardır. Süpersimetri bunun hikâyenin yalnızca yarısı olduğunu söyleyerek meseleyi daha da simetrik hale getirir. Süpersimetri, her parçacığın bir "süper eş"i olduğunu söyler: Her fermiyonun bir bozon süper eşi, her bozonun ise bir fermiyon süper eşi vardır. Süpersimetri Standart Model'in tam kopyasını sunar ve hepten yeni isimler bulmak yerine, yalnızca fermiyon süper eşlerin önlerine ("süper"i temsilen) bir "s" gelir: elektron ile selektron; kuark ile skuark. Bozon süper eşler ise "ino" son ekini alır (açıkçası bunun nedenini bilmiyorum). W ile Wino; Higgs ile Higgsino.

Süpersimetri'nin ortaya çıkış nedenlerinden biri, Standart Model'in matematiği hakkında bildiklerimize dayanarak, sadece olası olmasıdır ve her olası simetri, doğada bir yerde gerçekleştirilmiş gibi görünmektedir. Bir başka neden ise estetiktir. Süpersimetri, bir parçacığın iki türe bölünmesini ortadan

kaldırır ve matematiği hem kolaylaştırır hem de güzelleştirir. Güzellik tanımlaması güç şeylerden biri olduğundan, bu tuhaf bir muhakeme gibi görünebilir fakat onu gördüğümüzde o olduğunu biliriz. Buna ek olarak, güzellik aynı zamanda fizikteki yeni fikirlerin ardında yatan kılavuz ilke olagelmiştir: Görelilik'i geliştirirken Einstein'a ve denklemini antimaddenin varlığını öngörecek kadar ciddiye alan Dirac'a kılavuzluk etmiştir. Başka bir tabirle, eğer Süpersimetri mümkünse ve her şeyi daha derli toplu kılıyorsa, gerçekten de var olmalıdır. Aksi takdirde, doğa fena halde zahmete girip bundan kaçınmış, bu sırada denklemleri çirkinleştirmiş ve biz de bunun nedenini açıklamak zorundayız demektir.

Süpersimetri aynı zamanda daha faydalıdır ve ekstra faydalarından birincisi, Higgs bozonunun kütlesine bir açıklama getirmesidir. Buradaki problem, Higgs bozonu ile Standart Model parçacıkları (döngüler) arasındaki etkileşimlerin Higgs bozonunun kütlesini gitgide yükselterek, ölçtüğümüz değerin çok üstüne çıkarmasıydı. Eğer Süpersimetri varsa, Higgs bozonu ile Süpersimetri parçacıklarının zıt etkiye sahip olmaları gerekirdi: Higgs bozonunun kütlesini aşağıya çekmeleri gerekirdi. Bu iki etki birbirini iptal ederdi ve Higgs'in Standart Model'deki diğer parçacıklara yakın bir kütleye sahip olması epey makul olurdu. Problem çözüldü.

Süpersimetri aynı zamanda karanlık maddeyi de açıklayabilir. En hafif Süpersimetri parçacığı, bir elektron ne kadar kararlıysa aynı şekilde kararlı olabilirdi: Bozunabileceği daha hafif bir şey olmazdı. Eğer bu Süpersimetri parçacığı elektrik yükü taşımıyorsa ve epey ağırsa, bizim aradığımız karanlık madde WIMP'i için mükemmel bir aday olabilir. Bir problem daha çözüldü.

Süpersimetri aynı zamanda, bize Standart Model'in yüksek enerjilerde çok daha kolaylaştığını düşündürür. Bu, Her Şeyin Teorisi hayalinin bir parçasıdır; Standart Model'deki farklı kuvvetleri tek bir kuvvet halinde birleştirmek. Bu halihazırda kimi yerlerde olmuştur: Elektrik ile manyetizma, aynı demir paranın iki yüzüdür ve elektromanyetik ve zayıf kuvvetler de birbirlerine Higgs mekanizmasıyla bağlıdır. Eğer tüm kuvvetler birleşirse, bir noktada hepsi aynı güçte olmalıdır ve Süpersimetri bunu gerçekleştirir. Güçlü kuvvet, yüksek enerjide güçsüzleşirken (Dördüncü Bölüm'de bahsettiğim asimptotik özgürlük niteliği), elektromanyetik ve zayıf kuvvetler, esasen daha güçlü hale gelir. Süpersimetri, bu kuvvetlerin aynı noktada birleşmesini sağlayarak bu evrime hafifçe ayar verir: Bazı çok yüksek enerjilerde, Standart Model'in tüm kuvvetleri eşit şekilde güçlüdür. Bunun gerçekten önemli olup olmadığını bilmiyoruz ve bunun meydana geldiği aşırı yüksek enerjiler düşünülürse, bunu asla öğrenemeyebiliriz. Fakat tüm kuvvetlerin bir şekilde eşit olduğunu önerdiği kesindir ve pek çok Her Şeyin Teorisi inşa etme girişimi, esasen Süpersimetri'nin var olmasını gerektirir.

Yani teorik olarak Süpersimetri merak uyandırıcıdır. Süpersimetri aynı zamanda deneysel olarak da cazip olmalıdır çünkü bize keşfedecek ve inceleyecek pek çok yeni parçacık verir. Fakat sorun şudur: Süper eş parçacıklar, Standart Model'deki eşleriyle aynı kütleye sahip olmalıdır ve durum bu olsaydı onları çoktan bulmuş olurduk. Gelgelelim, yıllardır süren arayışlara rağmen hiçbiri keşfedilmemiştir ve aslında Süpersimetri'nin var olduğuna dair kesinlikle elimizde hiçbir doğrudan kanıt yoktur. Oyun bitti. Eğer bir teori bir öngörüde bulunuyorsa ve o öngörünün yanlış olduğu kanıtlanıyorsa, o teori çöp kutusunu boylamalıdır.

Ancak bu Süpersimetri'nin hikâyesinin sona erdiği anlamına gelmiyor. Beklediğimiz gibi işlemeyen bir simetri örneğiyle daha önce karşılaştık: W ile Z bozonları fotondan çok daha ağırdır çünkü Higgs mekanizması zayıf kuvvet simetrisini kırar. Süpersimetri'ye benzeri bir şey olmuş olabilir: Simetri kırılmış, tüm süper eşleri Standart Model eşlerinden çok daha ağırlaştırmış ve çok uzağa, bizim erişemeyeceğimiz bir yere yollamış olabilir.

Bu, işleri daha da karmaşıklaştırır fakat bunun olması için Süpersimetri'nin içinde özgürlük olmalıdır. Süpersimetri'nin buna farklı yollarda ulaşan pek çok versiyonu vardır: Minimal Süpersimetrik Standart Model (veya Düşük Süpersimetrik Model, MSSM); sınırlı Minimal Süpersimetrik Standart Model (cMSSM) ve En Düşük Minimal Süpersimetrik Standart Model (NMSSM)! Bir de dört Higgs bozonlu Süpersimetri, ayrık Süpersimetri, R-parite ihlal eden Süpersimetri, kütleçekim aracılı veya anomali aracılı Süpersimetri kırılması vardır. Bu böyle devam eder. Süpersimetri uzun zamandır vardır ve insanlar çok uzun zamandır tüm olasılıkları incelemektedir.

Aslında Süpersimetri'nin neredeyse her şeyi yapma özgürlüğüne sahip olduğu pek çok olasılık vardır. Standart Model'in öngöremediğimiz 26 serbest parametresi, 26 sayısı vardır; onları ölçmek zorundayız. Süpersimetri'nin bazı versiyonlarının 100'ün üstünde böyle parametresi vardır. Süpersimetri parçacıklarının nasıl davranacağını belirleyen 100'ün üstünde parametre. Evet, Süpersimetri pek çok fazladan parçacık öngörür fakat bunlardan hangileri (eğer herhangi biri bunu yapıyorsa) deneylerde ortaya çıkmaya meyillidir? Özellikleri ne olabilir? Süpersimetri gerçekten de karanlık maddeyi açıklayabilir mi? Bu, tüm göstergelerin nerede kurulduğu-

na bağlıdır. Bu, Dünya Kupası'nı kimin kazanacağının takımların nasıl oynadıklarına bağlı olduğunu söylemeye benzer. Doğrudur fakat bir faydası yoktur. Süpersimetri'nin hemen her şeyi öngörme özgürlüğünün diğer yüzü, son kertede neredeyse hiçbir şeyi öngörememesidir.

Süpersimetri işte bu yüzden bu kadar uzun yaşamıştır: Bir deney ne zaman süperparçacıklardan iz bulamasa, bu serbest parametreleri bu süperparçacıkların birazcık daha ağır olacağı şekilde, birazcık daha erişilmez olacağı şekilde ayarlamak mümkündür. Asla net olmayarak, asla yanılmaz. Bu kedi fare oyunu, kırk yılı aşkın süredir devam etmektedir.

Fakat akıntı en sonunda tersine dönüyor olabilir. LHC 2015'te 13 TeV'de protonları çarpıştırmaya başladığından bu yana, artık aşırı ağır parçacıkları arayabiliyoruz. Eğer Süpersimetri'nin üstündeki perdeyi hâlâ kaldıramazsak, elbette var olmaya devam edebilir fakat bunun karşılığında yeni bir hiyerarşi problemimiz olur: Süpersimetri parçacıklarının neden Standart Model parçacıklarından çok daha ağır olduğunu açıklamak için yeni bir teoriye ihtiyacımız olur. Dolayısıyla, bir başka ezici kanıt yoksunluğuyla karşı karşıyayken, en sonunda Süpersimetri'den vazgeçme vakti gelebilir. En nihayetinde Süpersimetri çirkin bir gerçeğin yok edeceği bir başka güzel teori olabilir ve önümüzdeki beş yıl içinde bunun böyle olup olmadığını görmemiz gerekir.

Manyetik tekkutuplular

Şu sorunu çözer: Standart Model'in yapısı.

Elektrik ile manyetizma arasında tuhaf bir fark vardır. Parçacıklar ayrı yükler taşıyabilir: bir elektron negatif yüklüdür, bir proton pozitif yüklüdür. Fakat mıknatıslar daima çifttir. Bir çubuk mıknatısı ele alalım: pozitif ve negatif elektrik yük-

lerine denk gelen bir kuzey kutbu ve bir güney kutbu vardır. Fakat mıknatısı yarıya bölerseniz, ayrı bir "kuzey" mıknatıs ile "güney" mıknatıs elde etmezsiniz, yine kuzey ve güney kutupları olan iki tane daha küçük çubuk mıknatısınız olur. Kesmeye devam ederseniz, yalnızca gitgide daha küçük mıknatıslar elde ettiğinizle kalırsınız. Sadece kuzey veya güney kutuplu tek bir mıknatıs, bir manyetik tekkutuplu elde etmek imkânsızdır.

Manyetik tekkutuplular, biraz Süpersimetri'ye benzer. Eğer varlarsa, Standart Model'in denklemlerini basitleştirir ve güzelleştirirlerdi; ayrıca, Her Şeyin Teorisi olmaya aday pek çok teori onları kendi bünyesine dahil eder. Dolayısıyla belki de onları neden henüz bulamadığımızı düşünmeliyiz ve en iyi tahmin, onların aşırı ağır, LHC'de üretilemeyecek kadar ağır olmalarıdır. Evrende Büyük Patlama'dan kalma biraz artık olabilir fakat şimdiye dek, tabii şayet varlarsa, gözden kaçmayı başarmışlardır.

Yeni kuvvetler, yeni parçacıklar

Şu sorunları çözer: Standart Model'in yapısı, güçlü CP problemi, karanlık madde.

Süpersimetri ile tekkutuplular, var olan Standart Model'deki olasılıkların bazılarını keşfeder. Elbette ona pek çok yeni şey eklemek de mümkündür.

Bunların aşikâr olanlarından biri, yeni bir doğal kuvvet olabilirdi. Standart Model'deki kuvvetler, tek boyutlu yük (elektromanyetizmaya benzer), iki boyutlu yük (zayıf kuvvet) ve üç boyutlu yükü (güçlü kuvvet) kapsayan ayar simetrilerinde temellenir. Başka kuvvetler olabilir: Neden bir dört boyutlu veya beş boyutlu eklemiyoruz? Her şey mümkündür fakat bir yandan da, güçlü ve zayıf kuvvetler bunun için modeller sun-

sa da, bu kuvveti henüz hiçbir deneyde gözlememiş olmamızın bir nedeni olmalıdır.

Yeni bir kuvvet, güçlü kuvvet gibi hapsedilmiş olabilir ve böylesi bir aday, "teknikolor" olarak bilinir. Bizim temel olarak düşündüğümüz parçacıklardan bazıları, 1968'de kuarklarına ayrılan proton gibi, parçalanmaya başlarken, yüksek enerjili çarpışmalarda ortaya çıkardı. Alternatif olarak, yeni kuvvet zayıf kuvvet gibi aşırı ağır bir bozona sahip olabilir; bu durumda, W'nin ilk olarak beta bozunumunda ortaya çıkması gibi, bazı ender ve ağır şekilde bastırılmış etkileşimlerde ortaya çıkardı. Son olarak, yeni kuvvetin bozonu, basitçe sık sık etkileşmeyebilirdi: Güçlü CP problemini çözmek için bir fikir, hafif fakat tespit etmesi inanılmaz zor olan bir bozonla (aksion) gelen yeni bir kuvveti içermektedir. Bu bozon, aynı zamanda karanlık madde WIMP'i için bir başka adaydır.

Aynı zamanda karanlık maddenin bir parçacıktan fazla olması ihtimali vardır. Oralarda bir yerde, zengin ve çeşitli parçacık gruplarına sahip, neredeyse Standart Model'in bir paralel kopyası olan ayrı bir "karanlık bölge" olabilir. Fakat bu parçacıklardan hiçbiri Standart Model yüklerini (elektrik, renk veya zayıf) taşımaz ve Standart Model parçacıklarından hiçbiri de "karanlık yükleri" taşımaz. Dolayısıyla iki taraf birbirleriyle konuşmazlar. Bu tuhaf bir fikirdir; etrafımızda bizim göremediğimiz bir paralel dünya olabilir! Eğer bu paralel karanlık bölge Standart Model parçacıklarıyla etkileşmiyorsa, onu tespit etmek inanılmaz zor olur.

Bazı modeller, bilinen kuvvetleri daha büyük, 5 veya 10 boyutlu bir grupta birleştirir. Şu anda bildiğimiz kuvvetler, yalnızca bu büyük grubun farklı yanlarıdır ve şimdiye dek, tıpkı arkeologlar gibi, altta yatan şeyin yüzeyini kazıdık. Yeterince derin kazarsak veya yeterince yüksek enerjilere eri-

şirsek, tüm kuvvetlerin esasen birleştiğini görürdük. Bilinen kuvvetleri birleştiren büyük modellerin bazıları, daha ağır bir Z bozonu (Z') veya daha ağır bir W bozonuna (W') benzeyen bir bozon içerir. Kimileri, bir başka fermiyon nesli veya bildiğimiz parçacık türlerinin karışımı olan leptokuarklar gibi parçacıklar öngörür. Tüm bunlar mümkündür fakat bunlardan herhangi biri var mıdır? Yine, elimizde doğrudan kanıt yoktur.

Ekstra boyutlar

Şu sorunları çözer: hiyerarşi problemi, Büyük Birleşik Teori.

Standart Model'i (Süpersimetri gibi) daha eksiksiz kılmak veya onu (ekstra ayar simetrileri gibi) yeni şeyler için bir şablon gibi kullanmayı içeren fikirlere baktık, fakat kuralları tamamen değiştirmeye yönelik fikirler de vardır. Bu genellikle aşikâr olan gerçeği, yani kütleçekimini irdelemeye çalışmak için yapılır.

Bunun ilk örneği, hiyerarşi probleminin veya kütleçekiminin neden bu kadar zayıf olduğu sorusunun olası bir açıklamasını sunar: ekstra boyutlar. Biz dört boyutlu bir dünyada yaşıyoruz. Uzayda üç boyut var ve bunların her biri eşsiz bir yöne denk düşüyor: yukarı-aşağı, sol-sağ, ileri-geri. Aynı zamanda dördüncü bir boyut, yani zaman da var, fakat zaman içindeki hareketimiz bizim pek kontrol edebildiğimiz bir şey değil! Bildiğimiz tüm kuvvetler ve parçacıklar, bu dört boyut içinde hareket eder fakat ya daha fazla boyut varsa? Ya kütleçekiminin büyük çoğunluğu beşinci, altıncı vb. bir boyuta sızdığı için kütleçekimi bizim dört boyutlu dünyamızda bize çok zayıf görünüyorsa?

Öncelikle o eski problemi çözmemiz gerekir: Eğer bu gerçekse, neden bu ekstra boyutları göremiyoruz? Eğer varlarsa,

başlarına bir şey gelmiş olmalı. Bir olasılık, bizim fark edemeyeceğimiz kadar kıvrılıp küçülmüş ("kompaktlaşmış") olmalarıdır. Kıvrılmış bir ekstra boyut şöyle dursun, bir ekstra boyutun nasıl olabileceğini hayal etmek bile insan zihnini çok zorlayan bir şeydir. Ben onları kıyı şeritleri gibi düşünmeye eğilimliyim. Bir uydu görüntüsünden veya haritadan görüldüğünde, bir kıyı şeridi epey basit görünür: arada bir bir nehir veya körfezlerle bölünen epey düz, yassı kumsal parçaları. Yaklaşırsanız her şey karmaşıklaşır: Sahillerde daha fazla detay vardır, küçük akarsular görünür hale gelir vs. Gidip sahilde otururşanız, büsbütün yeni bir yapı katmanı görürsünüz. Su kayaların etrafından döner, farklı engellerin üstünden, altından geçer. Bu detay seviyesi, basit bir uydu görüntüsüne bakarken görünmez fakat sizin yürüyüşünüzü pürüzsüz bir plajda ya da kayalıkları aşarak yapmanız ciddi bir fark yaratır. Ekstra boyutlar, biraz, kıyı boyunca uzanan kayalıklara benziyor olabilir: Bizim gördüğümüz haliyle evrende önemli olamayacak kadar küçük, tıpkı uydu görüntüleri gibi olabilirler. Fakat kütleçekiminin diğer kuvvetlerden çok daha zayıf görünmesi, tüm bu kayalıklar ve çakıltaşlarının, yani tüm bu kıvrılmış ekstra boyutların üstünden geçmek zorunda olması ve bunu yaparken de gücünün büyük kısmını kaybetmesi olabilir.

Kompaktlaşmanın bir alternatifi, zar (membran) dünyalardır. Bizim dört boyutlu evrenimizin bir binanın sadece tek bir katını meydana getirdiğini hayal edin. Binadaki diğer katları oluşturan başka zarlar, bizimkine benzer başka evrenler olabilir. İşin zor yanı şudur: Standart Model tek bir katta işliyor fakat kütleçekim basamakları özgürce çıkıp inebiliyor, binada dilediğince dolaşabiliyor. Ben birkaç katlı bir binada çalışıyorum ve tüm binayı devriye gezen güvenlik görevlisinden

çok, yanımdaki odada çalışan kişiyi görüyorum. Diğer tüm kuvvetler tek bir katta sınırlıyken kütleçekiminin, tüm binayı kapsadığı için zayıf göründüğünü varsayın. Tıpkı kompaktlaşmada olduğu gibi, kütleçekim kuvvetinin büyük kısmı bu ekstra boyutlara sızarak kayboluyor olabilir.

Ekstra boyut teorisinin, 1920'lerde elektromanyetizma ile kütleçekimi beş boyutlu bir evrende birleştirmeye çalışan Kaluza-Klein teorisi kadar geriye giden pek çok versiyonu bulunmaktadır. 20. yüzyılda bu fikirlere karşı canlanan ilgi, Randall-Sundurm Modeli'ne, ADD Modeli'ne, ayar aracılığıyla işleyen modellere, büyük ekstra boyutlara, eğri ekstra boyutlara ve diğerlerine yol vermiştir. Tüm bu modellerin farklı güçleri vardır, kütleçekimi problemini farklı şekilde çözerler ve hepsi bunu yapmak için ekstra boyutları kullanırlar. LHC'de de farklı biçimlerde ortaya çıkacaklardır: yeni bir ağır bozon (veya bir dizi yeni ağır bozon), ekstra boyutlarda "kaybolan" enerji veya kimi farklı parçacık etkileşimleri.

Ekstra boyutların olduğu veya olmadığı bir kuantum kütleçekim teorisi oluşturmak mümkünse, aynı zamanda kuantum kara delikler de olabilir. Kara delikler genellikle devasa bir yıldız hayatının sonuna gelip çöktüğünde meydana gelir. Yıldızın kütlesi daha küçük bir alanda gitgide biriktikçe, kütleçekim kuvveti artar, ta ki ışık hızında giden fotonlar için bile kaçmak imkânsızlaşana dek. Bir kuantum kara deliği, bunun atomaltı versiyonu olurdu; bir yeni parçacık yağmuru içinde buharlaşarak neredeyse anında kaybolurdu. Bu, örneğin LHC'de muhteşem, eşsiz bir işaret meydana getirir, bir sürü W bozonu ateşlerdi.

Gelgelelim, pek çok insanın İsviçre'de kara delikler yapma fikrini ilginç bulmasının nedeni bu değildi! 2008'de bir grup kaygılı vatandaş, LHC'nin bir kara delik oluşturarak dünyayı

yok etmesinden endişelenip, LHC'nin düğmesine basılmasını engellemek için dava açtı. Bu kara delik hikâyesi insanlara CERN'de çalıştığımı söylediğimde muhtemelen bana en sık sorulan şeydir ve tıpkı "Tanrı Parçacığı" isminde olduğu gibi, belki de gerçekten reklamın iyisi kötüsü olmaz. Dünyayı yok etme ihtimali noktasında ciddi bilimsel değerlendirmeler yapıldı fakat en nihayetinde, eğer bir yüksek enerjili parçacık çarpışmasıyla dünyayı yok edecek bir kara delik yapılması mümkün olsaydı, bu uzun zaman önce olmuş olurdu. LHC bir laboratuvarda en yüksek enerjili çarpıştırmaları gerçekleştiriyor olabilir fakat laboratuvar ortamı dışında, çok daha özellikli bir yanı yoktur. Örneğin, kozmik ışınlar Dünya'nın atmosferine çarptığında bundan çok daha yüksek enerjili çarpışmalar sık sık meydana gelmektedir. Davanın sonucunda, bilimin sağladığı faydaların, yaratabileceği olası risklere alabildiğine baskın çıktığına hükmedilmiştir ve eğer bunu okuyorsanız, LHC henüz dünyayı yok etmemiş demektir.

Sicim teorisi ve parçacıksız parçacık fiziği

Şu sorunları çözer: Büyük Birleşim Teorisi, karanlık enerji ve aklınıza gelen hemen her şey.

Bildik parçacık fikrinden kurtulmaya dayalı birkaç teori vardır. Bunlar, ne kadar yakından bakarsak bakalım aynıymış gibi görünen "parçacık-olmayanlar" gibi tuhaf şeylerden, yakınlarda olan şeye göre özelliklerini değiştiren bukalemunlara dek çeşitlilik gösterir. Fakat bu türden en meşhur teori, parçacıkların yerine sicimleri koyar. Sicim teorisi, 1970'lerden beri vardır ve bir ara ciddi bir çözüm vaat ediyor gibi görünmüştür. Günümüzde, yıllar boyunca hiçbir sonuca ulaşmaksızın bilimcilerin değerli vaktini ve dünyanın parasını çarçur etmekle suçlanmaktadır.

Sicim Teorisi fikri basittir. Parçacıklar sonsuz küçük noktalar olan tuhaf şeyler değildir, belirli bir boyuta sahiptirler; ya yaklaşık 10^{-35} metre uzunluğunda ya da bir protonun milyarda birinin milyarda biri boyutunda kısa sicim parçaları veya ambalaj lastiği gibi minicik halkalardır. Sicim Teorisi'nin pek çok olumlu yanı vardır: kütleçekimini doğal bir biçimde tanımlar ve Standart Model'deki tüm kuvvetleri birleştirir. Yeniden normalleştirme tekniklerinin geliştirilmesinden önce kuantum mekaniğini zehirleyen sonsuzluklar, kısmen artık her şeyi sonsuz küçük bir nokta ölçeğine dek indirgemediğimiz için artık yoktur. Ne yazık ki, Sicim Teorisi aynı zamanda zalim denebilecek kadar zor bir matematik gerektirir ve birkaç farklı versiyonu bulunmaktadır. 1995'te bunların aynı fikri ifade etmenin değişik yolları olduğu gösterildiğinde büyük bir dönüm noktası yaşandı ve o aynı fikir artık M-Teorisi olarak bilinmektedir. Ne var ki, M-Teorisi'nin ne olduğu hâlâ net değildir.

Sicim Teorisi, genellikle Süpersimetri ve ekstra boyutlar (toplamda 11) gerektirir, dolayısıyla LHC'de bunları keşfetmezsek, bu Sicim Teorisi'ni kabul etmemizi daha da zorlaştırır. Fakat Süpersimetri'nin avantajı ve sorunu, hemen her enerjide var olabilmesidir, dolayısıyla onu LHC'de bulamasak bile, bu, kesinlikle Sicim Teorisi'ni öldürmez.

Hatta Sicim Teorisi ile deneylerde test edebildiğimiz şeyler arasında öyle az bağlantı vardır ki, ben bu teoriyi fizikten ziyade matematiğin bir alanı gibi görmeye meyilliyim. Sicim Teorisi'nin ardındaki matematiğin bir kısmı, başka alanlarda fayda sağlamıştır (örneğin, kuark gluon plazmasını açıklamıştır) fakat bu bizzat Sicim Teorisi'nin öngörülerde bulunmasıyla aynı şey değildir. Ve bu aynı zamanda şimdiki ters tepkinin de nedenidir: Kırk beş yıllık çalışmadan sonra hâlâ test edile-

bilir bir teori olmaktan çok uzaktır. Bir taraftan, Sicim Teorisi sadece, deneylerde veya evrenin herhangi bir yerinde erişebildiğimiz her şeyden uzak olan Planck ölçütünde bağlantılı hale gelir. Diğer taraftan, bana kalırsa, eğer Planck ölçütünde ne meydana geliyor olabileceği hakkında bir ipucu elde edeceksek, daha fazla bilgiye, erişebildiğimiz enerjilere daha yakın olan daha fazla deneysel keşfe ihtiyacımız vardır.

Olası tüm dünyaların en iyisi?

Şu sorunu çözer: evrenin inanılmaz olasılıksızlığı.

Bu bölüm tamamen daha derin bir açıklama arayışı hakkındaydı. Parçacık fiziğindeki bazı ucu açık soruları cevaplayabilecek bir teori, hatta belki de evren için mutlak bir talimat kılavuzu olan bir Büyük Birleşik Teori arayışı hakkında. Fakat böylesi bir teorinin varlığı, bazı ilginç sorular ortaya atar, çünkü evrene baktığımızda, burada olmamız epey olasılıksız görünür.

Sorun, serbest parametrelerde, henüz izah edemediğimiz o 26 sayıya dayanır. Örneğin, eğer W bozonu biraz daha hafif olsaydı Güneş biz evrimleşmeden çok önce tükenmiş olurdu. Eğer elektromanyetik kuvvet biraz da güçlü olsaydı, yıldızlardaki füzyon karbon üretmezdi ve bu bizim gibi karbon temelli yaşam formları için bir facia olurdu. Eğer Higgs mekanizması var olmasaydı, parçacıklar kütlesiz olurdu ve evrende ışık hızında uçuşurdu; atomlar oluşmazdı çünkü kütleçekimi madde topaklarını çekerek yıldızları meydana getiremezdi. Buna nasıl bakarsanız bakın, Standart Model'in parametreleri incelikli bir dengeye sahiptir. Bileşenlerini çok az yukarı veya aşağı çekerseniz, dramatik bir etkide bulunacaktır ve bunun sonucunda evren neredeyse hep soğuk, karanlık ve boş olacaktır. Eğer Standart Model'in parametreleri

daha derin bir teori tarafından kontrol ediliyorsa, evrenin bu şekilde görünmesinin temel bir nedeni olsa gerektir. Ve bunu bir mantığa oturtmaya çalışmak, fizikteki en afallatıcı etkinliklerden biridir.

Bu noktada neden ve sonucu netleştirmek önemlidir çünkü bu zeki tasarım gibi bir şeyin savunusu değildir. Ot, inekler onu yesin diye varlığa gelmemiştir; inekler ot bulduğu için onu yiyerek evrim geçirmiştir. Temel sabitler atomların meydana gelmesi, yıldızların yanması, bizim Büyük Patlama'dan sonraki 13 milyar yıllık süreçte evrendeki sayısız gezegenden birinde evrimleşmemiz için kurulmamıştır; şu işe bakın ki, temel sabitler tüm bunların mümkün olduğu bir evren üretmiştir. Temel gerçekler tamamen daha derin bir teori tarafından belirleniyorsa, kendimizi hem az çok engellenemez hem de çok şanslı görmeliyiz demektir.

Alternatif olarak, serbest parametreler daha derin bir teori tarafından açıklanmıyor olabilir; belki de yalnızca rastlantısaldırlar. Başka bir tabirle, evrenin engellenemez bir yanı yoktur ve biz kazadan ibaretizdir. Bu bir olasılıktır fakat çok düşük bir ihtimal olduğundan onu ciddiye almak güçtür. Bunun için örnek olarak Higgs bozonunun kütlesini kullanacağım. Önceki bölümde, bazı kuantum döngülerinin Higgs bozonunun kütlesini çok yükseğe itiyor olması gerektiğini yazmıştım. Belki de bu döngülerde süzülen tüm büyük sayılar rasgele dengelenerek Higgs bozonuna diğer tüm parçacıklara yakın bir kütle veriyordur. Bunun ne kadar olasılıksız olduğunu anlamak için, Ford şirketinin 1903'te kurulduğu günlere dönerek hisse senedi fiyatlarına bakalım. O zamandan beri büyük değişiklikler oldu: iki dünya savaşı, 1973 petrol krizi, 21. yüzyılın başındaki SUV furyası ve 2008'deki finans krizi. Şimdi 1903-2008 arasında rasgele herhangi iki gün seçin ve o

iki farklı günün öğle saatlerindeki hisse senedi fiyatlarına bakın. Elbette tamamen, kuruşu kuruşuna aynı olabilirler fakat bu kesinlikle çok düşük bir ihtimaldir! Higgs döngülerindeki sayıların rasgele dengelenmiş olması ise bundan daha da olasılıksızdır.

Bu doğallık fikrine götürür. Eğer bir teori aşırı "ince ayar"a, etrafımızda gördüğümüz evreni üretmek için son derece düşük ihtimalli bir dizi olguya gereksinim duyuyorsa, o halde söz konusu teorinin doğru olması son derece düşük olasılıklıdır. Süpersimetri örneğine dönecek olursak, LHC onu bulmasa bile Süpersimetri teknik olarak hâlâ varlığını sürdürebilir fakat bu çok "doğaya aykırı" görünebilir. Süpersimetri parçacıklarını çok ağır kılmak için pek çok parametre son derece belirli değerlere ayarlanmalıdır ve ince ayara duyulan bu artan bağlılık, pek çok insanın ondan umudu kesmesine yol açabilir.

Yani ya Standart Model'deki parametreler daha derin bir teori tarafından belirleniyor, ya da tamamen rastlantısallar. Bu senaryoların hiçbiri tatmin edici sayılmaz çünkü içinde yaşadığımız evren, çok olasılıksız, fazla ince ayarlı görünür. Fakat bir alternatif vardır. Temel parametreler rastlantısal olabilir fakat hiç de ince ayarlı olmamaları mümkündür. Bir çoklu evrende yaşıyor olabiliriz.

Çoklu evren, isminden anlaşılacağı üzere, pek çok, hatta belki sonsuz sayıda evrendir. Bizim evrenimizi başlatan Büyük Patlama, sayısız başka patlamanın yalnızca biri olabilir ve tüm bu ayrı evrenlerde, temel parametreler farklı kurulmuş olabilir. Yeteri kadar çok evren olursa, tıpkı bizimki gibi görünen bir evrenin var olması kaçınılmaz bir şeydir. Bu fikrin biraz daha kolay kavranır versiyonu, yalnızca tek bir

evren olduğunu fakat bu evrenin bizim sandığımızdan çok daha büyük olduğunu varsaymaktır. Temel parametreler bu devasa evren boyunca mekândan mekâna değişebilir ve engellenemez biçimde, bizim değerlerimize sahip oldukları bir bölme vardır.

Hem çoklu evren hem de bölmeli evren fikirlerinde, antropik ilke denen bir şey uygulayabiliriz. Bu ilkeye göre, bizim Büyük Patlama'mız veya evren bölmemizin özel bir yanı yoktur fakat temel parametrelerin bu değerlerde olduğu bir yerde evrim geçirmemiz de şaşırtıcı değildir. Temel parametreler biraz farklı olsaydı, burada evrimleşip onların keyfini süremezdik! Piyangoyu kazanma ihtimalimiz çok az olsa da, yeteri kadar çok sayıda insan bilet aldığında, bir yerlerde birinin başına talih kuşu konması neredeyse kaçınılmaz bir şeydir. Ve işte biz de kazanan evrendeyiz.

Bahisleri alalım...

Bu bölümde bahsedilen tüm teorilerin zayıf ve güçlü yanları vardır fakat şimdilik hangisinin doğru olduğunu söylememizin bir yolu yok; tabii aralarından biri doğruysa. Deneylerde onların öngörülerini aramak için de ciddi bir vakit harcandı ve şimdiye dek başarı sağlanamadı. Bilimsel olarak elbette bu bakmaya devam etmemiz anlamına gelir. Veri bize doğru cevabı verecektir. Fakat bu sırada muhtemelen benim düşüncemi öğrenmek istiyorsunuzdur.

Sorulacak ilk soru, teorilerden hangisinin esasen test edilebilir olduğudur ve cevap açıktır. Süpersimetri, ekstra boyutlar ve yeni parçacıklar veya doğal kuvvetler LHC'de ortaya çıkabilir. Tekkutuplulara erişmek mümkün olmayabilir ve Sicim Teorisi ise öylesine erişilmezdir ki, onu test etmenin herhangi bir yolunu hayal etmek bile güçtür.

Ben mi hangisini seviyorum? Gerçekten de bir Her Şeyin Teorisi'ne yaklaştığımıza inanmakta zorlanıyorum. Halihazırda test edebildiğimiz şeyler (1 TeV civarındaki "elektrozayıf ölçüt") ile Planck ölçütü arasındaki mesafe öyle büyük ki, yol boyunca keşfedilecek pek çok şey olduğunu düşünmekten hoşlanıyorum. Bu nedenle, eğer Süpersimetri bir sonraki keşfimiz olursa gerçekten hayal kırıklığına uğrayacağım. Onun cazibesinin farkında olsam da, neredeyse fazla derli toplu göründüğünü söylemeliyim. Ve öyle çok sayıda sorunu çözmeyi vaat ediyor ki, eğer başarılı olursa gerçekten de bize yapacak iş kalmayabilir; bu, ihtiyacımız olan şeyin Süpersimetri ve Sicim Teorisi olduğu anlamına gelir.

Gelgelelim, eğer Süpersimetri gerçekten çürütülebilirse (ki bu da ne yazık ki neredeyse imkânsız görünüyor) bu Büyük Birleşik Teori için pek çok fikri esaslı biçimde yeniden değerlendirmemizi gerektirirdi. Bu, tam da doğanın bize geçmişte yaptığı türden ve gelecekte de yapacağını umduğum pek çok sürprizden biridir.

Diğer adaylardan, ekstra boyutlar fikrini ilgi çekici buluyorum. Bu fikir, "kuralları değiştirmeyi" gerektir ve hem daha radikaldir hem de evreni daha derin ve esrarengiz bir yer kılar. Bu tam da bizi bekleyen oyunbozan tarzda bir fikirdir. Sicim Teorisi ve çoklu evrenlere gelince; açıkçası bir deneyci olarak ne söyleyeceğimi bilmiyorum. Bunların gerçek olup olmadıklarını bir gün anlayabiliriz fakat bunun yakın bir tarihte olmayacağı kesin! Sicim Teorisi ancak dolaylı olarak deneye tabi tutulabilir; tıpkı Pauli'nin nötrinonun varlığını öngörmesi gibi. Beta bozunumundaki enerjiyi dengelemenin tek yolu, görünmez bir parçacık sunmaktı ve belki de Sicim Teorisi en nihayetinde evrendeki ince ayar ve kuantum kütleçekimi gibi şeyleri açıklamanın tek yolu olacak. Fakat şimdilik, bana ka-

lırsa Sicim Teorisi'nin tek mümkün cevap olduğu noktadan çok uzaktayız.

Bu da bizi tekrar bu kitaba başladığım noktaya getiriyor: Şu anda ihtiyacımız olan, yeni deneysel verilerdir. LHC veya başka bir yerde yapılacak yeni bir keşiftir. Bizi doğru yöne sokacak bir şeydir çünkü şu an bilinmeyen topraklara ilerlemekteyiz. Önümüzdeki yıllarda yürüteceğimiz araştırmalar esnasında, bu bilinmeyen topraklarda ilerlemeye devam edecek miyiz yoksa duracak mıyız, buna karar vereceğiz. Bir sonraki bölümde, yeni arayışlarda sınırı zorladığımız deneylerden bahsedeceğim.

ON BİRİNCİ BÖLÜM

GÜZELLİK ARAYIŞI

Bilim kısır bir gerçek koleksiyonu değil, dünya hakkında bildiklerimizin bir listesidir. Bilim aktif bir süreçtir. Yeni bilgi bulmakla ilgilidir. Bilinmeze ilerlemek, olup biten ve olabilecek şeylerle ilgili yeni bir resim, yeni bir teori ortaya koymak, sonra da o teoriyi test etmektir. Bilim soru sormak ve cevap aramaktır. Ve tüm iyi bilimin alametifarikası, doğru zamanda doğru soruyu bulup sormaktır.

Parçacık fiziğinde pek çok büyük problem, Standart Model'de de cevaplayamadığımız pek çok soru olduğunu biliyoruz. Bu problemleri çözmeye çalışan pek çok yeni teorimiz var ve artık onları test etmemiz gerek; yeni deneysel veri toplamalı ve bu teorilerin ona uygun olup olmadığına bakmalıyız. Fakat doğru soruyu bulmamız gerek. Soru, çok genel olamaz. Örneğin, "Karanlık madde bir süpersimetrik parçacık mıdır?" olamaz. Onu açmalı, daha test edilebilir bir soru bulmalıyız: Karanlık madde bir Süpersimetri parçacığı ise bu Süpersimetri'nin var olması gerektiği anlamına gelir. Eğer Süpersimetri varsa, pek çok, Standart Model'in her bir parçacığı için bir tane Süpersimetri parçacığı olmalıdır. Tüm bu Süpersimetri parçacıkları varsa, onları bulabilmemiz gerekir. Dolayısıyla

karanlık maddenin bir Süpersimetri parçacığı olup olmadığını sormak yerine, öncelikle Süpersimetri için bir kanıt bulup bulamayacağımızı sormalıyız.

Bu, aralarında ekstra boyutlar, teknikolor, kuantum kütleçekimi vb. diğer tüm teoriler için de geçerlidir. Test edilecek pek çok teori vardır ve hepsini test etmek isteriz. Fakat deneysel açıdan, pragmatik olabiliriz. Yeni fizik nasıl biçimlenecekse biçimlensin, bize yeni parçacıklar veya yeni etkileşimler sunacak. Bu teorilerden birini veya hepsini test etmenin ilk adımı, yeni bir parçacık bulmak veya şu an bildiğimiz parçacıkların sıra dışı şeyler yaptıklarını tespit etmektir. Bu da LHC'de ve dünyanın diğer bölgelerindeki daha küçük deneylerde şu an yapmakta olduğumuz şeydir. Bu bölüm, şu an bilimde yaşananların, evrendeki gizli güzellik ve onu açıklayabilecek yeni fizik arayışı için bir kılavuzdur.

Çıkıntı avı 2

Yeni fiziğin en aşikâr işareti yeni bir parçacıktır. Yeni parçacıklar bulmanın en iyi yolu daha önce bakmadığımız bir yere bakmak, yani yüksek enerjiye gitmektir. LHC, İkinci Çalışma deneylerine 2015'te başlamıştır ve şimdi 13 TeV'de protonlar çarpıştırmaktadır. Bu enerji, Birinci Çalışma'nın 8 TeV'lik rekorunu ciddi oranda aşmıştır ve şimdiye kadar bir laboratuvar ortamında erişilen en yüksek enerjidir. Böylece, yeni fizik avı da başlamıştır.

Yedinci Bölüm'de bu arayışların temel prensibinden, yani çıkıntı avından bahsetmiştim. Her yeni parçacık muhtemelen neredeyse anında bozunacaktır ve bozunduğu şeylerden yeniden yapılandırılmalıdır. Bu, belirli nitelikleri olan çarpışmalar görmeye başlamamız anlamına gelir; örneğin yeni bir parçacığın kütlesine eklenen iki foton gibi. Bir çarpışma gru-

bunu –bir çıkıntıyı– bulursanız, yeni bir parçacık bulmuşsunuz demektir.

Higgs arayışı sırasında, teori bize kabaca neye bakmamız gerektiğini söyledi ve bu arayışın yürütüleceği sahayı daraltmaya yardımcı oldu. Şimdi pek çok teori test etmek istiyoruz, dolayısıyla hem ATLAS hem de CMS 100'ü aşkın arayışı sürdürmekte, farklı çarpışma türlerinde çıkıntılar aramaktadır. Bu çarpışmalar arasında, iki foton, iki elektron, iki müon, pek çok elektron, müon ve fıskiye, fıskiyeler ve kayıp enerji (bir nötrino alâmeti), aklınıza gelebilecek her türlü şey vardır ve burada amaç, oralarda bir yerlerde olabilecek her şeyi yakalamak adına ağımızı olabildiğince geniş sulara atmaktır.

Tüm bu aramaların yine iki elektron, iki foton vb. üreten ve bunları tanımlamak için ciddi oranda teorik öngörülere bağlı olan farklı süreçler, farklı arka planlarla da ilgilenmesi gerekmektedir. Bir başka komplikasyon daha vardır: Bu kadar çok yere bakmak, yanlış alarm riskini de artırır. Bu "çoklu karşılaştırma problemi" olarak bilinir fakat parçacık fiziğinde biz ona "başka yere bak etkisi" deriz. Çarpışmaların rastlantısal doğası, bazen arka plan olgularının bir şekilde bir grup halinde belirerek bir çıkıntıyı andıran bir şey üretebilmelerine neden olur. Tıpkı bir demir paranın bazen art arda tura gelmesi gibi; çok düşük ihtimaldir fakat olabilir. Fakat şimdi sadece bir arama değil, 100'ün üstünde arama sürdürüyoruz ve bu aramaların birinin bir yerlerde sahte bir çıkıntı bulması epey düşük ihtimaldir; 100 demir parayı yazı tura atarsanız, biri mutlaka beş kez art arda tura gelecektir fakat bu yeni bir şey keşfettiğimiz anlamına gelmez.

Bununla başa çıkmanın farklı yolları vardır fakat altın standart, "5σ" şartıdır: arka plan sinyallerinin rastlantısal küme-

leşmesinin yol açması sonucu yalnızca 3,5 milyonda 1 ihtimalle meydana gelebilecek denli büyük bir çıkıntı. Art arda 22 kez tura gelen bir demir para gibi; yüz tane, hatta bin tane demir parayı atın, bunun olması yine de çok düşük ihtimaldir. Dolayısıyla, bir 5σ'lık çıkıntı bulursanız ve onu bir başka deneyle onaylatırsanız, bir keşif yapmışsınız demektir.

2013'te Birinci Çalışma'nın tam sonunda, bir W ve Z bozonuna bozunan yeni bir ağır parçacık aranıyordu. Bu birkaç teori tarafından öngörülmüştü. Arayış, her birinin bir kuark ve antikuarka bozunduğu, toplamda 4 fıskiye oluşturduğu olgulara odaklanmıştı ve fıskiyeleri birbirine eklemek, küçük bir olgu kümesi, yaklaşık 2 TeV'lik kütlesi olan yeni bir parçacık önererek küçük bir çıkıntı tespit etti. Bu çıkıntının değeri 3,4σ idi, yani bir keşif iddiası için yeterli olmamakla birlikte, ilginç olduğu kesindi. Gösteri en heyecanlı yerinde kesildi çünkü o sırada iyileştirme çalışmaları için LHC faaliyetlerine iki yıl ara verildi ve 2015'te İkinci Çalışma'da aynı çıkıntının belirip belirmeyeceğini görmek için sabırsızlanıyorduk. Ne yazık ki, şimdilik ondan herhangi bir iz yok. Art arda beş kez tura gelen o demir parayı alıp yazı tura atmayı sürdürün. Eğer demir paranın sıra dışı bir yanı yoksa, eninde sonunda kabaca eşit sayıda tura ve yazı gelecektir. Küçük çıkıntılar gelip geçer ve herhangi bir keşif duyurulmadan önce birkaç tane daha görmek isteriz. Fakat gerçek bir çıkıntı ortaya çıkarsa, işte devrim o an başlar.

Gözler önünde saklanmak

İş bir çıkıntı bulmakla bitmez, daha yapacak çok şey vardır. Bir sonraki adım, ona neyin yol açtığını, onu elimizdeki pek çok teoriden hangisinin tanımlayabildiğini bulmaktır. Keşiften kavrayışa geçeriz.

Bu süreç aslında LHC'nin çoktan bulduğu çıkıntı, yani Higgs bozonu için halen sürüyor. O gerçekten de Standart Model'de öngörülen parçacık mıdır? Yoksa Higgs bozonunun süpersimetrik eşi midir? Hepten başka bir şey olamaz mı? 2012'de ilk duyuru tedbirliydi: "125 GeV kütleli yeni bir parçacık" keşfedilmişti. Higgs'den bahsedilmedi çünkü o sırada çıkıntıya gerçekten neyin yol açtığı konusunda pek az şey biliyorduk. Altı ay ve biraz daha ölçümden sonra, yeni parçacığın "bir Higgs bozonuyla uyumlu" olduğu sonucuna varıldı. Veri analiziyle geçen bir altı aydan sonra daha cesurca, "Standart Model'le uyumlu bir Higgs bozonu" keşfedildiği açıklandı.

Pek çok insanın bu parçacığın var olduğuna inandığı kesin fakat LHC'nin bu hediyeyi erkenden vermesi, bizim kutuyu açmayıp içindekine bakmayacağımız anlamına gelmiyor. Standart Model bize Higgs'le ilgili pek çok şey söyledi: hiçbir elektrik yükü olmamalıydı (doğrulandı), spin atmamalıydı (doğrulandı) ve Standart Model'deki diğer tüm parçacıklara kütle vermeliydi. Bu nokta hâlâ doğrulanmamıştır ve benim üzerinde çalıştığım şeylerden biridir.

Fotonlara, Z bozonları ile W bozonlarına bozunan Higgs bozonunu ölçtük. Fakat soru, onun aynı zamanda fermiyonlara bozunup bozunmadığıdır. Başka deyişle, Higgs mekanizması madde parçacıklarına, kuarklar ile leptonlara da kütle verir mi?

Standart Model'de fermiyon kütleleri, Higgs alanıyla etkileşimlerinin gücüyle belirlenir: Etkileşim ne kadar güçlüyse, parçacıklar o kadar ağır olur. Aynı şey Higgs bozonu için de geçerlidir ve büyük ihtimalle en ağır parçacıklara bozunacağı anlamına gelir. Üst kuark çok ağırdır. Higgs bozonu, 125

GeV'lik kütlesiyle, her biri 173 GeV ağırlığındaki bir üst kuark ile antikuarka bozunabilmek için Belirsizlik İlkesi aracılığıyla "enerji ödünç almak" durumunda olurdu. Dolayısıyla Higgs'in etkileştiğini görmemizin en çok mümkün olduğu fermiyonlar, ikinci ve üçüncü en ağır fermiyonlar, yani alt kuark ile tau leptondur.

Higgs bozonu, aslında deney zamanının yaklaşık %58'inde bir alt kuark ile antikuark çiftine bozunmalıdır fakat bunun olduğunu hiç görmedik. Bu temel olarak bir deneysel problemdir: LHC devamlı olarak kuark ve gluon üretir, dolayısıyla Higgs bozonundan minicik ekstra bir katkı bulabilmek neredeyse imkânsızdır. Önümüzdeki birkaç yıl içinde, büyük ihtimalle bunu yapmak için yeterli veriye sahip olacağız fakat bunu gerçekleştirmek için yine de veri analizi numaralarının hepsine ihtiyacımız olacak. Tau lepton analizi biraz daha kolaydır ve son zamanlarda bu bozunumun ilk net işareti tespit edildi. Higgs'in alt kuarklara bozunduğunu beklediğimizden daha sık görsek de görmesek de, bu bize keşfettiğimiz Higgs Bozonu'nun Standart Model öngörüsünden daha ilginç bir şey olduğunu söyleyecektir. Belki de bu parçacık gerçekten de Süpersimetri'nin öngördüğü Higgs bozonlarından biridir. Belki de Süpersimetri'yi çoktan bulduk fakat farkında değiliz.

Yasaklı penguenler

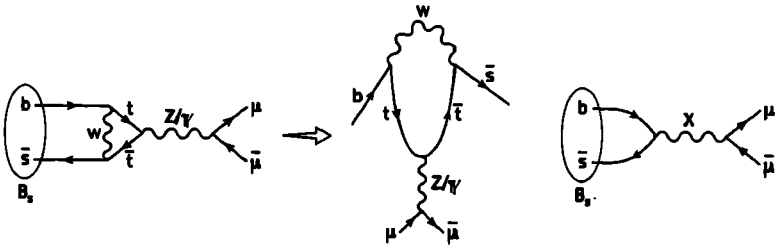
LHC yalnızca çıkıntı avı ve Higgs Bozonu'yla ilgilenmez. Aynı zamanda ölçümlerin kesinlikleri fikrine dayalı, büyük çeşitlilikte bilimler de yapılmaktadır. Standart Model'de açıklar, sıradışı bir şeyler aranır. QCD İkinci Çalışma'da ulaşılan yüksek enerji seviyesinde kuark ile gluonların davranışlarını hâlâ tanımlayabilir mi? Ayar bozonları daha küçük parçacıklara parçalanabilir mi? Şu an bildiğimiz parçacıklarla ilgili ayrın-

tılı bilgileri kontrol etmek, olan biten başka şeyleri de ortaya çıkarabilir.

Bu hassas ölçümler, bir çıkıntı avından daha güçlü bile olabilir ve zayıf kuvvetin keşfi güzel bir örnektir. İlk ipuçları, bir aşağı kuarkı bir yukarı kuarka dönüştüren ve bir elektron üreten beta bozunumla gelir; bu süreç, o sıralar bilinen hiçbir etkileşimle mümkün değildi, dolayısıyla büsbütün yeni bir doğal kuvvet içeriyor olmalıydı. Eğer LHC'de bir şey, Standart Model'in kurallarının yasakladığı bir şey meydana geldiğini görürsek, bu, yeni bir doğal kuvvet olduğunun net bir işareti olacaktır. Penguenler gibi.

Bu hikâye 1977'de başlar. Aşağı kuark yenilerde keşfedilmiştir ve teorisyen John Ellis, CERN'de onun sıra dışı bozunum biçimlerini anlatan bir makale üstünde çalışmaktadır. Parçacık etkileşimleri üzerine yazılmış çoğu makale gibi, bu da belirli bir süreci resmeden bazı Feynman Diyagramları içeriyordu. Gelgelelim, bu Feynman Diyagramları biraz farklı görünüyordu. Belki biraz kuşa benziyordu. Ellis, bir dart oyununda deneyci Melissa Franklin'le yaptıkları bir bahsi kaybetmişti ve ceza olarak bir sonraki makalesinde "penguen" sözcüğünü kullanmak zorundaydı. Kolay iş değildi bu. Ellis'in bulduğu çözüm, diyagramlardan biriyle biraz uğraşmak oldu.

Bu penguen diyagramı, Standart Model'de neredeyse yasaklı bir şeyin örneğidir. Bu şey bir müon ile bir antimüona bozunan B_s hadronudur (bir aşağı kuark ile acayip antikuark). Bu süreç, ancak Belirsizlik İlkesi nedeniyle mümkün olabildiği için beta bozunumuna benzer. Diyagramdaki sanal parçacıklar, içerilen diğer her şeyden çok daha ağırdır: Beta bozunumu genellikle birkaç MeV enerji salar ve bu bir W bozonu yapmak için gereken 80 GeV'den bir hayli azdır. Dolayısıyla



Solda, Standart Model'deki $B_s \rightarrow \mu\mu$ ve bir penguen gibi görünmesi için çizilmiş yeni hali. Sağda, bu tepkinin bir parça yeni fizikle nasıl değişeceğini gösteren çizim.

enerji "ödünç alınmalıdır" ve bu ödünç enerjinin büyüklüğü, bu süreci ender kılar. Penguen diyagramında, bir W ile üst kuarklar içeren bir döngü vardır; bu, daha da fazla enerji ödünç alınması gerektiği anlamına gelir ve bu süreci inanılmaz ender kılar. Ancak W ile üst kuarkların yerine birkaç Süpersimetri parçacığı koyarsanız veya direkt diyagramı kaldırıp yerine bir başka yeni teoriden parçacıklar içeren çok daha basit bir başka diyagram koyarsanız, bu süreç çok daha sık meydana gelebilir. B_s hadronlarının sık sık müonlara bozunduğunu görmek, yeni fiziğin gür ayak sesleri olurdu ve Feynman Diyagramında yeni parçacıklar yapmak için gereken enerji Belirsizlik İlkesi kullanılarak ödünç alınabildiğinden, bu ölçüm çok ağır parçacıklara, çıkıntı avlarının erişiminin çok ötesindeki yeni fiziğe karşı hassastır.

Yıllar süren arayıştan sonra LHC bile CMS deneyleri 2013'te bu gözlemlemesi zor B_s bozunumunu gözlemlemeyi başardı. Fakat tıpkı Standart Model'de öngörülen minicik, küçücük oranda; yani yeni fizikle bağlantılı görülebilecek bir artışla değil. Bu, deneylerin ne kadar hassaslaştığının, veriden her bir bilgi parçasını, Standart Model'in ötesinde olabilecek şeyin her bir olası ipucunu nasıl uğraşıp çıkardığımızın bir başka örneğidir.

Ne var ki, başka yerlerde de çatlaklar ortaya çıkmaktadır. B_s ölçümü, penguen diyagramlarının tanımladığı ender süreç arayışlarından yalnızca biri ve yeni fiziğin ipuçlarıdır ve LHCb aynı zamanda farklı türde bir B hadronunun tau leptonları veya mü leptonlarına bozunma oranını da ölçmüştür. Standart Model, bu iki farklı bozunmanın eşit şekilde mümkün olduğunu söyler fakat ölçümler, birinin diğerinden $3{,}9\sigma$ değerinde daha sık olduğunu ortaya koymuştur. Bir keşif iddiasında bulunmak için gereken 5σ olmasa da, kesinlikle ilginç. Ve bir kez daha, İkinci Çalışma verileri bize bunun gerçekten de yeni fiziğin ilk ipucu olup olmadığını söyleyecektir.

Kesinlik ihtiyacı

LHC'den uzakta, Standart Model'de en büyük kesinlikle bilinen niceliklerden bazılarını test eden başka ölçümlere adanmış bir dizi deney yürütülmektedir. Sıra dışı bir şey aranıyorsa, buraya bakmak iyi olur.

Nihai ender süreç, proton bozunumudur. Proton, parçacıklar düşünüldüğünde, epey ağırdır, yaklaşık 1 GeV'dir, fakat Standart Model'de protonun bozunmasına izin veren, çizebileceğimiz bir Feynman Diyagramı, hiçbir mekanizma yoktur. Kimi kararsız atom çekirdeklerinin içinde, bir protonun bir beta bozunumundan geçerek biraz daha ağır olan nötrona dönüşmesi olumlu olabilir fakat protonlar genellikle tamamen kararlıdır. Yeni fizik ortaya çıktığında bu değişebilir.

Protonun ömrünü ölçmek için, esasen bir sürü protonu bir detektöre koymak ve çok ender bir sürecin cereyan etmesini beklemek gerekir. Dev nötrino detektörleri bu konuda çok başarılıdır. Şimdiye kadarki en hassas ölçüm, yaklaşık 50.000 ton saf su, yani bir sürü proton içeren Süper-Kamiokande De-

neyi'nde gerçekleştirilmiştir. Eğer protonlar gerçekten de bozunuyorsa, bu rastlantısal bir kuantum mekaniği süreci olurdu: Bazıları hızla, bazıları daha yavaş bozunurdu ve ortalama ömür, bu ikisinin ortasında bir yerde olurdu. Dolayısıyla eğer belirli bir zamanda herhangi bir bozunum olmazsa, ortalama proton ömrünün çok daha uzun olması gerektiğini söylemek mümkündür ve daha önce bir bozunum görmedikleri için Süper-Kamiokande ortalama proton ömrünün 10^{34} yılın üstünde olması gerektiğini söyleyebilmiştir; bu sayıyı bir çerçeveye oturtmak için, evrenin yalnızca $13{,}8 \times 10^9$ yaşında olduğunu söyleyelim! Protonun inanılmaz kararlılığı, bizi meydana getiren tüm atomlar için iyi bir şeydir fakat pek çok Büyük Birleşik Teori'lerin katili olmuştur: Müthiş bir fikir bulurken, protonun bozunmasına izin veren bir etkileşim sunmakta dikkatli olmak gerekmektedir.

Başka pek çok hassas ölçüm ve arayış vardır: ender müon bozunumları, ender kaon bozunumları, steril nötrinolar, Sekizinci Bölüm'de bahsettiğim majorana nötrinoları ve daha pek çoğunun arayışı. Çeşitlilik hakkında bir fikir vermek için burada birkaçını anacağım. LHC'deki Tekkutuplu ve Egzotikler Detektörü (The Monopole and Exotics Detector, MoEDAL), kozmik ışınları incelemek için 1940'larda kullanılan fotografik levhalara dönüş yapar fakat onları plastik levhalarla değiştirir. Levhalar bir süre sonra bir kimyasal oyma baskı tekniğiyle "banyo edilir" ve plastiğe geçmiş parçacık yollarını ortaya çıkarır. Bunlar, dedektörün yanındaki çarpışmalarda üretilen manyetik tekkutupluların karakteristik işaretleridir. CERN'deki AEGIS Deneyi, Dünya'nın kütleçekim kuvvetini sıradan atomlar gibi mi, yoksa bir itme gibi mi hissettiklerini anlamak için antiatomlar üretir. Bir duvara lazer tutmayı içeren aksion avı vardır (gerçekten, bir foton bir aksiona

dönüşebilir, duvardan geçebilir ve bir fotona dönüşebilir) ve Fermilab'de Holometre isimli bir aygıt, kuantum "holografik gürültüyü" veya kuantum kütleçekiminden kaynaklanabilecek uzay ve zamanın yumrulu durumunu tespit etmeye çalışmaktadır.

Bahsedeceğim son deney, "g-2" veya müonun manyetik momentinin ölçümüdür. Müon diğer tüm fermiyonlar gibi spin atar ve spin atan bir elektrik yükü bir manyetik alan ürettiği için, tüm fermiyonlar minicik çubuk mıknatıslar gibi davranır. Manyetik moment, yani g, o minicik mıknatısın gücünün ölçümüdür; 2 civarında bir değeri olmalıdır, dolayısıyla g-2 sıfır civarında olmalıdır. Elektronların manyetik momentlerinden İkinci Bölüm'de kısaca bahsetmiştim çünkü bu QED'deki en kesin hesaplanan nicelik, bilimdeki en kesin teoridir ve bu onu her türlü yeni fiziğin değeri çok hafifçe değiştirmesine karşı çok hassas kılar. Müonun kütlesi bir elektrondan çok daha büyüktür, bu da olası her yeni etkileşimi geliştirir ve bu da onu bir keşif yapmak için çok uygun bir alan haline getirir.

Müonları bir başka manyetik alana koyarsanız, biraz sallanacaklardır; biraz Dünya'nın manyetik alanıyla hizalanmak için dönen bir pusula iğnesine benzerler. Fakat penguenlerde veya proton bozunumunda olduğu gibi, yeni ağır parçacıklar müon ile dış manyetik alan arasındaki etkileşimi etkileyebilir ve sallanma, beklendiğinden daha büyük olabilir. Sallantıyı ölçerseniz, g-2'nin değerini ve muhtemelen yeni fiziğin ipuçlarını elde etmek mümkün olabilir.

Bu, Long Island, New York'taki Brookhaven Ulusal Laboratuvarı'nda 1997'den 2001'e dek süren bir deneyde yapılmıştır. Müonların beklenenden daha fazla sallandıkları ortaya çıkmıştır: ölçüm, beklenenden 3,6σ fazlaydı; bu neredeyse

LHC'deki ender B-bozunumu sinyali kadar önemlidir fakat kesin bir keşif değildir. Ancak deney hassaslığının sınırına erişmişti ve sonucun kesinliğini geliştirmek için çok daha fazla müona ihtiyaç vardı. Dolayısıyla 2013'te deney bu müonları üretebilecek bir yere, Illinois'daki Fermilab'e taşındı. Deneyin merkezinde, 15 metre genişliğinde devasa bir dairesel mıknatıs vardı. Bu mıknatıs bir mavnaya yüklenerek Meksika Körfezi boyunca Mississippi'ye, oradan Illinois kanal sistemine taşınmış, son olarak da bir kamyonete nakledilmiş ve son birkaç millik yolu aşarak Fermilab'e götürülmüştür. Bu yolculuk 5000 kilometreyi aşmıştır. İyileştirilen deney muhtemelen yakınlarda internette yayınlanacaktır, böylece önümüzdeki birkaç yıl içinde Brookhaven sonucunun gerçekten de yeni fiziğin bir işareti olup olmadığını bileceğiz.

Yeni fizik arayışı çıkıntı avlarından penguenlere, kesin ölçümlere dek pek çok alanda sürmektedir. Henüz hiçbir şey kesin değilse de, yaklaşan bir devrimin ilk işareti olabilecek ipuçları, yeni parçacıklar veya tuhaf davranışlar vardır. Fakat şimdi bile oralarda bir yerde keşfedilmeyi beklediğini bildiğimiz bir şey vardır: karanlık madde.

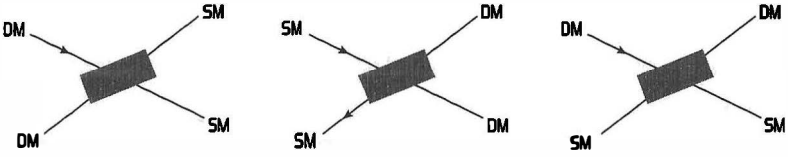
Karanlığı avlamak

Karanlık madde arayışı, Süpersimetri, ekstra boyutlar veya herhangi başka bir teori arayışından epey farklıdır. Süpersimetri'de teori önce geldi. Bu Standart Model'i matematiksel güzellik doğrultusunda genişletmenin derli toplu bir yoluydu. Karanlık maddeyle, önce veriler geldi. Bu veriler galaksilere ilişkin ölçümlerdi ve ancak tuhaf yeni bir parçacığın varlığıyla açıklanabilirlerdi. Bir şeylerin orada olduğunu biliyoruz, sadece ne olduklarını bulmamız gerek ve bunu yapabilmek için onları bir laboratuvarda ölçmemiz gerekiyor.

Karanlık madde ile nötrinolar arasında güçlü bir paralellik vardır. Nötrinoların ilk kanıtı dolaylıydı: beta bozunumunda kaybolan enerji. Nötrinoları direkt olarak ölçmek son derce güçtür, fakat bunu yapabilen deneyler birkaç sürprizle karşılaştılar. Galaksi rotasyonu eğrilerinden kütleçekimsel merceklemeye varana dek, karanlık madde için eldeki kanıtların tamamı dolaylıdır. Bir şeyleri direkt ölçmek de son derece güç olabilir fakat bugünkü deneyler en sonunda sonuca yaklaşmış olabilir ve umuyorum ki daha fazla sürprizle karşılaşacaktır.

Karanlık maddeyi ancak Standart Model parçacıklarıyla etkileşiyorsa tespit edebileceğiz. Aksi takdirde, bizim inşa edebileceğimiz hiçbir detektörde iz bırakmayacaktır. Etkileşim, zayıf kuvvet veya Higgs bozonunu (en nihayetinde karanlık maddenin kütlesi vardır) veya büsbütün yeni bir bozon içerirdi; şu anda detaylar hakkında endişelenmemize gerek yok. Fakat eğer böylesi bir etkileşim varsa, karanlık maddeyi incelemek için üç yolumuz var demektir. Bu üç yol, aslında tek bir Feynman Diyagramının üç biçimde döndürülmesinden ibarettir.

İlkinde, karanlık madde parçacıkları çarpışır ve Standart Model parçacıklarına dönüşür. Samanyolu ve diğer galaksilerde bir sürü karanlık madde olduğundan, bu tür etkileşim, her zaman meydana geliyor olabilir. Şimdi işin içine Fermi Gama Işını Uzay Teleskobu giriyor. 2008'de fırlatılan teleskop, evrendeki en şiddetli yerlerde, örneğin süperkütleli kara delikler, çarpışan yıldızlar, pulsarlar ve süpernovalarda üretilen yüksek enerjili fotonların peşinde, Dünya'nın etrafında döner. Karanlık madde avcıları, onun aynı zamanda aradıkları sinyali de alıyor olabileceğini fark etmiştir. Fermi verileri



Karanlık maddenin Standart Model parçacıklarıyla olası etkileşiminin
üç yolunu gösteren dönen bir Feynman Diyagramı.
Etkileşimin ayrıntıları sansürlenmiştir!

internette mevcut olduğundan, bir göz atmışlardır. Gerçekten de, Samanyolu'nun merkezine yakın bir noktadan pek çok gama ışını geldiğini ortaya çıkarmışlardır. Bu, karanlık madde çarpışmalarının üretiyor olabileceği türde bir sinyaldi ve karanlık maddenin büyük kısmının yaşadığı yerden geliyordu. Fakat her galaksinin merkezi karmaşık bir yerdir, dolayısıyla karanlık madde etkileşimleri gördüğümüzü iddia etmeden önce, bu gözlemin başka bir açıdan da desteklenmesi gerekmektedir.

İkinci yöntem için bu Feynman Diyagramını çevirirsek, elimizde çarpışarak karanlık madde oluşturan iki Standart Model parçacığı olur. Eğer bir sürü Standart Model parçacığı çarpıştıran tek bir yer söylememiz gerekse, bu LHC'dir: CERN'de karanlık madde yapmak mümkün olabilirdi. Sinyal, nötrinolarda olduğu gibi görünürdü; karanlık madde detektörlerle etkileşmezdi fakat tespit edilmeden giderdi. Karakteristik sinyal, enerjiden yoksun olurdu: bir yanında yeniden yapılandırılmış bazı parçacıklar, diğer yanında kayıp karanlık maddenin bulunduğu kararsız bir çarpışma. Bu çarpışma avında henüz bir keşif yapılmamıştır fakat yakında, İkinci Çalışma'da böyle bir şey olabilir.

LHC bazı karakteristik çarpışmalar keşfetse bile, yine de kesin olamazdı. Nötrinolarda olduğu gibi, hakkında daha fazla şey öğrenmek için karanlık maddeyi direkt olarak ölçmeyi

çok istiyoruz. Diyagramı yeniden döndürürsek, elimizde bir Standart Model parçacığından seken bir karanlık madde parçacığımız olur. Bu Sekizinci Bölüm'deki nötrino etkileşimlerine çok benzerdir. "Direkt tespit" deneyleri, nötrino deneyleriyle çok benzer fikirlere dayanır: Arka plan radyasyonu ve kozmik ışınlardan korunmaları için yeraltının derinliklerine, kullanılmayan madenlere gizlenen, altı üstü yılda birkaç tane karanlık madde etkileşimi arayan son derece hassas aygıtlar yapılmıştır. Kesinlik artmaktadır ve İtalyan Alplerinin altındaki Xenon 1T ve Güney Dakota'daki madende (bu daha önce Ray Davis nötrino deneyine ev sahipliği yapan madendir) yer alan Lux Zeplin (LZ) gibi gelecek nesil deneyler, yakında başlayacaktır.

İdeal olarak, direkt tespit deneylerinde, LHC'de bir sinyal belirecektir ve Fermi Teleskobu'nun gözlemlediği gama ışını sinyallerine uyacaktır. Aksi takdirde, karanlık madde umduğumuzdan çok daha aldatıcı demektir.

Daha büyük bir bot?

Bu gerçekten de ilginç bir dönemdir. Tarihteki en büyük, en güçlü deneye sahibiz ve daha küçük pek çok başka deney de tıpkı onun gibi, yeni fiziğin peşinde, teknolojilerin sınırını zorluyor. Elimizde halihazırda birkaç ipucu var ve önümüzdeki on yıl içinde LHC hepten yeni bir parçacık ailesi keşfedebilir, SüperNEMO nötrinonun Majorana doğasını ortaya çıkarabilir ve LZ en sonunda karanlık maddeyi tespit edebilir.

Biraz daha ileriye bakacak olursak, LHC 2019 ila 2020'de bir kez daha iyileştirilecek; fakat bu kez daha yüksek enerji değil, daha yüksek çarpışma oranlarına (parlaklık olarak bilinir) ulaşmak üzere. Yüksek Parlaklıklı LHC (HL-LHC), daha sonra 2035'e dek çalışacak, tüm fantastik yeni keşiflerimizi

detaylarıyla incelemek veya yeni fiziğin saklanıyor olabileceği her yerin altını sütüne getirmek için kullanılacak.

Derin Yeraltı Nötrino Deneyi (DUNE), şu an 2022'de veri almaya başlayacak şekilde ayarlanmış durumdadır ve Güney Dakota'daki o madende yapılan nötrino deneyleri geleneğini sürdürmektedir. Illionis'da, yani 1200 kilometre uzaktaki Fermilab'de üretilen hızlandırıcı nötrinolarını inceleyen DUNE, nötrino karışması ve YP ihlali hakkındaki soruları cevaplandıracak, evrendeki antimadde yokluğunu anlamamız için bize destek olacaktır.

Geleceğe bakmak, bir spekülasyon oyunu haline gelir. LHC'de yeni bir parçacık ailesinin ilk gözlemini yaparsak, bir sonraki adım aşikârdır: enerjiyi yükselterek geri kalanını bulmak. Fakat bu kolay değildir; bu ancak protonların aynı dairesel tünelde hareket etmesini sürdürecek yeni, daha da güçlü mıknatıslar veya daha geniş bir tünelle yapılabilir. Şu sıralar, 100 TeV'e ulaşan, yani LHC'den neredeyse 8 kat güçlü bir makineye ev sahipliği yapacak, Cenevre'nin etrafını dolaşacak, 100 kilometrelik bir halka yapılması gündemdedir. CERN parşömenine yeni bir sayfa ekleyecek olan, şimdiki ismiyle Gelecek Dairesel Çarpıştırıcı (FCC), LHC'den protonlarla beslenecek ve protonlar bu yeni rekor enerjiye ulaşacak kadar hızlandırılacak. Çin de FCC'den önce hazır olabilecek benzeri bir makineyle oyuna girebilir. Aynı zamanda elektronlar ile pozitronları çarpıştıran, Higgs bozonunu veya büyük keşiflerden birini çok detaylı incelememize izin veren yeni bir hassas makine planı vardır. Bu makine, CERN'deki yeni 100 kilometrelik tünele girecek ilk şey olabilir; ya da bu, dünyanın başka bir yerindeki doğrusal hızlandırıcı da olabilir.

Buna karşın, hiçbir şey bulmama ihtimalimiz de vardır. LHC bir kez daha Standart Model'in 13 TeV'de diğer yerlerde

olduğu kadar kusursuz işlediğini kanıtlayabilir. Tüm çıkıntılar ve sıra dışı davranışlar, zaman içinde pürüzsüzleşebilir. Karanlık maddenin yanı sıra, nötrinosuz çift beta bozunum sinyali de aldatıcı olmayı sürdürebilir. DUNE bize nötrino YP ihlaliyle ilgili her şeyi söyleyebilir fakat yine de evrenimizdeki antimadde yokluğunu açıklayamayabilir. Ve bu senaryoda ne yapılacağı hiç net değildir.

Yine de FCC savunulabilir. Keşifler yapmanın tek yolu, tıpkı LHC'nin bugün yaptığı gibi, keşfedilmemiş topraklarda ilerlemektir. Fakat LHC gerçekten de bir kazan-kazan durumuydu: Higgs bozonunu bulacağı veya Standart Model'i çökme noktasına getireceği garantiydi. Higgs'i bulduğumuzdan beri, orada daha fazlasının olduğunu biliyoruz fakat onun nerede olduğuna dair pek az ipucu var ve önümüzdeki yıllardaki arayışlar hiçbir cevap üretemezse, 100 TeV'de bile bir şey bulma garantisi olmayabilir. 1993'te ABD senatosu Texas eyaletindeki Dallas kentinin biraz güneyinde inşaatı devam eden devasa makine, Süper İletken Süper Çarpıştırıcı üzerindeki çalışmaları durdurdu. Bu makine LHC'den çok daha yüksek enerjide, 40 TeV'de protonları çarpıştıracak ve Higgs bozonunu yıllar önce bulmuş olacaktı. Fakat proje çok pahalı görüldü ve ne tür keşifler yapılabileceği konusunda hiçbir ipucu elde edilemeden, CERN'deki daha büyük çarpıştırıcı aynı kadere mahkûm olabilir. Parçacık fiziğinin geleceği, en başa dönmek olabilir. LHC gibi bir başka devasa deney düzeneği tasarlayıp inşa etmek yerine, gelecekte, daha küçük pek çok deney ve yaklaşım geliştirmek, Standart Model'in her bir uzak köşesini test etmek gibi çok farklı işler yapılabilir.

İşte şimdi burada duruyoruz; bir devrimin veya çok daha uzun bir bekleyişin kıyısındayız. Bu, yenilikçi ve çeşitlilik sergileyen deneylerin ve veri analizinin, ağı olabildiğince geniş

atmanın, bir sonraki büyük keşfe denk gelmek için doğru soruları sorduğumuzdan emin olmanın zamanıdır.

Her şeyin anlamı

Yirminci yüzyıl, fizikte bir devrime şahit oldu ve bu devrim teknolojide ve yaşam biçimlerimizde bir başka devrime yol açtı. Kuantum mekaniği, ondan sonraki tüm egzotik parçacıklar gibi tam bir sürpriz oldu ve tüm bunları kavramak on yıllar aldı. Sonuçta elde edilen teori, Standart Model hem bilimsel hem de kültürel olarak önemlidir: Tarihimizin hiçbir noktasında evreni böylesine detaylı bir şekilde kavramamıştık.

Bu kitap, bu kavrayışla ilgilidir; onun ardındaki deneyler ve teorilerle ve şimdi yavaş yavaş ortaya çıkarmaya başladığımız altta yatan güzellikle ilgilidir. Yol boyunca ortaya çıkan ikincil etkilerle ilgili değildir; gerçi bunların sayısı çok fazladır ve bu kitapta yalnızca birkaçından bahsettim. Bu kitapta Higgs bozonu gibi bir şeyin ne kadar faydalı olduğundan da bahsetmedik, çünkü ne kadar faydalı olduğu konusunda hiçbir fikrim yok. Yeni keşiflerin bizi götürdüğü yönleri hayal etmek neredeyse imkânsızdır; örneğin hiç kimse kuantum mekaniğinin yarı iletkenlere, dijital elektronik devrimine götüreceğini önceden göremezdi. 1943'te IBM'in başkanı şöyle düşünmüştü: "Dünya pazarı en fazla beş bilgisayarla doyar." Ancak ben, eğer bu keşifleri yapmazsak asla kullanılmayacaklarından ve şu an yaptığımız keşiflerin gelecekte bir şekilde kullanılacağından eminim. Şu anda Higgs bozonları için bir dünya pazarı olmadığını düşünüyor olabilirim fakat umarım gelecekte insanlar Higgs'le çalışan uzay araçlarında uçuşurken, geriye bakıp bu ifademin ne kadar da safdilli olduğunu düşünecektir.

Aynı zamanda benim gibi hayatını son derece küçük şeyleri incelemeye adamış insanlar hakkında anlatılacak büsbütün farklı bir hikâye daha var. Sayımız çok; her birimizin farklı bir hikâyesi var, bu işe yaşamımızın farklı aşamalarında girdik ve tüm bunların her şeye değeceğini düşünmek için farklı nedenler bulduk. O yüzden size yalnızca kendi fikrimi vereceğim. Bence dünya artık insanlar Higgs bozonunun var olduğunu bildiği için daha iyi bir yer. Eğer ekstra boyutlar varsa, dünya daha da iyi bir yer olacak çünkü onu da biliyor olacağız. Bu, *Mona Lisa*, Taj Mahal, Mısır piramitleri, Machu Picchu, *Hamlet*, Genel Görelilik, müzik, dans, internet veya hayatımızı daha zengin, tatmin edici ve güzel kılan diğer her şeyin dünyamızı daha iyi bir yer yaptığını bilmeye benziyor. Bu hikâyenin bir sonraki bölümünü yazmaya yardım etmek dışında bir şey yapmak isteyebileceğimi düşünemiyorum. Ve bir sonraki bölüm, yalnızca başlangıç olabilir...

ON İKİNCİ BÖLÜM

YENİ FİZİK

2015'te LHC 13 TeV'deki ilk çarpışmalara sahne oldu. Beklenenden daha inişli çıkışlı bir yol oldu fakat bu inanılmayacak kadar karmaşık makineyi iki yıl süren tamir ve iyileştirmelerin ardından tekrar çalıştırmaya başlamak ve ardından çarpıştırma performansını önceki rekorun neredeyse iki katına çıkarmak zaten kolay bir iş olamazdı. Fakat hazirandan kasıma dek protonlar çarpıştırıldı ve sonuçlar kaydedildi.

Deneycilerin yapacağı yığınla iş vardı; kalibrasyonlar güncellendi, detektörler ve bu yeni enerjilerde çarpışmaların davranışları hakkında bilgiler edinildi. Ve elbette bu çarpışmalar analiz edilerek yeni bir şeyin işaretleri arandı. ATLAS ile CMS deneyleri birbirlerinin önyargısından kaçınmak adına, sonuçlardan ve onları kamuoyuyla paylaşabileceklerinden emin olana dek bağımsız çalıştı. Ve 15 Aralık 2015'te bilgi alışverişinde bulunmaya hazırdılar.

Deneylerin bağımsızlığından emin olmak için belirli seviyede bir gizlilik olmalıydı. Her deneyin sergilediği veri ve devam eden analizlerin statüsü, sonuçlar kamuoyuna açıklanmaya hazır olana dek kapalı kapılar ardında tutuldu. Fakat işin içinde altı bini aşkın insan varsa, söylentilerin dışarı

ulaşmasına şaşmamak gerek. Ve 15 Aralık'ın öncesinde, ATLAS'ın beklenmedik bir şey bulduğuna dair bir söylenti yayıldı.

Bu noktada herhangi bir keşif yapılması çok önemli bir şeydir. Standart Model daha fazla parçacık öngörmediği için yeni bir parçacık ortaya çıkarsa bu ciddi bir gelişme olurdu. Haberciler bunu duymak için yıllardır bekliyor. Bazı teorisyenler bu nedenle biraz fazla heyecanlandı. Buna "ambulans kovalamak" diyoruz; ne kadar küçük veya önemsiz olursa olsun yeni bir şeyin ipucu ortaya çıktığında biri onun üstüne bir gözde teorinin nihai kanıtıymış gibi atlayacaktır. Ve söylentileri duyan pek çok insan, atlamaya hazırdı.

Ben ATLAS'ta çalıştığım için sonuçlar kamuoyuna açıklanmadan önce içerideki tartışmaları takip etme fırsatım oldu. Bir çıkıntı vardı. Devasa bir şey olmasa da, eninde sonunda bir çıkıntıydı. İki proton içeren bir olay kümeleşmesi. Bunlar Yedinci Bölüm'de bahsettiğim Higgs bozonu çıkıntısını keşfetmek için kullandığımız türde olgulardı. Fakat bu çıkıntı çok daha ağırdı: Higgs bozonunun 125 GeV'lik bir kütlesi vardı, bu yeni çıkıntı ise 750 GeV'lik bir kütleye sahipti. Böyle bir şey gördükten sonra, eşit derecede heyecan ve şüphe hissettik. Bu arka plan olaylarının rastlantısal bir kümelenmesi olsa gerekti. Veya detektördeki sesten kaynaklanıyor olmalıydı. Pek çok çapraz kontrol gerçekleştirildi fakat çıkıntı kaybolmadı. Böylece 15 Aralık'ta artık kamuoyuna açıklama yapmak ve nihai çapraz kontrolü gerçekleştirme vakti gelmişti: CMS de aynı şeyi görmüş müydü?

2012'de Higgs bozonu keşfinin duyurulduğu büyük CERN oditoryumunda seminerler düzenlendi. Bu kez konuşmalar öğleden sonraya planlanmıştı, bu nedenle gece orada uyumaya gerek yoktu fakat salon seminerden birkaç saat önce dol-

maya başladı. Verilerden yola çıkılarak yapılan pek çok etkileyici yeni ölçüm gösterildikten sonra, herkesin görmek istediği histogram sergilendi: İki fotonlu olgular alınmış ve fotonlar birleştirilerek kütle hesaplanmıştı. Hem ATLAS hem de CMS çıkıntı bulmuştu Hem de aynı yerde: iki foton, toplam 750 GeV kütlesindeydi.

Resmi CERN açıklaması beklenebileceği gibi temkinliydi ve iki deneyin "difoton bozunum kanalında küçük bir fazlalık" bulduğunu duyurdu. Kendi başlarına alındıklarında, iki sonuç heyecanlanmak için yeterli değildi: CMS çıkıntısı arka plandan 2,6σ, ATLAS çıkıntısı da 3,6σ yüksekti. Yedinci Bölüm'de σ'nın açıklaması yapıldı fakat o esasen bir belirsizlik ölçüsü, arka plan olgularının rastlantısal şekilde kümelenerek sahte bir çıkıntı üretme ihtimalini niceliksel olarak belirtmeye yarayan bir ölçüdür. Sayı ne kadar yüksekse, meydana gelme ihtimali de o kadar düşüktür ve normalde bir çıkıntının yeni bir parçacığın işareti olması gerektiğini iddia etmeden önce arka plandan beklediğimizin 5σ üstünde bir değer isteriz. ATLAS ile CMS'nin aynı yerde küçük bir çıkıntı görmeleri, bunu mutlaka daha heyecan verici kılıyor çünkü yeni bir keşif aynen böyle belirmeye başlar fakat şimdilik bu kesin değildir. Onun gerçek olup olmadığını söylemek için daha fazla veriye ihtiyacımız var.

Fakat bu ambulans kovalayıcılar için yeterdi de artardı bile. Duyurudan dakikalar sonra teori makaleleri ortaya çıkmaya başladı; bu öyle hızlı oldu ki, bu makaleler duyurudan önce, söylentilere dayanarak yazılmış olmalıydı. İlk günde sekiz, bir hafta sonra 65, 2015'in sonunda ise 121 makale yayınlandı. LHC 2016 başında kış tatilinden sonra yeniden çalışmaya başladığında, 300'ü aşkın makale yayınlanmıştı. Açıkçası bunların hepsini okumadım ancak bu çıkıntı hakkında şim-

diden 300'ü aşkın enteresan söz söylenebileceğinden şüpheliyim. Makale yağmuru, muhtemelen aşırı heyecan, herkesten önce davranma kaygısı ve fon veren kurumlardan gelen sürekli makale üretme baskısının bir karışımından kaynaklanıyor olmalıdır.

Dürüst olmak gerekirse, bu gerçekten de yeni bir parçacıksa, çok heyecan vericidir. Sadece beklenmedik bir şey olduğu için değil; ortaya çıkabilecek bir sürü şey düşünülürse, hiç kimse parasını yeni bir iki fotonlu sinyale yatırmazdı. Bu aynı zamanda pek çok açıdan yorumlanabilir: bu, ekstra boyutlarla bağı olan bir parçacık olabilir. Daha önce bilinmeyen bir doğal kuvvetle bağlantılı büsbütün yeni bir bozon olabilir. Ve elbette, Süpersimetri'nin öngördüğü parçacıklardan biri de olabilir çünkü bu teori, hemen her şeyi öngörmek üzere biçimlendirilebilir. Veya bu, belki de daha ağır, ikinci bir Higgs bozonudur; durum buysa, bu ciddi bir sürpriz olurdu.

İki deney de kış tatili boyunca sürdü ve son kalibrasyonlar ile analiz teknikleri kullanılarak 2015 verisinin daha detaylı bir analizi yapıldı. Çıkıntılar biraz daha büyüdü: CMS için 3,4σ, ATLAS için ise 3,9σ oldu. Hâlâ kesin olmasa da, doğru yolda ilerliyor. Gelgelelim, bunun hiçbir yere çıkmaması gibi ciddi bir ihtimal de bulunmaktadır. Bu yeni bir parçacığın devrim niteliğindeki keşfi değil de, arka plan olaylarının rastlantısal ve alabildiğine cazip biçimde kümelenmesinden ibaret olabilir. Bundan emin olmanın tek yolu, daha fazla veri toplamaktır ve LHC Mayıs 2016'da bu veriyi sağlamak için üretimini artırdı ve sonunda yeniden dünya gazetelerinin ilk sayfalarında yerini buldu. Bu kez bunun nedeni farklı bir çıkıntıydı: Bir gelincik (daha doğrusu bir ağaç sansarı) yeraltındaki elektrik istasyonlarından birine girmeyi başarmış ve bir güç kablosunu çiğneyerek tamiri birkaç gün süren bir kısa

devreye neden olmuştu. Doğa bizi şaşırtmak için türlü türlü yollar izliyor!

Ben bu sözleri yazarken, LHC'nin 2016 çalışması tüm hızıyla devam ediyor ve her şey bittiğinde ve veriler analiz edildiğinde, bahsettiğim çıkıntının gerçek olup olmadığını anlayacağız. Bu parçacık fiziğinde uzun zamandır yaşadığımız en heyecan verici yıl ve şayet yeni bir parçacık varsa, bu Higgs bozonunun keşfinden çok daha önemli olacak. Standart Model'in ötesinde bizi bekleyen şeyin ilk işareti olacak. Ve böylece Yeni Fizik nihayet yüzünü gösterecek...

EK 1

SAYI GÖSTERİMLERİ

Parçacık fiziği, inanılmayacak kadar çok sayıda inanılmayacak kadar küçük şeyler üzerinde çalışır. Tüm bunlardan bahsetmek çetrefilli hale gelebilir çünkü başka konuları ele alırken bir şeyin "milyarda birinin milyarda birinin milyonda biri" gibi ifadeleri çok sık kullanamazsınız. Dolayısıyla böyle şeyleri yazmak için kısa yollarımız vardır ve bunların bazılarını muhtemelen bilgisayar hafızasından biliyorsunuz: megabaytlar, gigabaytlar vb. Her ön ek (mega, giga) bir harfle kısaltılabilir (M, G) ve solundaki sayının, sırasıyla bir milyon ve bir milyarla çarpılacağını anlatır. Yani bir megabayt bir milyon bayt, bir gigabayt ise bir milyar bayttır.

Bu sayılar aynı zamanda onun üstleri olarak da sunulabilir. Onun karesi, $10 \times 10 = 10^2 = 100$'dür. Onun küpü, $10 \times 10 \times 10 = 10^3 = 1000$'dir. 10^6=1.000.000'dur. Üstsimgeyle belirtilen "üst", tam yazılırsa sıfırların sayısıdır. Aynı zamanda bir sayı çok büyük sayılara bölündüğünde çok küçük sayılar elde edersiniz ve bu sayılar üstte bir eksi işaretiyle gösterilir. Örneğin, $1 \div 100 = 10^{-2} = 0{,}01$ ya da $1 \div 1000 = 10^{-3} = 0{,}001$ vb.

Bu kitapta kullanılan kısaltmalar şunlardır:

Sayı	Sözcük	Kuvvet	Önek	Simge
		10^{15}	Peta	P
	trilyon	10^{12}	Tera	T
1.000.000.000	milyar	10^{9}	Giga	G
1.000.000	milyon	10^{6}	Mega	M
1.000	bin	10^{3}	kilo	k
0,001	binde bir	10^{-3}	mili	m
0,000001	milyonda bir	10^{-6}	mikro	μ
0,000000001	milyarda bir	10^{-9}	nano	n
	trilyonda bir	10^{-12}	pico	p
		10^{-15}	femto	f

EK 2

STANDART MODEL'İN SİMETRİLERİ

Altıncı Bölüm'de, parçacık fiziğinde simetriyle ilgili bazı fikirlerden bahsetmiştim ve bu kısa ek bölümde, Standart Model'in yapısına ilişkin daha fazla bilgi vereceğim. Standart Model'in yapısı, bazen U(1)xSU(2)xSU(3) gösterimiyle ifade edilir. Bu kitabın geri kalanından biraz daha matematiksel bir ifadedir fakat en nihayetinde matematik atomaltı dünyasında bizim kılavuzumuzdur. Standart Model inşa edilirken, matematik, bir sorunu ortaya çıkarmıştı.

Öncelikle, simetri fikrine dönelim: Simetri evrenin davranış biçimini değiştirmeyen bir dönüşümdür. Bu simetrilerden bazıları neredeyse sıradan görünür: Dünya dönse de ve tüm parkuru beraberinde götürse de, 100 metrelik bir koşu parkuru 100 metre uzunluğundadır. Bunu simetrilerin dilinde ifade etmek gerekirse, koşu parkuru bir dönüşümden (Dünya'nın dönüşü) geçerken simetriktir (değişmezdir). Bu simetri için tam bir dönüşüm "grubu" oluşturmak mümkündür: Dünya döner, Dünya Güneş'in etrafında döner, Güneş Samanyolu ile birlikte döner vs. Bu tür simetri, bir yarışı çok daha kolay kılar: Güneş'e veya evrene göre yönünüzü bulmadan, yalnızca başlangıçtan sona dek koşmanız gerekir. Simetri olmadığın-

da, her şey daha da karmaşıklaşır: Ay'a yapılan Apollo Uçuşları, Dünya'nın Ay'a göre yönünü ve bunun roketin uçuşu sırasında nasıl değişeceğini açıklamalıydı.

Simetriler fiziğe uygulanmadan önce matematiksel olarak incelenmiştir. 19. yüzyılda yaşayan Norveçli matematikçi Sophus Lie, dönüşüm gruplarının özellikleriyle ilgilenmişti ve çalışmaları Emmy Nöther gibi başkalarına ilham vermişti. Dolayısıyla simetriler parçacık fiziğine uygulandığında, onları anlamak için kullanılan ve Lie Cebri olarak bilinen yöntem, hazırda bekliyordu.

Standart Model, bir parçacığın "adımsayarı"ndaki sonucu veya bir kuarkın renk yükünün "rüzgârgülü"nün yönü gibi, direkt olarak ölçemediğimiz ayar simetrilerine dayanır. Bunları doğrudan ölçemediğimiz için, kesin ayarları evrenin davranış biçimini değiştiremez. Bu, burada bir simetri olması gerektiği anlamına gelir: bir parçacığın "adımsayar"ını bir deneyin sonucunu değiştirmeden değiştirmek mümkün olmalıdır. Eğer deneyler bu ayara karşı hassas olsaydı, bu ayarı ölçebiliyor olmamız gerekirdi. Aslında önemli olan bir adımsayarın kesin ayarı değil, iki parçacık arasındaki göreceli ayardır. Dolayısıyla bu ayarlar değişecekse, parçacıkların iletişim kurarak göreceli senkronizasyonlarını bulmalarının bir yolu olmalıdır.

Bunu Lie Cebri'nin diline çevirirsek, bir parçacığın içsel adımsayarı, tek kollu bir saate benzeyen "tek boyutlu" bir özelliktir ve yalnızca ileriye veya geriye doğru kurulabilir (örneğin sola veya yukarıya kurulamaz). Bu, burada tek bir olası dönüşüm olduğu anlamına gelir: kolu döndürmek. Bu dönüşümü, U(1) grubu denen bir grup oluşturur. U, "unitary" (birleştirici) demektir; yani adımsayar kolunun uzunluğu değil, yalnızca işaret ettiği yön değişir. 1 ise onun 1 boyutlu bir

nicelikle ilgisi olduğunu gösterir. Her birleştirici grupta ilgili değişimlerin sayısı n^2 ile verilir; burada n boyutların sayısıdır. Dolayısıyla bu grup, bir değişim içerir: saati kurmak.

Fakat şimdi işin ilginç yanı geliyor: Matematik bize bir parçacığın adımsayarı için bir olası dönüşüm olduğunu söyler ve bu tek olası dönüşüm, tek bir gerçek fiziksel parçacığa denk gelir. Bu parçacık, bu simetri için ayar bozonudur ve parçacıkların iletişerek göreli senkronizasyonlarını bulmasını sağlar. Başta bu parçacığın foton olduğu düşünülüyordu fakat Standart Model'de bu parçacık esasen B bozonudur ve B bozonu daha sonra W^0 bozonuyla karışarak fotonu (ve Z bozonunu) üretir.

Güçlü kuvvet için üç olası boyut vardır (kırmızı, yeşil ve mavi) ve daha fazla olası değişim vardır: Kırmızıdan yeşile dönüş, maviden kırmızıya dönüş vs. renk yükü rüzgârgülünün her olası rotasyonunu toplamak, bize SU(3) grubunu verir. Burada U yine birleştirici anlamı taşımaktadır, yani renk rüzgârgülünün uzunluğu değil, yalnızca işaret ettiği yön değişir. 3, 3-boyutlu bir nicelikle uğraştığımızı gösterir. S, "özel" ("special") anlamı taşır, yani U(1) grubunun basit kurulmasına denk bir şey içermez; bunu kaldırmak, $(n^2 - 1)$ özel gruplarda olası dönüşümler verir.

Şimdi yine matematik gerçek fiziksel şeylere denk gelir: SU(3) grubunda sekiz olası dönüşüm vardır ve bunlar, her biri farklı renk kombinasyonları (mavi+antikırmızı, kırmızı+antiyeşil vs.) taşıyan sekiz farklı gluon türüne denk gelir.

Son olarak, zayıf yükün iki ayarı vardır; yazı veya tura. Dolayısıyla, burada olası dönüşümler SU(2) grubunu oluşturur. Lie Cebri, simetri matematiği, bize yine $(n^2 - 1)$ olası dönüşüm olması gerektiğini söyler, bu da üç tane W bozonu olması gerektiği anlamına gelir: W^+, W^0 ve W^-. Bu da eksik

bir şey olduğunun ipucuydu: W^+ ile W^- görülse de, W^0 daha önce hiç doğada görülmemişti. Bunu açıklamak için W^0'ı B ile karıştırarak foton ve Z veren Higgs mekanizmasını kullanan ve aynı zamanda parçacıklara kütle veren elektrozayıf model gerekliydi.

Dolayısıyla Standart Model'in kuvvetleri genellikle Lie Cebri kısaltmasıyla yazılır: U(1)xSU(2)xSU(3). İlk kısım, U(1) xSU(2), bir ve iki boyutlu bir simetriyi birleştiren elektrozayıf modeldir; SU(3) ise QCD'nin üç boyutlu simetrisi, güçlü kuvvettir. Her simetri altında mümkün bir dönüşüm grubu vardır ve bu dönüşümlerin her biri gerçek bir parçacığa, kuvvetleri ileten ayar bozonlarına denk gelir. Gluonlar kuarkların renk durumunu dönüştürür, W bozonları "tura" bir parçacığı "yazı"ya (mesela bir elektronu nötrinoya) dönüştürür ve b bozonu bir parçacığın adımsayarını kurar. Bu yalnızca matematik değil, gerçek olgulardır. Standart Model'deki kuvvetler, etrafımızdaki dünyayı biçimlendiren kuvvetler esasen evrenin temel özellikleri gibi görünen hepsi matematik diliyle yazılmış bu ayar simetrilerinden kaynaklanır. Bu gerçekten güzeldir.

SÖZLÜK

Atom: Tüm maddelerin temel yapıtaşı. Atomlar, proton ve nötronlardan meydana gelen minik bir merkezi çekirdek etrafında dönen bir elektron bulutu içerir. Normal bir atomda, her proton için bir elektron vardır. Nötronların sayısı değişebilir ve bazı konfigürasyonlar kararsızdır (radyoaktiftir).

Ayar simetrisi: Parçacık fiziğindeki en zor fakat aynı zamanda en güçlü kavramlardan biri olan ayar simetrisi, Standart Model'deki keyfi bir isimlendirmedir. Altıncı Bölüm'deki örneği alırsak, zaman dilimleri keyfi isimlerdir ve mekândan mekâna, zamandan zamana değişir. Bu isimler faydalıdır fakat altta yatan fiziği, örneğin Dünya'nın döndüğü hızı değiştirmez. Standart Model'de keyfi isimler, parçacık "adımsayarları"nın kurulumu, renk yükü "rüzgârgülleri"nin yönü ve zayıf kuvvet yükünün "tura" ve "yazı"sıdır. Standart Model'in kuvvetleri, simetriyi korumak için işler: Bu keyfi isimlendirmelerin altta yatan fiziği değiştirmeden değişmesine izin verir.

Baryon: Gluonlar tarafından birleştirilmiş üç kuark (veya antibaryon ise üç antikuark) tarafından meydana gelen bir kompozit parçacık.

Belirsizlik İlkesi: Werner Heisenberg tarafından 1927'de kuantum mekaniğinin sonuçlarından biri olarak sunulan Be-

lirsizlik İlkesi'nin iki formu vardır. Birincisi, bir parçacığın hem pozisyonunu hem de momentumunu kusursuzca bilemeyeceğimizi söyler; bunun sonucunda, bir parçacığı daha küçük bir alana sıkıştırma, onun momentum kazanarak kaçacağı anlamına gelir. İkincisi, "sanal parçacıklar"ın kısa süreliğine biraz enerji ödünç alabildiğini söyler: Ne kadar fazla enerji alınırsa, o kadar çabuk geri verilmelidir.

Bozon: Bir tür temel parçacık olan bozonlar "kuvvet taşıyıcıları"dır. Foton, W, Z, gluon ve Higgs'in her biri bozondur. Hint fizikçi Satyendra Nath Bose'nin soyadından yola çıkılarak isimlendirilmiş bozon, bir tamsayı birimine denk bir oranda spin yapar, Higgs'inki sıfırdır ve geri kalan hepsi 1 birim spine sahiptir. Var olduğu düşünülen (fakat henüz keşfedilemeyen) gravitonun spini 2 birim olmalıdır. Bozonların özelliği, fermiyonların aksine üst üste binebilmeleridir; aynı anda aynı yeri işgal edebilirler.

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC): LHC şu an dünyanın en büyük ve güçlü parçacık hızlandırıcısıdır. İsviçre'nin Cenevre kentinin biraz dışındaki bir tünelde yer alan 27 kilometrelik bir halkadan meydana gelir. LHC genellikle protonları rekor 13 TeV'lik bir enerjide çarpıştırır. Yaptığı bir başka şey de kurşun atomlarının çekirdeklerini çarpıştırmaktır.

Dirac Denklemi: 1928'de Paul Dirac tarafından keşfedilen bu denklem, tüm fermiyonların davranışını açıklar ve bizim parçacıkların davranışlarını kavrayışımızın temelini oluşturur. En basit haliyle şöyledir: $i\gamma.\partial\psi = m\psi$.

Elektromanyetizma: Standart Model'deki kuvvetlerden biri. 19. yüzyıldaki deneyler, yüzeyde statik elektrik ile manyetizma şeklinde görünen bu farklı fenomenlerin aslında aynı

kuvvetin (elektromanyetizmanın) ürettiği iki etki olduğunu kanıtladı. Standart Model'de elektromanyetik kuvvet, elektrik yükü taşıyan parçacıklar arasında uçan fotonlar tarafından iletilir. Zıt yükler (pozitif ve negatif) birbirini çekerken, aynı yükler birbirini iter.

Elektron: Standart Model'deki temel parçacıklardan biridir. 1897'de keşfedilen elektron, bir birim negatif elektrik yükü taşır ve tüm atomlarda bulunur. Komşu atomlardaki elektronlar arasındaki etkileşimler, farklı kimyasal elementlerin nasıl etkileştiğini belirler ve elektrik kuvveti yalnızca elektronların hareketidir.

Elektron-volt (eV): Parçacık fiziğinde kullanılan standart enerji, momentum ve kütle birimidir. 1 eV, 1 voltluk bir elektrik alanı tarafından hızlandırıldığında bir elektronun kazandığı enerjidir. Enerji $E=mc^2$ denklemiyle ve ışık hızının 1 olarak belirlendiği "doğal birimler" kullanılarak kütleye çevrilebilir. Bir nötrinonun kütlesi 1 eV'den azdır; elektron 511 keV (yani 511.000 eV), proton 938 MeV (938.000.000 eV, Higgs bozonu 125 GeV (125.000.000.000 eV) ve en ağır parçacık olan üst kuark ise 173 GeV'dir. LHC şu anda protonları 13 TeV'lik ((13.000.000.000.000 eV) bir enerjide çarpıştırmaktadır.

Elektrozayıf model: 1968'de geliştirilen elektrozayıf model, Standart Model'in kalbini oluşturur. Bu modelde elektromanyetik ve zayıf kuvvetler, Higgs mekanizmasıyla birleştirilir ve W ile Z bozonlarına kütle verirken, fotonu kütlesiz bırakır.

Fermiyon: Bir tür temel parçacık olan fermiyon, "madde parçacığıdır". Tüm kuark ve leptonlar fermiyondur. Fermiyon, ismini İtalyan asıllı Amerikalı fizikçi Enrico Fermi'den

alır ve Dirac Denklemi'ne uyum gösterir. Fermiyonların özelliği, yarım tam sayı spin yapmalarıdır (tüm temel fermiyonlar 1/2 spin yaparlar). Fermiyonlar yığılır: İki aynı fermiyon aynı pozisyonu işgal edemez (teknik olarak aynı kuantum evresini işgal edemez, bu da aynı kuantum sayılara sahip olmaktır), dolayısıyla atomlardaki elektronlar yalnızca çekirdeğe en yakın yörüngede durmaz, art arda daha yüksek yörüngeleri doldurur. Esasen iki tür fermiyon vardır: Standart Model'deki tüm fermiyonlar Dirac fermiyonlarıdır. Gerçi nötrinolar aslında, kendi antiparçacığı olan Majorana fermiyonları olabilir.

Feynman Diyagramı: Parçacık fiziğinin altındaki matematiğin gerçek bir sunumu niteliğindeki çizim. Bu diyagramlar, belirli bir etkileşimin olasılığını ve tüm olası sonuçlarını hesaplamakta kullanılabilir. Her Feynman Diyagramı, parçacıklar etkileştiğinde meydana gelen ve gelebilecek her şeyi sunar.

Foton: Foton bir bozon, elektromanyetik kuvvetin "elçi parçacığı"dır. Foton yüklü parçacıklar arasında enerji ve momentum taşıyarak onları birbirine veya birbirinden uzağa iter.

Gluon: Gluon, bir bozon, güçlü kuvvetin "elçi parçacığı"dır. Gluon güçlü kuvvet "renk" yükü taşıyan parçacıklar arasında enerji ve momentum taşır.

Görelilik: Einstein'ın uzay ve zaman teorisidir ve iki versiyonu vardır: Özel ve Genel Teori. 1905'te yayınladığı Özel Teori, hiçbir şeyin ışık hızını (c) geçen bir hızda yolculuk yapamadığı fikrine dayanır ve o meşhur enerji (E) kütle (m) ilişkisine varır: $E=mc^2$. Özel Teori ise, sabit hızlarda hareket için geçerlidir ve Genel Teori, bu fikirleri hızlan-

dırılmış hareketi kapsayacak şekilde geliştirir ve bunu yaparken, kütleçekim kuvvetini uzay ve zamanın bükülmesi olarak açıklar.

Güçlü kuvvet veya güçlü nükleer kuvvet: Atom çekirdeğini ve hadronların içindeki kuarkları bir arada tutan kuvvet. Standart Model'de güçlü kuvvet QCD ile tanımlanır ve bir ayar bozonuyla, gluonla iletilir.

Hadron: Her parçacık kuarklardan meydana gelir. Temel olarak iki tür hadron vardır: Baryonlar (üç kuark) ve mezonlar (bir kuark ile bir antikuark). Fakat tetrakuark (iki kuark ile iki antikuark) ve pentakuark (dört kuark ile bir antikuark) gibi daha egzotik ve son derece kararsız hadronlar da olabilir. Yüzü aşkın hadron bilinmektedir ve çok kararsız olduğundan bağlanamadan bozunan üst kuark dışındakiler her türlü kuark kombinasyonuyla meydana gelebilirler.

Higgs bozonu: Standart Model'in son parçası olan Higgs bozonu, 2012'de Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda keşfedilmiştir. Higgs bozonu, tüm evreni dolduran bir "depo" olan Higgs alanıyla özdeşleştirilen parçacıktır ve o alanda bir "dalgacığa" benzer. Diğer parçacıklar bu alanla etkileşebilir veya ona "yapışabilir" ve o enerjinin bir kısmını kütle olarak alabilir. Higgs bozonunun kendisi Higgs alanına yapışan her parçacıkla, yani kütlesi olan her parçacıkla etkileşir.

Kozmik ışın: Kozmik ışınlar, patlayan yıldızlar (süpernovalar), kuasarlar ve aktif galaksi çekirdekleri gibi evrendeki en şiddetli olgularda üretilen yüksek enerjili parçacıklardır (genellikle proton). Bu parçacıklar Dünya'nın atmosferine çarptığında, bazıları Dünya'nın yüzeyine erişecek kadar

uzun yaşayan (genellikle müonlar) parçacıklardan oluşan bir yağmur oluşturur. Bu çarpışmalar LHC'de erişilenlerden binlerce kat yüksek enerjilerde meydana gelebilir.

Kuantum alan teorisi: Standart Model'de kullanılan kuantum mekaniği versiyonu. Kuantum alan teorisi, Dirac Denklemi, Özel Görelilik Teorisi ve ayar simetrileri üzerine inşa edilmiştir.

Kuantum elektrodinamiği (QED): Elektromanyetik kuvvetin kuantum teorisi. Bu, bir ayar bozonuyla, fotonla özdeşleştirilir ve elektrik yükü taşıyan tüm parçacıklar tarafından deneyimlenir.

Kuantum kromodinamiği (QCD): Bir ayar bozonuyla, gluonla özdeşleştirilen, güçlü kuvvetin ayar teorisi. Güçlü kuvvet kuarkları hadronlar halinde tutar ve protonlar ile nötronları atom çekirdeğinde bir arada tutar. Bu kuvvet, renk yükü taşıyan tüm parçacıklar (yani hem kuarklar hem de gluonlar) tarafından deneyimlenir.

Kuantum mekaniği: Kuantum mekaniği, dünyanın davranışını bildiğimiz en küçük boyutlarda izah eder. Fikrin kendisi basittir: Her şey küçük "yumru"lar veya "kuantumlar" (kuanta) halindedir. Bu, atomlarına ve en nihayetinde Standart Model'in temel parçacıklarına ayrılan atom için geçerlidir. Fakat aynı zamanda bozonlar tarafından taşınan, "yumru"lardaki parçacıklar arasında iletilen enerji ve momentuma da uyar. Bu fikirlerin vardığı nokta, İkinci Bölüm'de anlatılan, çok tuhaf biçimlerde davranan bir parçacıklar tablosu gerektirir.

Kuark: Güçlü kuvveti (ve zayıf ile elektromanyetik kuvveti) hisseden bir tür temel fermiyon. Altı tane kuark vardır: yukarı, aşağı, acayip, tılsım, alt, üst.

Kütleçekimi: En aşina olduğumuz fakat henüz Standart Model'e uydurmayı başaramadığımız kuvvet. Kütleçekim kuvveti, bizi Dünya'nın yüzeyinde tutan ve Dünya'nın Güneş etrafında dönmeyi sürdürmesini sağlayan şeydir. Elimizdeki kütleçekim teorisi, bu kuvveti uzay zamanın eğilmesi olarak tanımlayan Einstein'ın Genel Görelilik Teorisi'dir. Şimdilik kütleçekimin kuantum teorisi yoktur ve bu teoriyi oluşturmak, yıllardır teorik fiziğin hedeflerinden biridir.

Lepton: Yunanca "hafif" sözcüğünden türeyen lepton, güçlü kuvveti hissetmeyen temel fermiyondur. Elektronlar, müonlar, taular ve nötrinolar leptondur.

LHC: *Bkz.* Büyük Hadron Çarpıştırıcısı.

Mezon: Bir kuark ile bir antikuarktan meydana gelen ve gluonlar tarafından birbirine bağlanan bir hadron.

Nötrino: Standart Model'deki en gizemli parçacık olan nötrino, ilk olarak 1930'da Wolfgang Pauli tarafından öngörülmüş fakat 1956'ya dek keşfedilmemiştir. Nötrinonun üç "çeşnisi" vardır (elektron, müon ve tau nötrinolar) ve bunların kütlesi, kendilerinden sonraki en hafif parçacık olan elektronun milyonda biri ağırlığındadır. Nötrinolar yalnızca zayıf kuvveti hisseder, dolayısıyla çok nadiren etkileşir. Henüz nötrino ile antinötrinonun aynı parçacık olup olmadıkları bilinmemektedir (bu nötrinoyu bir Majorana fermiyonu kılabilir; *bkz.* Sekizinci Bölüm).

Nötron: Atom çekirdeğinin bileşenlerinden biri olan nötron, bir baryon, yani üç kuarktan (yukarı-yukarı-aşağı) meydana gelen bir hadrondur. Nötronun elektrik yükü yoktur.

Parçacık: En küçük madde parçasıdır ve parçacık fiziğinde iki türü vardır: kompozit ve temel parçacık. Kompozit parça-

cıklar genellikle katı nesneler gibi davranırlar fakat esasen daha küçük şeylerden meydana gelirler. Protonlar ve tüm hadronlar, gluonlar tarafından bir arada tutulan kuarklardan meydana gelen kompozit parçacıklardır. Bir protona yeterince sert vurursanız, parçalanacaktır. Temel parçacıklar, bildiğimiz kadarıyla daha küçük bir şeyden meydana gelmezler (gerçi henüz onlara yeterince sert vurmamış da olabiliriz!) Standart Model'in on iki fermiyonu ile beş bozonu, şimdiye kadar keşfettiğimiz temel parçacıklardır.

Planck Ölçütü: Kuantum mekaniği ile kütleçekimin eşit şekilde önemli hale geldiği enerji ve kütle ölçütü. Planck Ölçütü kabaca 10^{16} TeV, yani LHC'de erişilen enerjinin bir milyar katıdır.

Proton: Atom çekirdeğinin bileşenlerinden biri olan proton, üç kuarktan (yukarı-yukarı-aşağı) meydana gelen bir baryondur. Proton bir birim pozitif elektrik yükü taşır.

QCD: *Bkz.* Kuantum kromodinamiği.

QED: *Bkz.* Kuantum elektrodinamiği.

Sanal parçacık: Bir Feynman Diyagramında hapis bir parçacık. Bu parçacıkları doğrudan ölçmek imkânsızdır ve fizik kurallarını bükmek için Belirsizlik İlkesi'ni kullanmalarına, yani kısa süreliğine enerji ödünç almalarına izin vardır.

Standart Model: En küçük boyutlarında evrenin halihazırdaki en iyi teorisi. Standart Model, 3 farklı kuvvet (elektromanyetik, güçlü ve zayıf) üzerinden etkileşen 12 madde parçacığı (fermiyonlar) içerir. Parçacıklar, Higgs bozonu isminde bir başka parçacıkla özdeşleştirilen Higgs alanıyla etkileşerek kütle edinir.

Süpersimetri: Süpersimetri, Standart Model'in en bilinen teorik uzantılarından biridir ve Standart Model'deki her par-

çacık için bir "süpereş"in varlığını öngörür. Fermiyonların bir bozon "süpereşi", bozonların ise bir fermiyon "süpereşi" vardır. Süpersimetri, Standart Model'deki pek çok problemi çözebilir fakat şu anda elimizde onun varlığına ilişkin bir kanıt yoktur.

Temel parçacık: Daha küçük parçacıklardan meydana gelmeyen parçacık. Veya en azından bildiğimiz kadarıyla elektronlar temeldir fakat protonlar öyle değildir; onlar kuarklardan meydana gelir. Standart Model, 12 temel fermiyonun ve 5 temel bozonun teorisidir.

Zayıf kuvvet: Muhtemelen Standart Model'deki en esrarengiz kuvvet olan zayıf kuvvet, iki bozonla iletilir: W ile Z. Bildiğimiz diğer ayar bozonlarının aksine, W ile Z'nin kütlesi vardır. Elektrik yüklü W bozonları etkileştikleri parçacık türünü değiştirebilir (elektronu nötrinoya, yukarı kuarkı aşağı kuarka vs.) Z bozonu elektrozayıf modelde öngörülmüştür ve esasen bir ağır foton gibi davranır.

WIMP: Şu an karanlık madde için tercih edilen açıklama olan WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), bir zayıf etkileşen büyük kütleli parçacıktır.

DİZİN

–A–

Aksion 226, 248
Aldatıcı Kuark 79
Alfa Centauri 177
ALICE 22, 96, 150
Antikuark 44, 47, 73, 83, 84, 85, 90, 94, 101, 111, 112, 127, 134, 135, 153, 162, 198, 242, 244, 245, 271, 275, 277
Antimadde 42, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 65, 66, 67, 73, 83, 90, 152, 192, 197, 198, 199, 200, 201, 219, 221, 254, 255
Antimüon 161, 245
Antinötrino 102, 103, 104, 108, 112, 113, 115, 179, 189, 190, 192, 193, 200, 277
Antinötron 84
Antiproton 44, 84, 134
Antropik ilke 235
Apollo Uçuşları 268
Astrofizik 208, 218
Astronomi 194
ATLAS 2, 15, 22, 63, 73, 76, 138, 140, 150, 154, 155, 157, 158, 160, 167, 168, 169, 241, 259, 260, 261, 262
Atom 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 31, 39, 45, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 78, 79, 80, 82, 83, 86, 94, 95, 96, 100, 105, 106, 109, 111, 139, 142, 144, 145, 151, 154, 156, 171, 173, 179, 181, 182, 183, 201, 207, 208, 217, 232, 233, 247, 248, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278
Atomaltı 7, 18, 21, 23, 58, 60, 71, 76, 79, 99, 117, 118, 139, 154, 174, 197, 205, 217, 218, 229, 267
Atom bombası 68
Ayar simetrileri 128, 130, 131, 133, 137, 139, 201, 220, 225, 227, 268, 270, 271, 276

–B–

Basınç 16
Belirsizlik İlkesi 26, 94, 95, 105, 111, 114, 115, 134, 135, 203, 212, 244, 245, 246, 271, 278
Beta bozunumu 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 107, 115, 134, 172, 174, 189, 190, 191, 204, 226, 236, 245, 247, 251, 255
Bohr, Niels 25, 34
Bozon 8, 14, 15, 23, 28, 29, 33, 50, 54, 71, 77, 79, 81, 96, 101, 102,

104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 123, 124, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 142, 144, 146, 149, 154, 155, 160, 161, 162, 163, 164, 166, 168, 169, 172, 173, 175, 176, 186, 188, 190, 197, 198, 199, 200, 202, 203, 214, 216, 220, 221, 223, 226, 227, 229, 232, 233, 242, 243, 244, 245, 251, 254, 255, 256, 257, 260, 262, 263, 269, 270, 272, 273, 274, 275, 276, 278, 279
Bozunma 40, 69, 108, 109, 111, 153, 160, 163, 173, 177, 179, 200, 243, 244, 247, 248
Bölmeli evren 235
Bremsstrahlung 152
Büyük Birleşik Teori 24, 227, 230, 232, 236, 248
Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC) 2, 14, 15, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 33, 41, 47, 49, 50, 51, 63, 66, 68, 72, 73, 75, 76, 77, 81, 82, 84, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 101, 109, 111, 112, 114, 117, 121, 123, 124, 136, 137, 138, 139, 140, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 156, 157, 159, 160, 161, 162, 164, 165, 169, 170, 172, 177, 179, 182, 195, 204, 213, 214, 224, 225, 229, 230, 231, 234, 235, 237, 240, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 250, 252, 253, 254, 255, 259, 261, 262, 263, 272, 273, 275, 276, 277, 278
Büyük Patlama 22, 77, 96, 110, 111, 117, 143, 172, 173, 198, 209, 210, 211, 212, 213, 225, 233, 234, 235

-C-Ç-

CERN 2, 21, 22, 47, 70, 84, 109, 115, 122, 123, 124, 134, 139, 141, 142, 144, 146, 150, 153, 157, 159, 165, 167, 180, 230, 245, 248, 252, 254, 255, 260, 261
Cherenkov, Pavel 74, 183
Cherenkov radyasyonu 183, 184, 193, 194, 195
CMS 22, 76, 138, 140, 150, 157, 167, 168, 241, 246, 259, 260, 261, 262
CP simetrisi 199, 200, 201, 202, 220, 225, 226
Çarpışma 22, 28, 32, 33, 34, 35, 38, 41, 47, 62, 63, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 134, 135, 143, 144, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 161, 163, 164, 165, 166, 167, 170, 177, 178, 179, 195, 204, 207, 213, 226, 230, 240, 241, 248, 252, 253, 259, 276
Çoklu evren 234, 235, 236

-D-

Darwin, Charles 26
de Broglie, Louis 26
Dirac Denklemi 26, 29, 42, 43, 65, 117, 123, 124, 175, 197, 201, 272, 274, 276
Dirac, Paul 26, 42, 66, 68, 189, 204, 221, 272, 274
Dolaşıklık 50
Doppler etkisi 210

-E-

Einstein, Albert 20, 34, 40, 43, 44, 54, 64, 68, 95, 118, 119, 124, 125, 180, 206, 211, 215, 221, 274, 277

Elektrik yükü 18, 29, 31, 37, 44, 60, 61, 65, 66, 67, 69, 73, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 90, 96, 101, 102, 106, 107, 126, 128, 129, 132, 144, 154, 172, 175, 189, 192, 221, 224, 243, 249, 273, 276, 277, 278, 279
Elektromanyetik kuvvet 20, 29, 36, 77, 78, 79, 80, 81, 86, 88, 89, 94, 95, 99, 101, 106, 117, 123, 124, 125, 131, 132, 133, 172, 176, 184, 201, 202, 208, 213, 222, 232, 273, 274, 276, 278
Elektromanyetizma 20, 21, 29, 53, 54, 78, 131, 132, 225, 229, 272, 273
Elektron 17, 18, 19, 20, 21, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 50, 51, 57, 58, 60, 61, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 81, 94, 95, 99, 100, 101, 103, 104, 106, 107, 108, 111, 112, 113, 115, 123, 126, 128, 131, 133, 134, 135, 136, 139, 140, 144, 145, 146, 147, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 161, 165, 171, 172, 173, 174, 175, 178, 179, 181, 182, 183, 184, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 198, 199, 200, 201, 214, 220, 221, 224, 241, 245, 249, 254, 270, 271, 273, 274, 277, 279
Elektrozayıf model 131, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 149, 160, 209, 236, 270, 273, 279
Element 19, 53, 56, 79, 144, 174, 273
Enerjinin korunumu 105, 125
Eşleşme sabiti 35, 36, 91, 103, 202
Eylemsiz 97

-F-

Fermi, Enrico 19, 26, 75, 189, 251, 253, 273
Fermiyon 19, 23, 26, 44, 75, 77, 82, 106, 107, 117, 123, 139, 172, 175, 176, 189, 199, 201, 203, 220, 227, 243, 244, 249, 272, 273, 274, 276, 277, 278, 279
Feynman Diyagramı 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 81, 82, 86, 87, 91, 92, 93, 94, 97, 101, 102, 104, 105, 111, 112, 124, 126, 132, 134, 135, 137, 145, 162, 184, 190, 192, 198, 199, 203, 214, 245, 246, 247, 251, 252, 274, 278
Feynman, Richard 27, 39, 42, 68, 72, 205
Foton 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 51, 54, 56, 60, 61, 63, 66, 67, 69, 77, 81, 82, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 100, 101, 102, 104, 113, 117, 123, 124, 126, 127, 128, 129, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 139, 143, 151, 152, 153, 154, 156, 157, 158, 161, 162, 163, 165, 168, 194, 195, 198, 207, 216, 217, 220, 223, 229, 240, 241, 243, 248, 249, 251, 261, 262, 269, 270, 272, 273, 274, 276, 279

-G-

Galaksi 14, 23, 64, 67, 82, 105, 143, 171, 174, 194, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 250, 251, 252, 275
Gama ışını 45, 46, 54, 66, 100, 183, 184, 195, 251, 252, 253
Geiger, Hans 57, 66, 80

Geiger-Marsden Deneyi 58
Gell-Mann, Murray 72, 73
Genel Görelilik 20, 21, 54, 64, 119, 206, 207, 211, 213, 215, 216, 217, 257, 277
GeV 146, 149, 152, 163, 165, 166, 169, 209, 214, 243, 244, 245, 247, 260, 261, 273
Glaser, Donald 70
Glashow, Sheldon 131
Gluon 81, 82, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 97, 101, 104, 107, 111, 112, 113, 117, 127, 128, 129, 151, 153, 157, 176, 198, 220, 231, 244, 269, 270, 271, 272, 274, 275, 276, 277, 278
Gross, David 91
Guralnik, Gerald 129
Güçlü kuvvet 36, 79, 80, 81, 86, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 101, 106, 107, 111, 112, 114, 117, 118, 126, 127, 133, 157, 173, 176, 184, 200, 201, 202, 208, 213, 222, 225, 226, 269, 270, 274, 275, 276, 277, 278
Güneş 14, 17, 20, 64, 99, 100, 105, 132, 174, 179, 181, 182, 184, 185, 186, 188, 189, 195, 215, 232, 267, 277
Güneş sistemi 17, 19, 20, 57, 58, 143, 173
Güneş tutulması 64

–H–

Hagen, Carl 129
Heisenberg, Werner 26, 62, 68, 94, 105, 271
Her Şeyin Teorisi 24, 215, 217, 222, 225, 236
Hess, Victor 64, 65
Higgs alanı 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 139, 176, 177, 191, 192, 202, 212, 243, 275, 278
Higgs avı 136
Higgs bozonu 8, 15, 23, 28, 33, 50, 54, 71, 96, 115, 117, 137, 138, 139, 140, 142, 144, 154, 155, 160, 161, 162, 163, 164, 166, 168, 169, 172, 176, 197, 198, 202, 214, 221, 223, 233, 243, 244, 251, 254, 255, 256, 257, 260, 262, 263, 273, 275, 278
Higgs döngüleri 234
Higgs mekanizması 130, 131, 133, 139, 149, 197, 201, 222, 223, 232, 243, 270, 273
Higgs, Peter 129, 136, 138, 139, 140, 144, 153, 165, 166, 167, 214, 220, 221, 241, 243, 244, 255, 256, 272
Holometre 249
Hubble, Edwin 64, 210, 211

–İ–

İkinci Çalışma 240, 242, 244, 247, 252
İkinci Dünya Savaşı 68, 69, 76
İsviçre 2, 21, 141, 229, 272

–J–

Japonya 184, 185
Joyce, James 72
Jung, Carl 37

–K–

Kalkülüs 52
Kaon 69, 71, 73, 113, 153, 179, 200, 248

Kara delik 194, 208, 215, 216, 229, 230, 251
Karanlık enerji 210, 211, 212, 213, 215, 218, 219, 230
Karanlık madde 24, 196, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 217, 219, 221, 223, 225, 226, 239, 240, 250, 251, 252, 253, 255, 279
Katot ışınları 55, 56, 57, 60, 61, 63
Kibble, Tom 129
Kiral simetri 176
Kobayashi, Makoto 109
Kompozit parçacık 271, 277, 278
Kozmik ışın 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 107, 111, 157, 179, 182, 184, 185, 219, 230, 248, 253, 275
Kozmolojik sabit 211, 212
Kuantum alan teorisi 39, 276
Kuantum devrimi 54, 58
Kuantum Elektrodinamiği (QED) 29, 30, 31, 32, 34, 36, 42, 44, 48, 81, 82, 86, 87, 91, 96, 97, 101, 102, 103, 117, 124, 204, 249, 276, 278
Kuantum Kromodinamiği (QCD) 81, 85, 87, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 101, 114, 117, 139, 244, 270, 275, 276, 278
Kuantum kütleçekimi teorisi 24, 216, 217, 218, 229, 236, 240, 249
Kuantum mekaniği 18, 20, 21, 24, 25, 28, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 41, 44, 46, 49, 50, 54, 66, 79, 104, 167, 204, 213, 215, 216, 217, 218, 231, 248, 256, 271, 276, 278
Kuantum teorisi 18, 28, 34, 40, 41, 62, 206, 216, 217, 276, 277
Kuark 10, 14, 17, 18, 19, 21, 26, 47, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 100, 101, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 127, 128, 133, 134, 135, 139, 147, 151, 153, 157, 162, 163, 171, 172, 186, 189, 190, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 214, 220, 226, 231, 242, 243, 244, 245, 246, 268, 270, 271, 273, 275, 276, 277, 278, 279
Kütleçekimi (yerçekimi) 20, 21, 23, 24, 52, 54, 64, 78, 119, 130, 173, 201, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 223, 227, 228, 229, 231, 232, 236, 240, 248, 249, 251, 275, 277, 278

-L-

Laon 83
Lederman, Leon 138
Leibniz, Gottfried 52
Leptokuark 227
Lepton 14, 75, 106, 107, 108, 109, 110, 114, 172, 173, 174, 175, 186, 197, 200, 201, 202, 243, 244, 247, 273, 277
LIGO 215, 216
Lie cebiri 268, 269, 270
Lie, Sophus 268
Linak 146, 147, 148, 150, 152

-M-

MACHO 208
Majorana, Ettore 189, 191, 253
Majorana fermiyonları 189, 274, 277
Majorana parçacıkları 189, 193, 202
Maki, Ziro 188
Manhattan Projesi 68, 141
Manyetik tekkutuplular 224, 225
Marsden, Ernest 57, 80
Maskawa, Toshihide 109

Matematik 7, 8, 15, 18, 27, 30, 32, 33, 38, 39, 40, 42, 46, 48, 49, 50, 52, 53, 56, 62, 77, 91, 92, 118, 120, 124, 125, 128, 129, 131, 203, 204, 217, 220, 221, 231, 250, 267, 268, 269, 270, 274
Maxwell, James Clerk 53, 54, 55
Mendeleev, Dmitry 53
Mermi Kümesi 207
MeV 11, 146, 147, 148, 214, 245, 273
Mezon 73, 74, 83, 84, 85, 90, 275, 277
Millikan, Robert 67
Molekül 16, 55, 59, 61, 78, 79, 105, 145, 151
Momentum 30, 65, 94, 95, 125, 146, 155, 178, 272, 273, 274, 276
M-Teorisi 231
Müon 22, 67, 68, 69, 71, 74, 75, 77, 79, 103, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 115, 133, 153, 157, 158, 161, 165, 173, 175, 178, 179, 184, 185, 187, 188, 241, 245, 246, 248, 249, 250, 276, 277

–N–

Nakagawa, Masami 188
Neddermeyer, Seth 67
Ne'eman, Yuval 71
Newton, Isaac 20, 26, 51, 52, 53, 206
Newton Yasaları 52, 54, 205
Nobel Ödülü 27, 57, 67, 129
Nöther, Emmy 125, 268
Nöther Teoremi 125, 127
Nötrino 21, 24, 75, 101, 102, 104, 107, 108, 110, 111, 112, 128, 131, 132, 133, 134, 140, 153, 170, 172, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 197, 199, 200, 201, 202, 208, 209, 210, 214, 219, 236, 241, 247, 248, 251, 252, 253, 254, 255, 270, 273, 274, 277, 279
Nötron 17, 18, 71, 73, 80, 83, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 103, 104, 106, 113, 153, 174, 182, 183, 186, 189, 247, 271, 276, 277
Nükleer kuvvet 80, 275
Nükleer reaktör 19, 20, 100, 173, 179

–Ö–

Özel Görelilik 43, 44, 54, 119, 125, 180, 274, 276

–P–

Parçacık detektörü 57, 60, 63, 65, 66, 70, 71, 144, 150, 152, 154, 156, 157, 158, 159, 160, 164, 172, 193
Parçacık fiziği 8, 14, 15, 18, 19, 21, 23, 25, 27, 33, 37, 39, 48, 51, 52, 54, 58, 61, 67, 70, 75, 76, 96, 102, 110, 114, 118, 119, 139, 145, 153, 175, 182, 195, 197, 200, 212, 217, 220, 230, 232, 239, 241, 255, 263, 265, 267, 268, 271, 273, 274, 277
Parçacık hızlandırıcı 14, 15, 19, 47, 55, 70, 71, 74, 76, 81, 84, 106, 115, 137, 142, 144, 146, 147, 148, 149, 159, 160, 180, 205, 272
Pauli, Wolfgang 26, 37, 101, 102, 172, 175, 236, 277
Pentakuark 84, 88, 93, 109, 275
Pion 68, 69, 71, 73, 81, 83, 113, 153, 179, 200
Planck, Max 206
Planck ölçütü 214, 215, 217, 232, 236, 278

Politzer, David 91
Powell, Cecil 69
Pozitron 43, 44, 45, 46, 47, 51, 66, 69, 81, 134, 135, 136, 152, 156, 164, 189, 198, 200, 254
Proton 17, 18, 28, 31, 41, 47, 66, 67, 68, 71, 73, 74, 80, 81, 83, 85, 88, 89, 90, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 103, 104, 106, 111, 112, 113, 121, 129, 133, 134, 139, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 158, 159, 160, 161, 162, 164, 173, 174, 179, 180, 181, 182, 183, 186, 189, 194, 213, 214, 216, 224, 226, 231, 240, 247, 248, 249, 254, 255, 259, 260, 271, 272, 273, 275, 276, 278, 279

–Q–

QCD (*Bkz.* Kuantum Kromodinamiği)
QED (*Bkz.* Kuantum Elektrodinamiği)

–R–

Rabi, I. I. 67
Radyasyon (ışıma) 40, 56, 60, 63, 64, 66, 67, 80, 99, 100, 151, 152, 156, 182, 183, 184, 191, 193, 194, 195, 208, 253
Rees, Charles Thomas 58
Reines, Frederick 102, 179
Renk yükü 82, 83, 85, 86, 88, 96, 102, 106, 107, 118, 126, 127, 128, 129, 131, 175, 192, 201, 268, 269, 271, 274, 276
Rochester, George 69
Röntgen, Wilhelm Conrad 55, 56
Rubin, Vera 206
Rutherford, Ernest 57, 58, 63, 99, 100

–S–

Samanyolu 64, 143, 171, 194, 205, 208, 210, 216, 251, 252, 267
Sanal parçacık 104, 105, 135, 203, 245, 272, 278
Schrödinger, Erwin 26, 40, 41
Schwinger, Julian 27
Sicim Teorisi 24, 204, 230, 231, 232, 235, 236, 237
Simetri 14, 82, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 139, 175, 176, 199, 200, 201, 220, 223, 225, 227, 267, 268, 269, 270, 271, 276
Spin 120, 175, 176, 177, 199, 243, 249, 272, 274
Standart Model 14, 15, 21, 23, 24, 50, 54, 74, 75, 77, 78, 79, 88, 98, 99, 107, 108, 110, 114, 115, 117, 118, 120, 126, 128, 131, 132, 133, 135, 136, 138, 139, 153, 160, 169, 170, 172, 174, 175, 176, 177, 184, 185, 188, 189, 191, 192, 193, 195, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 209, 212, 213, 214, 217, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 231, 232, 234, 239, 243, 244, 245, 246, 247, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 260, 263, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279
Süperiletken 150, 169
Süpernova 68, 174, 194, 195, 251, 275
Süpersimetri 8, 23, 204, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 227, 231, 234,

235, 236, 239, 240, 243, 244, 246, 250, 262, 278, 279

–T–

Tanrı Parçacığı 138, 139, 230
Temel parçacık 14, 18, 19, 20, 25, 49, 51, 119, 151, 175, 176, 272, 273, 276, 277, 278, 279
Teorik fizik 37, 54, 140, 215, 277
Termodinamik 53
Tesla 149
Tetrakuark 84, 275
TeV 146, 149, 151, 169, 170, 214, 224, 236, 240, 242, 254, 255, 259, 272, 273, 278
Tevatron 75, 142
Thomson, Joseph John 56, 57, 58, 60, 63
Tomonaga, Shin-Itiro 27

–U-Ü–

Uçan renk 86
Uranyum 40, 56, 156
Üst kuark 75, 83, 103, 110, 111, 113, 153, 172, 214, 243, 244, 246, 273, 275

–V–

Vakum 55, 92, 125
Voltaj 55, 145, 146, 147, 148, 151, 154

–W–

W bozonu 101, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 138, 139, 149, 172, 173, 175, 176, 186, 188, 190, 197, 198, 199, 200, 202, 223, 227, 229, 232, 242, 243, 245, 269, 270, 272, 273, 279
WIMP 73, 208, 209, 210, 221, 226, 279
Wilczek, Frank 91
World Wide Web 124
W parçacığı 101, 114

–X–

Xenon 1T 253
X-ışınları 45, 56, 60, 61, 152, 207

–Y–

Yeni Fizik 181, 240, 246, 247, 250, 263
Yıldız 64, 68, 100, 130, 143, 171, 173, 174, 177, 205, 206, 207, 208, 210, 212, 213, 229, 232, 233, 251, 275
Yörünge 19, 20, 33, 58, 60, 95, 99, 274
Yukawa, Hideki 68, 69, 80
Yüklü parçacıklar 30, 31, 37, 44, 61, 65, 66, 69, 83, 86, 87, 101, 145, 148, 154, 174, 274
Yük-Parite İhlali 199

–Z–

Zamanda yolculuk 19, 42, 48
Zayıf etkileşim 73, 115, 199, 208, 279
Zayıf kuvvet 79, 96, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 114, 117, 127, 128, 129, 130, 131, 133, 139, 172, 175, 176, 177, 184, 192, 200, 201, 208, 209, 213, 222, 223, 225, 226, 245, 251, 271, 273, 277, 279
Z bozonu 132, 134, 135, 136, 149, 161, 168, 172, 175, 186, 198, 202, 223, 227, 242, 243, 269, 273, 279
Zeplin, Lux (LZ) 24, 253
Zıt yükler 29, 30, 82, 83, 189, 273
Zweig, George 72

Standart Model'e göre atomaltı parçacıklar ikiye ayrılır: bileşim parçacıklar ve temel parçacıklar. Örneğin proton bir bileşimdir, yani bir protona yeterince sert vurursak kuarklara ayrılır. Kuarklar temel parçacıklardır... Ya da... biz öyle sanıyoruz, ya şimdiye dek onlara yeterince sert vurmadıysak?

Evrenin sırlarını bir bir çözüyoruz ve bugün çok önemli bir aşamaya geldik: Belki de, en küçüğün keşfi en büyüğün anlaşılmasını sağlayacak, karanlık enerji ve karanlık maddenin sırrı yeni bir atomaltı parçacığın ya da maddenin asıl yapıtaşının bulunmasıyla çözülecek...

CERN'deki Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda çalışan Gavin Hesketh bu kitabında atomaltı parçacıkların yapıları, davranışları ve ilişkileri konusunda çok ilginç bilgiler veriyor. Okuyacağınız, aynı zamanda, fermiyonlar ile bozonları, şimdiye dek keşfettiğimiz en küçük şeyleri inceleyen, tarihin en büyük deneylerinden birinin hikâyesidir.



internet satış:
saykitap.com

SAY 30 TL

ISBN 978-605-02-0664-7

9 786050 206647

SAY YAYINLARI

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